

RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATOK, AZOK MEGBÍZHATÓSÁGA ÉS KÖVETKEZMÉNYEI

RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

TÓTH LÁSZLÓ

Miskolci Egyetem, Bay Zoltán Intézet

SERGE CRUTZEN

Joint Research Institute

Készült: a TEMPUS S_JEP_11271 projekt támogatásával

Miskolc - Petten

- 1999 -

Kiadja a Miskolci Egyetem

A kiadásért felelős: *Dr. Tóth László*

Műszaki szerkesztő: *Dr. Tóth László*

Példányszám: 40

Készült Colitó fóliáról az MSZ 5601-59 és 5602-55 szabványok szerint

Miskolci Egyetem Sokszorosító Üzeme

A sokszorosításért felelős: *Kovács Tiborné*

TB. - '99- - ME

A levonat sokszorosításba leadva: 1999. Augusztus 15.

ELŐSZÓ

Minden történelmi korszak fejlődésének megvan a maga hajtóereje. Míg a XIX. században a tudomány előrehaladását egyértelműen a vasúti közlekedés robbanásszerű elterjedése hatotta át (évente átlagosan 10.000 km hosszágban építettek új vasútvonalakat), addig jelen korunkban a mikroelektronika adta lehetőségek szőtték át a mindennapjainkat, így a műszaki életünket is, szolgáltatva annak fejlődéséhez szükséges hajtóerőt. E két periódus fejlődésének sajátosságai természetesen megmutatkoztak a társadalmi struktúra formálódásában is. Az elmúlt században kialakult a nagyüzemi munkásság, megvalósult a tőke koncentrációja és létrejött a reál - dominánsan a műszaki - tudomány művelőinek népes tábora. Ez utóbbiak kivívták maguknak a széles társadalmi elismertséget, hisz tevékenységük közvetlenül hozzájárult a társadalom látható fejlődéséhez. Napjaink sajátossága az *információs társadalom* kialakulása, amelyben a mikroelektronikai elemek fejlődése átszövi a mindennapi életünk, tevékenységünk lehetőségeit. A műszaki életben ez többek között a számítástechnika robbanásszerű elterjedését, a diagnosztikai vizsgálatok eszközparkjának átalakulását, az anyagok viselkedésének, tulajdonságainak mélyebb megismerését szolgáló anyagvizsgálati módszerek, eszközök létrejöttét eredményezte. A fejlődés ütemét jól tükrözi az, hogy mindez az utóbbi 20 évben következett be (pl. a számítógépek mikroprocesszorainak műveleti sebessége 1978-1998 periódusban 3 nagyságrendet változott!).

A nagy értékű műszaki létesítményeket, szerkezeteket (hidakat, erőműveket, gázolajfeldolgozó rendszereket, vegyipari üzemeket, tranzit energiaszállító vezetékeket, repülőgépeket, hajókat, stb.) 15-50 éves üzemeltetésre tervezik az adott periódusban érvényben levő szabványok, műszaki irányelvek figyelembevételével. Ezekben pedig az azt megelőző néhány év ismeretszintje, technológiai színvonala testesedik meg. A mikroelektronika által diktált fejlődési ütem lehetővé teszi azt, hogy a nagy értékű szerkezetek, létesítmények üzemeltethetőségi feltételeit, maradék élettartamát egyre nagyobb megbízhatósággal becsüljük, azaz integritását egyre kisebb kockázattal ítéljük meg.

Az előzőkből adódóan kialakult egy új, diszciplína, a „**szerkezetek integritása**”, vagy „**szerkezetintegritás**” fogalma és létrejött intézményrendszere szerte a világon. A döntően mérnöki ismereteket integráló tudományterület feladata annak eldöntése, hogy egy adott szerkezet, létesítmény milyen feltételek mellett üzemeltethető a továbbiakban, ill. mennyi a maradék élettartama és ez milyen módon menedzselhető. Ahhoz, hogy a szerkezet állapotát a lehető legnagyobb biztonsággal felmérhessük - ebből adódóan a további üzemeltethetőség feltételeit a legkisebb kockázattal megbecsüljük - elengedhetetlen az, hogy

- *diagnosztikai vizsgálatokkal felmérjük a szerkezet állapotát,*
- *tisztázzuk a valóságos üzemi körülményekre jellemző mechanikai állapotot,*
- *megítéljük a beépített anyagok károsodásának folyamatát és mértékét az adott üzemeltetési feltételek mellett.*

Nyilvánvaló egyrészt az, hogy az előzőekben említett három fő terület (méréstechnika - mechanika - anyag) egyforma jelentőséggel bír a szerkezet integritásának megítélésében és bármelyik terület elhanyagolása, súlyának csökkentése hibás döntéshez, esetleg katasztrófához vezethet. Nyilvánvaló másrészt az, hogy minden műszaki döntésben, így az üzemeltethetőség

feltételeinek megítélésében is, bizonyos kockázat rejlik, hisz a tudomány adott szintjét hasznosítjuk és a rendelkezésre álló eszközpark maga is az adott kor színvonalát képviseli. Ebből adódóan mérlegelni kell az esetleges hibás döntés műszaki, jogi, közgazdasági és környezetvédelmi következményeit. Ezek együttes figyelembevételével viszont már kialakíthatók az ésszerű kockázatvállalás feltételei.

A szerkezetintegritás tehát egy igen komplex terület. Akik ezt művelik azoknak képesnek kell lenniük arra, hogy az üzemeltethetőséggel kapcsolatos problémákat teljes körűen átlássák, kiemeljék a meghatározó paramétereket, kérdéscsoportokat és alkalmasak legyenek arra, hogy az érintett tudományterületek szakembereivel érdemben szakmailag konzultálni tudjanak.

A szerkezetek integritásának, reális állapotának, maradék élettartamának megítélése mind az üzemeltetők, mind pedig a biztosítótársaságok alapvető érdeke. Az üzemeltető szempontjából a tudatos tervezés, fejlesztés megkerülhetetlen sarokpontja az üzemben levő készülékek műszaki állapota, biztonsága; a szükséges biztosítás tekintetében pedig az ésszerű kockázatvállalás, biztosítási összeg alapeleme a reális állapot ismerete. Ezek jelentőségét mérlegelve támogatta az Európai Unió a TEMPUS program keretében a „*Teaching and Education in Structural Integrity in Hungary*” címmel összeállított pályázatot, amelynek fő célkitűzése ezen új diszciplína meghonosításán kívül egyrészt a szerkezetintegritás oktatási anyagainak kidolgozása, másrészt a **Szerkezetintegritás - Biztosítási Mérnök Szakmérnöki Szak** beindítása. A négy hazai intézmény - Miskolci Egyetem, Budapesti Műszaki Egyetem, Kossuth Lajos Tudományegyetem Műszaki Kara és a Széchenyi István Műszaki Főiskola szakembereinek bevonásával elérendő célok megvalósítását nagyban segítették a következő külföldi partnereink:

- Prof. T. Varga, Bécsi Műszaki Egyetem
- Prof. H. P. Rossmanith, Bécsi Műszaki Egyetem,
- Dr. J. Blauel, Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik
- Prof. S. Reale, Università Degli Studi di Firenze
- Prof. G. Pluvinage, Universitz of Metz
- Dr. S. Crutzen, Joint Research Centre, European Commission, e füzet társszerzője

Miskolc, 1999. Június 15.

Tóth László

egyetemi tanár
a projekt koordinátora

Jelen füzet a szerkezetek állapotának felmérésénél használt roncsolásmentes vizsgálatokkal, azok megbízhatóságával és annak következményeivel foglalkozik. A radiológia, ultrahangos, folyadékbehatolásos, mágneses, örvényáramos vizsgálatokon, azok fizikai alapjain, leglényegesebb paraméterein és korlátain kívül a szivárgás mérés módszerei kerülnek áttekintésre. Ezt egészíti ki az akusztikus emissziós vizsgálat és az optikai holográfia fizikai alapjainak és gyakorlati alkalmazási területeinek bemutatása.

A szerkezetek integritásának megítélésében döntő szerepe van a roncsolásmentes vizsgálatok megbízhatóságának, az eredmények reprodukálhatóságának. Ezt figyelembe véve a hazai gyakorlatban első alkalommal kerül részletesen bemutatásra a nagy méretű atomerőműi szerkezeti elemeken végzett körvizsgálatok eredményei (PISC program) és az azokból levonható általánosítható következmények. A roncsolásmentes vizsgálati eredmények megbízhatósága és a szerkezeti elem biztonsága közötti közvetlen kapcsolat a törésmechanikai elvek következetes alkalmazásával kerül bemutatásra.

Tekintettel arra, hogy a vizsgálatokat sohasem önmagukért végzik, amelyeknek minden esetben költség vonzatuk van és eredményeiknek gyakorlati következményei lesznek igen lényeges kérdés a különböző módszerek összehasonlítása a képesség - gazdaságosság - megbízhatóság - szempontjából (az angol szakirodalomban ez már rövidített formában is megjelenik „CER” betűszóval (Capability-Effectivness-Reliability)).

Igyekszünk a roncsolásmentes vizsgálatok magyar nyelvű szakirodalmában olyan új színfoltot megjelentetni, amelynek középpontjában maga a cél, a szerkezeti elem megbízhatóságának megítélési folyamata és nem az eszköz áll. Az eszközök - a vizsgálati módszerek - bemutatása döntően azok fizikai alapjaira, alkalmazhatósági feltételeire, korlátaira és az eredményeinek megbízhatóságára, az azokat befolyásoló tényezők taglalására szorítkozik.

Mint minden új kezdeményezésnek, e füzetnek is nyilvánvalóan meglesznek a maga hiányosságai és a jövőben számos területen kiegészítésre szorulnak. Ezt nagyban segítené az, ha a Tisztelt Olvasók észrevételeiket, javaslataikat a szerzőknek vagy a projekt vezetőjének eljuttatnák. A TEMPUS program nyújtotta támogatás lehető legjobb kihasználása érdekében az elkészült tananyagokat INTERNET-en is közreadjuk a következő címen

<http://www.bzlogi.hu/baylogi/Quality/Tempus/index.html>

annak érdekében, hogy a szerkezetintegritás diszciplínája hazánkban minél gyorsabban és minél szélesebb körben elfogadásra és elterjedésre találjon.

Miskolc, 1999. július 15.

Tóth László

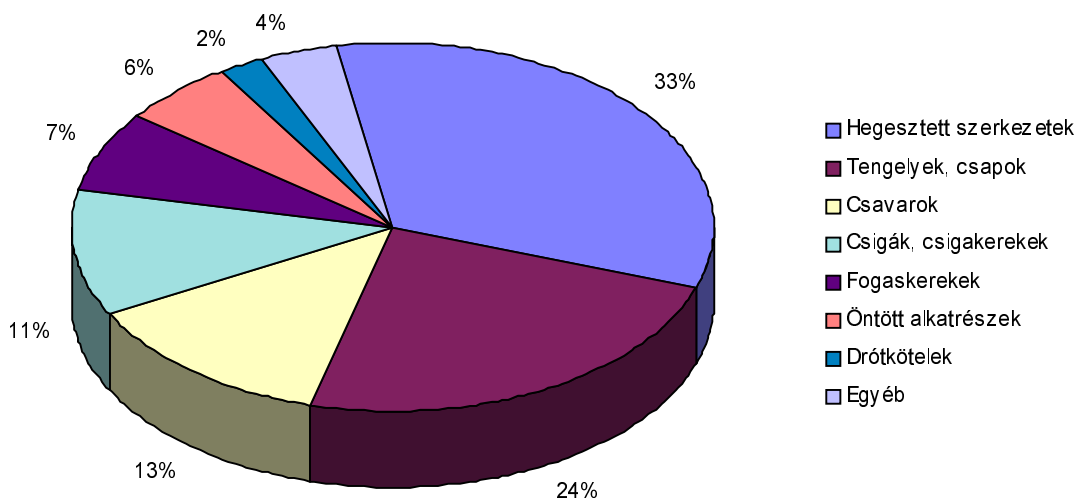
Serge CRUTZEN

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	1
1.Bevezetés	5
2. A roncsolásmentes vizsgálatok kialakulásának és fejlődésének rövid története	6
3. Vizsgálati módszerek kiválasztása	10
4. Szemrevételezéses vizsgálat	12
5. Festékpenetrációs vizsgálat	14
5.1. A vizsgálat elve, fizikai alapjai	14
5.2. A vizsgálat korlátai, megbízhatósága, reprodukálhatósága	14
6. Ultrahangos vizsgálat	17
6.1. A vizsgálat elve, fizikai alapjai	17
6.2. A vizsgálat korlátai, megbízhatósága, reprodukálhatósága	17
7. Röntgen vizsgálat	20
7.1. A vizsgálat elve, fizikai alapjai	20
7.2. A vizsgálat korlátai, megbízhatósága, reprodukálhatósága	21
8. Mágneses repedésvizsgálat	24
8.1. A vizsgálat elve, fizikai alapjai	24
8.2. A vizsgálat korlátai, megbízhatósága, reprodukálhatósága	24
9. Festékpenetrációs vizsgálat	27
9.1. A vizsgálat elve, fizikai alapjai	27
9.2. A vizsgálat korlátai, megbízhatósága, reprodukálhatósága	28
10. A roncsolásmentes vizsgálatok megbízhatósága és reprodukálhatósága	30
10.1. Bevezetés	30
10.2. Statisztikai módszer	31
10.3. Heurisztikus módszer	33
10.4. A <i>Detection Performance</i> módszer	35
11. A PISC program eredményei	40
11.1. Bevezetés	40
11.2. A PISC program általános jellemzése	40
11.3. A PISC I eredményei	41
11.4. A PISC II eredményei	41
11.5. A PISC III eredményei	45
12. Miért a felületei hibák vizsgálata a fontosabb?	51
12.1. Bevezetés	51
12.2. A hibák veszélyességének megítélése	51
12.3. Tanfolyamok tematikai megoszlása az angol Hegesztési Intézetben (TWI)	
1996 évben	54
12.4. Összefoglalás, következtetések	55
13. Irodalomjegyzék	56

1. BEVEZETÉS

A szerkezetek, gépek üzemeltetése során a károsodásokat legtöbbször a váratlan meghibásodások okozzák. Ilyen meghibásodások lehetnek pl. a kopás, törés, berágódás, stb. A legjelentősebb gazdasági hatású meghibásodás természetesen a törés. Az 1. ábrán 242 káreset okait elemezve látható, hogy a törések legnagyobb hányada (33 %) hegesztett szerkezetekben fordul elő. Ezért a hegesztett kötések vizsgálata rendkívül fontos. Mivel a hegesztett kötéssel általában kész vagy félkész szerkezeteket készítünk el, így a roncsolásmentes vizsgálatok kerülnek előtérbe, hiszen ezzel a szerkezet integritását nem bontjuk meg.



1. ábra

A törések százalékos megoszlása a különböző szerkezeti elemekben

A műszaki gyakorlatban többféle roncsolásmentes vizsgálatot alkalmaznak, azonban a vizsgálati módszer eredményességét sok tényező befolyásolja (anyagminőség, anyagvastagság, vizsgálati helyzet, gazdaságosság, a hiba nagysága, elhelyezkedése, jellege, stb.). A különféle típusú, nagyságú és helyzetű hibák megtalálása, méreteinek meghatározása más-más vizsgálati módszert igényel. Ugyanazon hibát más eljárással megvizsgálva, a kapott vizsgálati eredmény eltérő is lehet. Éppen ezen indokok miatt fontos, hogy a vizsgálatot végző és/vagy kiértékelő személy(ek) tudatában legyenek a vizsgálati módszerek lehetőségeivel, korlátaival és megbízhatóságával.

Ezen anyag e területen elért legutóbbi eredményeket kívánja röviden összefoglalni oly módon, hogy minden esetben áttekintést ad az adott roncsolásmentes vizsgálat fizikai háttéréről, alkalmazási területeiről, korlátiról. Tekintettel arra, hogy a vizsgálat sohasem öncél, hanem a vizsgált szerkezeti elem további felhasználhatóságának egyik alappillére, a vizsgálati módszerek kapcsán külön ki kell térni az eredmények reprodukálhatóságára és megbízhatóságára. Ezek számszerű ismeretében, a törésmechanikai elvek felhasználásával, megnyílik annak közvetlen lehetősége, hogy vizsgált szerkezeti elem megbízhatóságát számszerűen is jellemezhesük.

2. A roncsolásmentes vizsgálatok kialakulásának és fejlődésének rövid története

A vasúti közlekedés megindulásával (1825. szeptember 27.¹) és a rendszeres használatra átadott vonalak rohamos bővülésével az anyagtudomány (akkor még többnyire csak a vas és acél „tudománya”) fejlődése is „meglódult”, ill. ezen keresztül az anyagok minőségéhez, tulajdonságának megítéléséhez kapcsolódó anyagvizsgálati módszerek is igen gyorsan fejlődtek². Ha meggondoljuk, hogy a vasúti közlekedés megindulásától kezdődően évente átlagosan több mint 10.000 km új vasútvonalat (Budapest-Johannesburg távolság!) adtak át, akkor minden nehézség nélkül megérthetjük a mérnöki tudományok fejlődésének területeit és ütemét. Az anyagvizsgálat területét kiragadva természetesen előbb a roncsolásos vizsgálatok, majd később a roncsolásmentes vizsgálatok kialakulása, fejlődése indult meg. Ez utóbbi Wilhelm Conrad Röntgen-nek a würtzburgi egyetem tanárának (2. ábra) köszönhető, aki kezéről is elkészítette az azóta már igen híressé vált felvételt (3. ábra).



2. ábra.

Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923)



3. ábra

Röntgen kezéről készült felvétel

A radiológiai vizsgálat alkalmazási területeinek bővüléséről az újabb technikai megoldások bevezetéséről igyekszik áttekintő képet adni a következő táblázat. Ebből látható, hogy az első

¹ M. HEAVISIDES: The History of the First Public Railway (Stockton & Darlington). The Opening Day, and what followed. Stockton-on-Tees: Printed and Published by Heavisides & Son. 1912.

² Tóth L., P. Rossmanith: A törésmechanika és az anyagvizsgálat története. TEMPUS kiadvány. 1999. 163. p.

időkben alapvetően az emberi szervezet (csontok) megfigyelésére használták a röntgen sugár nyújtotta lehetőségeket, de az igen hamar bevonult a legkülönbözőbb szakmai területekre.

Radiológiai vizsgálatok rövid története.

Év	Esemény	Személy
1895	A röntgensugárzás (X-sugárzás) felfedezése (november 8), Felvétel Röntgen kezéről	W. C. Röntgen
1896	Felvétel Lord Kelvin kezéről (Május, gyűrű a kisujjon)	Lord Kelvin
1896	Postai csomagok ellenőrzése	
1896	Demonstráció New Yorkban a Nemzeti Elektrotechnikai Kiállításon (március)	Edison, C.M. Dally
1896	Felvétel egy kameleonról (február, Bécs)	
1896	Felvétel a legkülönbözőbb anyagokról (acél, élőlények, pisztoly, stb.)	
1904	Első halál a radiológiai sugárzás következtében	C.M. Dally
1913	Nagyvákuumú röntgenső elkészítése (100 kV-os cső)	Coolidge
1922	Felvételek gyűjteménye (szerkezetek, fából készült repülő, belső hibák)	
1931	A hegesztett kötések szabványosított vizsgálata (Amerikában és Angliában)	
1931	Az első 1000 kV-os röntgenső előállítása (General Electric)	
1938	Radiográfiai felvétel készítése gyorsan mozgó tárgyakról, objektumokról (Németország, USA, 1940-ben Hollandia, 1941-ben Anglia)	
1940	Betatron előállítása (MeV nagyságrendű gyorsító feszültség)	
1960-as éve	15 MeV-os hordozható sugárforrások 30 cm vastagságú acél hegesztett kötésének vizsgálatára	
Izotóp vizsgálatok		
1895	Az uránium természetes sugárzásának (γ -sugárzás) felfedezése	H. Becquerel
1900	A γ -sugárzás áthatol 25 cm vastagságú ólom lemezen	Villard
1903	A γ -sugárzás alkalmazása fémek vizsgálatára	Pilon és Laborde



4.a. ábra. Az emberi testről készült első röntgen felvétel

4.b. ábra. Lord Kelvin kezéről készült röntgenkép, amelyen aláírása is látható



A röntgen sugárzás felfedezését követően az ultrahang gyakorlati felhasználásának irányába fordult a roncsolásmentes vizsgálat. E folyamatot kétségtelenül jelentős mértékben felgyorsította a TITANIC katasztrófája (1912. április 14.).

Ultrahang vizsgálatok rövid története.

Év	Esemény	Személy
1912	Vízben úszó tárgy visszhang elven való detektálása vonatkozó szabadalom közvetlenül a TITANIC katasztrófája után	Richardson
1914	Jéghegy észlelése 3 km-es távolságból 100 Hz frekvenciájú sugárzás visszaverődésével	Fessenden
1918	Piezoelektromos hatás felhasználása hullámok gerjesztésére (kvarc kristály acéllapok között)	Lavengin
1918	Tengeralattjáró észlelése 1,5 km távolságból visszhangjel alapján	Lavengin
1921	Tenger mélységének mérése ultrahangos rezonancia módszerrel (szabadalom)	A. Behun
1928	Magnetostriktív készülék kifejlesztése az ultrahang oszcillátorhoz	G. W. Pierce
1929	Ultrahang alkalmazása fémekben levő hibák detektálására	S. J. Sokolov
1931	Transzmissziós hullám alkalmazása a hibák detektálására két fej (adó és vevő) alkalmazásával	O. Muhlhauser
1933	Muhlhauser szabadalma Németországban	O. Muhlhauser
1939	Sokolov szabadalma az Amerikai Egyesült Államokban (első kereskedelmi készülék, az Ultrasonel forgalmazása)	S. J. Sokolov
1940	Folyamatos vizsgálat feltételeinek megteremtése	Schraiber
1940	Pulzáló ultrahang nyaláb előállítás (USA szabadalom 1940 és 1942)	F.A. Firestone
1945	Vastagságmérés ultrahanggal	Erwin
1959	Hibaméret meghatározása ultrahangos vizsgálat	J. Krautkramer

A mágneses vizsgálatok kialakulását és fejlődését nagymértékben siette a vasúti közlekedés bővülése. Erről ad időbeli rövid áttekintést az alábbi táblázat.

Mágneses repedésvizsgálat rövid története

Év	Esemény	Személy
1868	Mágneses massa alkalmazása a lövedéket felfogó vasból készült lemez felületi hibáinak vizsgálatára	Saxby
1879	A sínek felületi hibáinak vizsgálatára alkalmas eljárás szabadalmaztatása USA-ban	Herring
1911	Szabvány az acélok mágneses repedésvizsgálatáról (USA)	National Bureau of Standards
1917	Mágnesporos eljárás alkalmazása az USA-ban	Hoke
1928	Ferromagneses anyagok széleskörű vizsgálata a hossz- és keresztirányú repedések kimutathatóságára	A. V. de Forest
1934	A Magnoflux Corporation alapítása a mágneses vizsgálati eljárások eszközeinek terjesztésére	A.V. Forest, Doane
1935	A szuszpenziós eljárás bevezetése (szuszpenzió = sötét mágneses oxid pora kerozinban feloldva)	A.V. Forest, Doane
1936	Szuszenziós eljárás nedves helyen való alkalmazásának német szabadalma	Unger, Hilpert
1936	A mágneses repedésvizsgálatok periodikus végzésére vonatkozó előírás az indianapolisi autópályák felügyeleténél	

Noha az egyik legegyszerűbb vizsgálati módszer a folyadékbehatolós eljárás, mégis az első – vasúti közlekedéshez, a mozdonyok vizsgálatához kapcsolódó – alkalmazást követően mintegy teljes évszázadot kellett várni a széleskörű felhasználásra. Ez nyilvánvalóan a megfelelő anyagok előállításának, a kémiai technológiák fejlődésének következménye. A vizsgálat terjedésének főbb mérföldköveit foglalja össze az alábbi táblázat.

Folyadékbehatolós vizsgálat rövid története

<i>Év</i>	<i>Esemény</i>	<i>Személy</i>
1800 előtt	blackmósmiths	
~1850	Mozdony alkatrészek vizsgálata kerozinban hígított olajba mártással majd a felületre alkoholban oldott kréta por felvitelével	
~1940	Lakk felvitele a felületre, majd száradás után rezgetéssel (pl. kalapáccsal gyengén ütögetve) a lakkfelület töredezésének előidézése (a repedésszerű hibák környezetében töredezik meg a legkisebb külső terhelésre)	
~1940	A Magnoflux cég a legkülönbözőbb penetrációs anyagokat állítja elő, többek között a ma is használatos piros színű behatoló anyagot	
1942	Fluoreszkáló anyag bekeverése a behatoló anyagba (Magnoflux cég) és ultraibolya fénnel történő vizsgálat bevezetése	

Napjainkban egyik leggyorsabban fejlődő roncsolásmentes vizsgálati módszere az örvényáramos technikát használja. Ennek kialakulásáról és fejlődésének, ipari alkalmazásának elterjedéséről ad rövid áttekintést az alábbi táblázat.

Örvényáramos vizsgálat rövid története

<i>Év</i>	<i>Esemény</i>	<i>Személy</i>
1819	Annak megfigyelése, hogy a vezetékben folyó áram erőssége megváltozik mágnes hatására	H. C. Oersted
1823	Elektromágnes készítése	W. Sturgeon
1824	Váltakozó mágneses mező demonstrálása	Gamby
1830	Az örvényáram létének demonstrálása	J.B. Foucault
1832	Az elektromágneses indukció törvényének megfogalmazása	M. Faraday
1879	Elektromos impulzusok bevezetése egy mikrofon tekercsből a fémbe roncsolásmentes vizsgálat céljából	D. E. Hughes
1920	Falvastagság mérése örvényárammal	F. Krantz
1925	Acélcövek vizsgálata ipari méretekben	C. Farrov
1948	Örvényáramos készülékek előállítása ipari méretekben (Reutlingen Intézet, Németország)	
1949	Örvényáramos technika alkalmazása a geológiában	H.G. Doll
1954	A Förster diagram bevezetése a	F. Förster

3. Vizsgálati módszerek kiválasztása

A roncsolásmentes vizsgálatok célja az anyagban, alkatrészben annak előállítása során esetlegesen keletkezett hibák (általában folytonossági) megtalálása, méreteinek meghatározása. Ezek ismeretében a tervezett üzemeltetési paraméterek figyelembevételével ugyanis elvileg adott annak lehetősége, hogy a feltárt hiba hatásáról dönteni lehessen. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy lehetőség van a hibával való üzemeltethetőség mérlegelésére, ill. dönteni lehet abban, hogy a

3.1 Táblázat. A folytonossági hiányok kimutatására használt eljárások összehasonlítása

Jellemző paraméter	Vizsgálati módszer				
	Folyadékpenetrációs	Ultrahangos	Röntgen	Mágneses	Örvényáram
Alap költség	alacsony	közepes, magas	magas	közepes	közepes
Használati költség	közepes	nagyon alacsony	magas	közepes	alacsony
Eredmény	rövid várakozás	azonnal	később	rövid várakozás	azonnal
Geometria hatása	nem lényeges	lényeges	lényeges	nem lényeges	lényeges
Hozzáférési gondok	lényeges	lényeges	lényeges	lényeges	lényeges
Hibatípusok	felületi repedés	belső	mind	külső	külső
Relatív érzékenység	alacsony	magas	közepes	alacsony	magas
Hivatalos jelentés	nem szokványos	drága	szabványos	nem szokványos	drága
Kezelő képzettsége	alacsony	magas	magas	alacsony	közepes
Kezelő betanítása	-	fontos	fontos	fontos	fontos
Betanítás költsége	alacsony	magas	magas	alacsony	közepes
Berendezés hordozhatósága	magas	magas	alacsony	magas, közepes	magas, közepes
Anyagtól való függés	gyenge	erős	meglehetősen nagy	csak mágneses	erős
Automatizálhatóság	gyenge	jó	rossz	gyenge	jó

javítást meg kell-e tenni, avagy sem. A javítás melletti döntés meghozatalánál messzemenően figyelembe kell venni a javítási technológia okozta járulékos hatásokat is (pl. hegesztés esetén a maradó feszültségek újabb átrendeződését, stb.).

Az természetes, hogy számos roncsolásmentes vizsgálati eljárást dolgoztak ki és alkalmaznak a gyakorlatban. Ezek mindegyikének megvan a maga előnye és hátránya, alkalmazási területei és korlátja. Ezek ismerete nélkül az adott alkatrész ellenőrzéséhez nem lehet megalapozottan módszert kiválasztani. A könnyebb tájékozódás érdekében a folytonossági hiányok kimutatására leggyakrabban használt eljárások főbb jellemzői áttekintését, főbb jellemzőit az 3.1. táblázat foglalja össze.

Tekintettel arra, hogy a legegyszerűbb eljárás az ősidők óta alkalmazott szemrevételezéses ellenőrzés, ennek sajátosságaira külön e részben térünk ki. Tesszük ezt azért is, mert mint a későbbiekben a törésmechanikai megfontolások kapcsán látni fogjuk a felületi hibák a legveszélyesebbek így ezek kimutatására minden esetben különös gondot kell fordítani (lásd a „Miért a felületi hibák a legveszélyesebbek” c. fejezetet.).

4. Szemrevételezéses vizsgálat

Ezen vizsgálat a felületi hibák kimutatására alkalmas legegyszerűbb vizsgálati módszer. A szemrevételezéses vizsgálatot általában valamely más vizsgálat kiegészítőjeként szokták alkalmazni, hiszen az emberi szem felbontóképessége és érzékenysége nagymértékben különbözik az egyéb vizsgálati módszerekétől és a gépi, automatikus észlelésekkel összevetve meglehetősen nagy a szubjektív hatás. Ennek ellenére azt mondhatjuk, hogy a két különböző típusú vizsgálat egymást jól kiegészíti.

Az emberi szem és a gépi vizsgálatok közötti különbségek a 4.1. és a 4.2. táblázatokban láthatók.

4.1. Táblázat. A gépi és emberi észlelés összehasonlítása

<i>Jellemző paraméter</i>	Gépi észlelés	Emberi észlelés
<i>Távolság</i>	korlátolt képesség	jó minőségű észlelés
<i>Orientáció</i>	2 dimenzióban megfelelő	jó minőségű észlelés
<i>Mozgás</i>	korlátolt, érzékeny a képességre	jó minőségű észlelés
<i>Élek, tartományok érzékelése</i>	éles kontrasztú kép szükséges	magasan fejlett
<i>Alakfelismerés</i>	jó mennyiségi elemzésre	csak minőségi észlelésre
<i>Képrendezés</i>	speciális szoftver szükséges; korlátolt lehetőség	magasan fejlett
<i>Felületi árnyékok észlelése</i>	korlátolt, szürkeárnyaltos lehetőség	magasan fejlett
<i>2 dimenziós kiértékelés</i>	jellegzetes alakokra kitűnően alkalmazható	magasan fejlett
<i>3 dimenziós kiértékelés</i>	erősen korlátolt lehetőség	magasan fejlett

A 3.1., 4.1 és 4.2. táblázatokból mind műszaki-, mind pedig gazdasági szempontokat mérlegelve igen hasznos következtetéseket vonhatunk le. Noha a hivatkozott táblázatokban kiemelt karakterisztikus sajátosságok összehasonlítása már önmagában is alkalmas arra, hogy egy adott célra alkalmazandó gépi vagy szemrevételezéses vizsgálat mellett dönthessünk, mégis azt kell mondani, hogy nagyobb számú, azonos alkatrész vizsgálatánál, a megfelelő bizonylatolás, az eredmények későbbi reprodukálhatóságának biztosítása érdekében a szubjektivitástól mentesebb gépi észlelést célszerű választani. Egyedi vizsgálatnál, avagy előzetes tájékozódás esetén mindenképpen hasznosabb a sokszor több részletet feltáró szemrevételezéses vizsgálat alkalmazása. Kétségtelenül igaz, hogy ennek eredménye szubjektív hibák hordozója lehet. Azt azonban ne feledjük, hogy a szemrevételezéses vizsgálatokat általában olyan szakemberek, szakértők végzik, akik tökéletesen tisztában vannak azzal, hogy „milyen típusú hibát, hol és miért”

keresnek, azaz tisztában vannak a gyártástechnológiával, annak sajátosságaival (avagy az üzemeltetés körülményeivel és annak várható hatásaival), következésképpen „látni és képesek, nem csupán nézni”. Ez az a képesség, amely sok gyakorlatot és kellő elméleti felkészültséget követel meg a szakembertől.

4.2. Táblázat: A gépi és emberi észlelés összehasonlítása

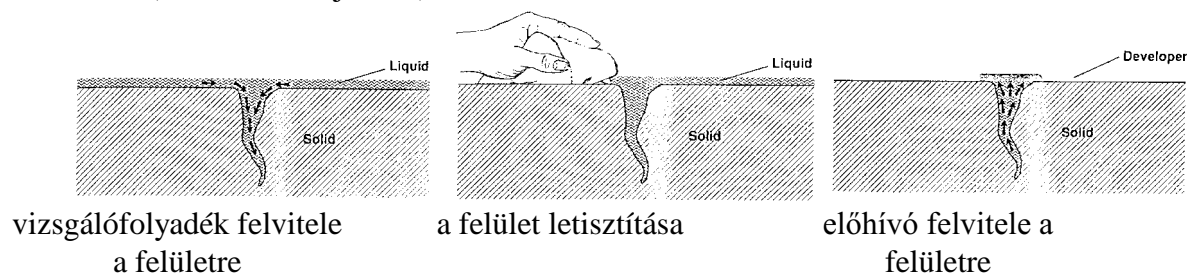
Vizsgált tulajdonság	Gépi észlelés	Emberi észlelés
Felbontóképesség	a pixel ¹ mérete korlátozza	magas felbontóképesség
Feldolgozási sebesség	a másodperc tört része képenként	valós idejű feldolgozás
Elkülönítőképesség	magas kontrasztú képekre korlátozott	nagyon érzékeny
Pontosság	menyiségi elkülönítés esetén pontos; nagyobb számú vizsgálatnál a pontosság állandó értékű marad	minőségi elkülönítés esetén pontos; nagyobb számú vizsgálatnál a pontosság csökken
Működési költség	alacsony számú vizsgálatnál magas, nagy számú vizsgálatkor olcsóbb mint a szemrevételezéses vizsgálat	alacsony számú vizsgálatnál olcsóbb mint a gépi vizsgálat
Általánosan	nagyszámú vizsgálatnál előnyös	alacsony számú vizsgálatnál előnyös

¹ pixel = képpont (*angol* : **P**icture **E**lementary)

5. Festékpenetrációs vizsgálat

5.1. A vizsgálat elve, fizikai alapjai

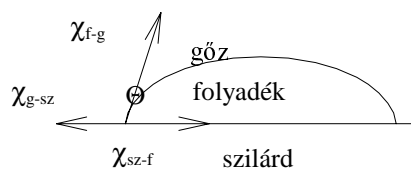
A vizsgálat során a vizsgálandó felületet meg kell tisztítani, majd vagy egy szabad szemmel jól látható színű (általában piros) vagy ultraibolya fényben fluoreszkáló festékkel be kell fújni, bizonyos idő eltelte után, - ami ahhoz szükséges, hogy a festék a felületi repedésekbe behatoljon - a festéket a felületről el kell távolítani. Ezután a felületre fel kell vinni az előhívó réteget, ami célszerűen olyan színű, hogy a repedésekbe behatolt festék visszaszivárogva jól látható legyen rajta. A repedésekben megmaradt és onnan visszaszivárgott festék az előhívó rétegen észlelhető és így a repedések helye meghatározható (lásd. az 5.1. ábrát). Az eljárás hátránya, hogy csak bizonyos méreten felüli felületi repedések kimutatására alkalmas. A felismerendő méretnek a kapillaritás szab határt (lásd az 5.2. fejezetet).



5.1. ábra. A folyadékpenetrációs vizsgálat menete [7]
(liquid = vizsgálófolyadék, solid = vizsgálandó darab, developer = előhívó)

5.2. A vizsgálat korlátai, megbízhatósága, reprodukálhatósága

A vizsgálat csak olyan folyadékkal végezhető, ami a vizsgált felületet nedvesíti. A folyadék akkor nedvesíti a felületet, ha az érintkezési szög (Θ) 90° -nál kisebb (5.2. ábra).



5.2 ábra. Az illeszkedési szög és a felületi feszültségek

A folyadék a repedésbe az alábbi (1) kifejezésnek megfelelő mélységbe hatol be.

$$h = \frac{2 \cdot \chi_{f-g} \cdot \cos \Theta}{r \cdot g \cdot \rho} \quad (1)$$

ahol χ_{f-g} : a folyadék és gőz közötti felületi feszültség [N], Θ : illeszkedési szög, r : a repedés jellemző sugara [m], g : a nehézségi gyorsulás [$9,81 \text{ m/s}^2$], ρ : a folyadék sűrűsége [kg/m^3].

Az (1) kifejezésből az is látható tehát, hogy 90° -nál nagyobb érintkezési szög, negatív magasságot eredményezne, melynek fizikai tartalma az, hogy a folyadék a repedésbe nem hatol be. Továbbá az is látható, hogy a repedés méretének csökkenésével a behatolási mélység (vagy magasság) nő, valamint, hogy a behatolás mélysége nem függ a viszkozitástól. A viszkozitást azonban mégsem hagyhatjuk figyelmen kívül, hiszen a behatolás ideje igenis függ tőle, emiatt a vizsgálat során elegendő időt kell a behatolásra biztosítani.

A porózus felületű munkadarabok ezen eljárással nem vizsgálhatók, mert a pórusok hibaként jelennek meg a vizsgálat során.

A kimutatható legkisebb repedés körülbelül $5 \mu\text{m}$ szélességű és $10 \mu\text{m}$ mélységű [7]. Ezen minimális érték a különböző feltételektől függően szórást mutathat.

Az érzékenységet meghatározó tényezők a következők:

- a nedvesítés mértéke: minél nagyobb, annál érzékenyebb a vizsgálat (Θ),
- a repedés geometriája: úgymint a hossza, szélessége, mélysége, ezek egymáshoz képesti aránya, alakja (r),
- a felületi tisztaság: a felszínen jelenlévő szennyezők a felületi feszültségen keresztül vannak hatással a vizsgálat érzékenységére (χ_{f-g}), valamint a felületen lévő szennyeződés hamis hibajelzést is eredményezhet,
- a vizsgálatra rendelkezésre álló idő,
- a vizsgálatot végző személy(ek) képzettsége, felkészültsége,
- a vizsgáló folyadék és előhívó megfelelő minősége (ρ),
- a kiértékelés során a megvilágítás mértéke; szabad szemmel is látható színnel való vizsgálatkor a megvilágítás intenzitásának 150W -nak kell lennie 100 mm távolságban a fényforrástól, míg fluoreszcens vizsgálóanyagnál a fluoreszcens fény intenzitásának minimum 100W -nak 380 mm -re a fényforrástól, a háttérvilágításnak pedig maximum 20 lux -nak. (Összehasonlításképpen: könyvolvasáshoz kb. 30 lux szükséges.)

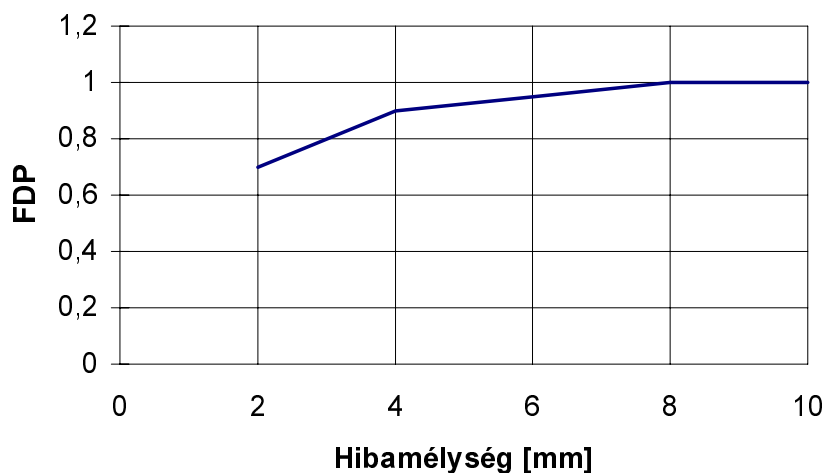
5.1. Táblázat: Folyadékpenetrációs vizsgálatok összehasonlítása

Kutatócsoport, [Referencia]	A vizsgálat tárgya	Észlelési valószínűség, [%]	Legkisebb észlelt repedésméret [μm]
Walters & McMaster [11]	Üveg lapok	NA*	0,13-0,33
McCauley & Van Winkle [12]	Cr bevonatos sárgaréz	60	0,5
Fricker [12,13]	Krómbevonatos acél	NA*	25
Lord & Hollaway [12,14]	Ti-Al-V ötvözet	65-80	5
Packman & tsai. [12]	Al, acélötvözet	90	NA*
Betz [11]	Cr bevonatos Ni lemez	NA*	NA*

*NA = nincs adat

Különböző kutatók által elvégzett vizsgálatok alapján [11,12,13,14] az észlelhető legkisebb repedésméretet és a felismerési valószínűséget az 5.2. táblázat foglalja össze.

A Nordtest* és ICONÉ* projektek által folyadékpenetrációs eljárással vizsgált alkatrészek esetében a hiba-felismerési valószínűséget az 5.3. ábra szemlélteti [18].



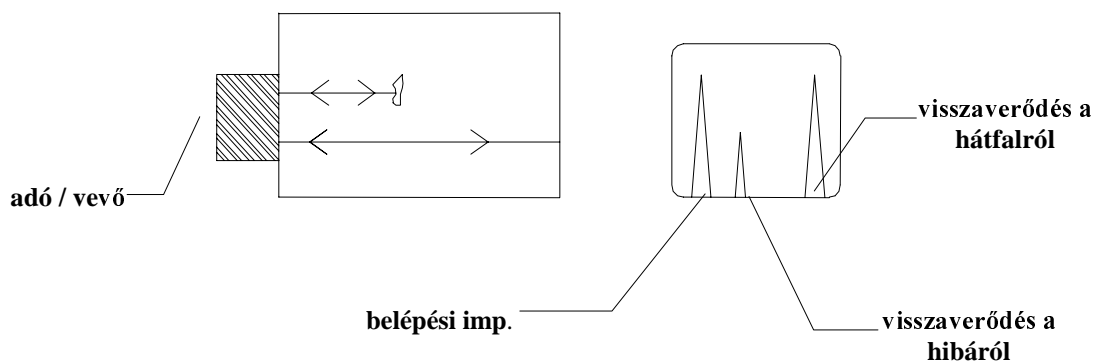
5.3. ábra. Hiba-felismerési valószínűség folyadékpenetrációs eljárásnál
(*FDP = Flaw Detection Probability (hiba-felismerési valószínűség)*)

* Mindkettő Európai Közösség által koordinált vizsgálati projekt

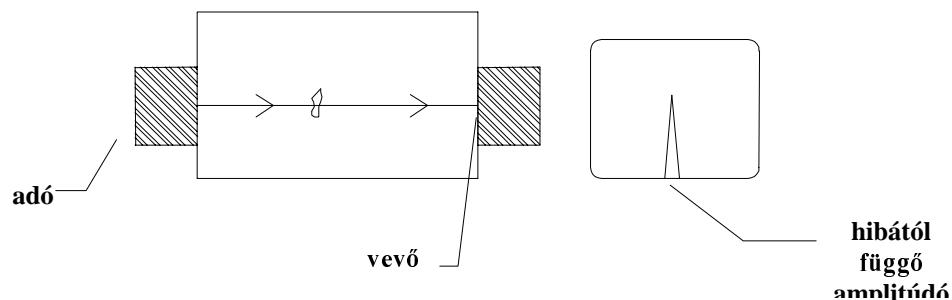
6. Ultrahangos vizsgálat

6.1. A vizsgálat elve, fizikai alapjai

Ultrahangos vizsgálat során az ultrahang ($\nu > 20000$ Hz) azon tulajdonságát használjuk fel mérésre, hogy különböző közegekben különböző sebességgel halad és a különböző akusztikai sűrűségű anyag határához érve elhajlik, ill. visszaverődik. Ilyen eltérő akusztikai sűrűségű anyag lehet pl. a varratban lévő repedés, gázzárvány vagy salakzárvány. Ha tehát a vizsgált darabban nincs anyagfolytonossági hiány, akkor a darab határfelületéről verődik vissza az ultrahang, ha pedig a darabban anyagfolytonossági hiány van, akkor onnan (is). A vizsgálatnak két fő változata van, az impulzus-visszaverődéses (6.1 ábra) és az átbocsátásos (6.2. ábra) vizsgálat [5, 6]. (A két ábrán lévő képernyőkön az amplitúdó az idő függvényében van ábrázolva.)



6.1.ábra. Impulzus-visszaverődéses ultrahangvizsgálat



6.2.ábra. Átbocsátásos ultrahangvizsgálat

6.2. A vizsgálat korlátai, megbízhatósága, reprodukálhatósága

A kijelzőn látható visszaverődési jel és a hiba nagysága között nincs egyértelmű összefüggés. A jel amplitúdója sok tényezőtől függ [4]. Ezen tényezők: mikroszerkezet, szemcseméret, a hiba

távolsága a felszíntől, a hiba alakja, a hiba elhelyezkedése (orientációja), az impedanciák különbsége, a hullámforma, stb. Ezek szerepe a következőkben foglalhatók össze.

- **Szemcseméret:** az öntvények durvaszemcsés szerkezetük miatt nehezen vizsgálhatók ultrahangos vizsgálattal, ugyanis a nagy szemcsék nagy háttérzajt okoznak. A másik gond abból adódik, hogy az öntvények általában bonyolult alakúak, így a vizsgálófej elhelyezése a felületen szintén bonyolult.
- **Hullámforma:** a transzverzális hullám folyadékokban, gázokban és néhány típusú műanyagban nem terjed; továbbá a transzverzális hullám hullámhossza csak kb. fele a longitudinális hulláménak, így kisebb hibaméret detektálható ilyen módon.
- **A hiba orientációja:** a hiba annál nagyobb valószínűséggel található meg, minél nagyobb a merőleges kiterjedése a vizsgáló hullámokra.
- **A hiba alakja:** hasonlóan az előző ponthoz, minél nagyobb a hiba mérete, annál nagyobb valószínűséggel mutatható ki.

Mindezekon kívül az is előfordulhat, hogy **hamis hibajelet** kapunk, azaz a berendezés hibát jelez ott, ahol nincs.

Ennek is több oka lehet:

- az elektromos részek hibás elrendezése miatti interferencia,
- törött adófej, ami a kiadott jelet megzavarja,
- a csatolóközegben lévő légbuborék miatt,
- különböző élekről visszavert hullámok miatt, azaz a vizsgált darab alakjától is függ,
- a szemcsehatárok miatt,
- hullámforma változás miatt (transzverzálisból longitudinális, *vice versa*),
- hegesztett kötéseknel a koronáról a gyökről valamint a hőhatásövezet határáról visszaverődött hullámok.

A vizsgálat során használt csatolóközeg minőségének ki kell elégíteni a következő követelményeket:

- nedvesítse mind a vizsgálófejet mind a vizsgált felületet,
- megakadályozza a levegő bekerülését a vizsgálófej és a vizsgált felület közé,
- szabad mozgást engedélyezzen a vizsgálófejnek,
- töltsön ki minden egyenetlenséget, hogy sima felszín álljon rendelkezésre a vizsgálat során,
- legyen könnyen használható, eltávolítható és ne károsítsa a felületeket,
- a réteg a lehető legvékonyabb legyen, hogy ne befolyásolja az ultrahang terjedési irányát.

Az ultrahangos vizsgálat megbízhatósága (csakúgy mint más eljárásoké) a digitális technológia fejlődésével egyre növekszik. A vizsgálat eredménye függ a vizsgálatot végző személytől, aki

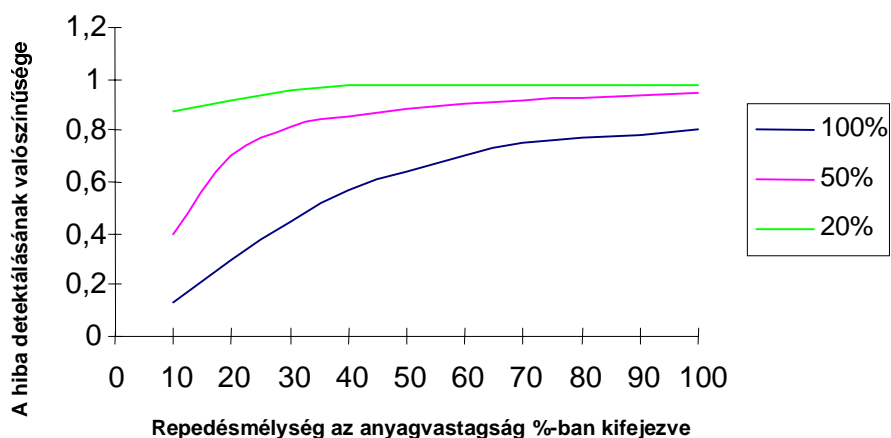
esetenként több órán keresztül figyeli a készülék viszonylag kis méretű kijelzőjét. Ezen ok miatt a vizsgálat pontosságát és megbízhatóságát új technológiákkal próbálták (és próbálják) javítani. A fejlesztés jelenlegi állapotában a mikroprocesszoros készülékek kerülnek előtérbe. Ezek előnyei az analóg készülékekkel szemben:

- tárolni képes a kalibrációs adatokat,
- a kalibrálás reprodukálható,
- digitális méréstechnika,
- lineáris kijelzők,
- önHITELESÍTŐ lineáris erősítő,
- a vizsgálati eredmények tárolhatók (archiválás) és a későbbiek során feldolgozhatók,
- valamint kinyomtathatók (dokumentálás).

A digitális technika ilyen magas fejlettségi szintje mellett már valós idejű adatfeldolgozás van, tehát a vizsgálatot végző személy semmilyen késedelmet nem észlel.

A készülékek képesek továbbá arra is, hogy a hitelesítési adatokat is eltárolják, így biztosítva van a reprodukálhatóság, ugyanis minden vizsgálatot végző személy ugyanazon beállítással tudja a vizsgálatot elvégezni. A beállítások és a mérési adatok a feldolgozó számítógépen keresztül más számítógépekre átvihetők (telefon, modem, vagy Internet segítségével). A mérést végző személy adatainak és a mérés dátumának tárolásával a felelősség is behatárolható [16].

A **DAC**¹ görbe az azonos visszaverődő felületről, különböző mélységből visszavert sugarak amplitúdójának és a mélységnek a kapcsolatát fejezi ki. A DAC mértékének a hatása a detektálás valószínűségére az 6.3. ábrán látható [20].



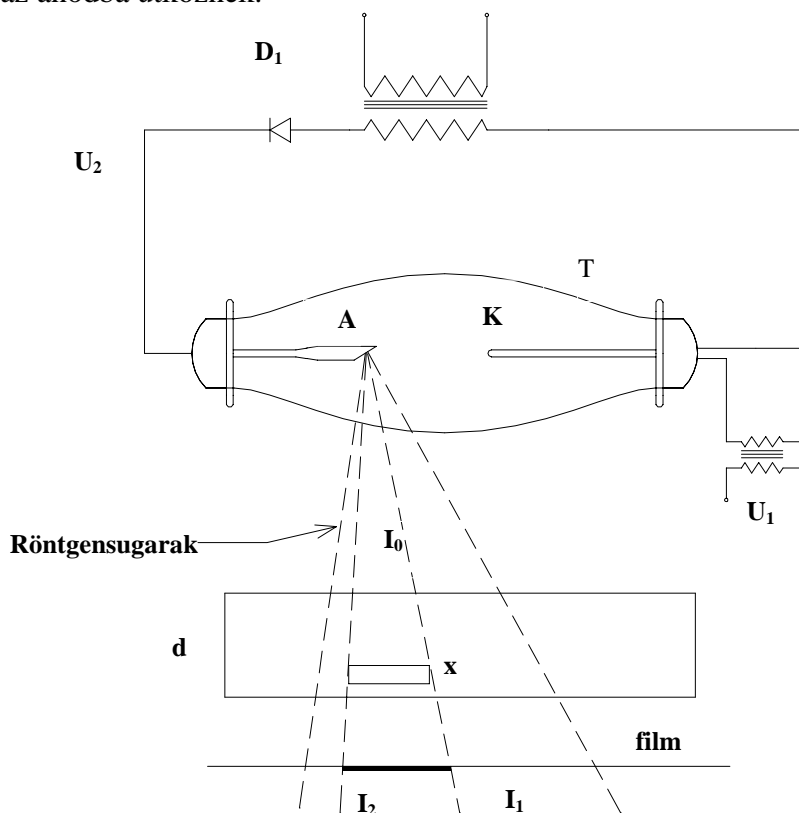
6.3. ábra.
Hibakimutathatósági
valószínűség ultrahangos
vizsgálatnál a DAC
mértékének
figyelembevételével

¹ DAC = Distance Amplitude Correction (távolság-amplitúdó korrekció)

7. Röntgen vizsgálat

7.1. A vizsgálat elve, fizikai alapjai

A röntgenvizsgálat elvét az 7.1.ábra mutatja. A **T** jelű légritkított üvegcsőbe két elektróda van beforrasztva, melyekre nagy feszültségű egyenáramot (U_2) kapcsolnak, a negatív feszültségű a katód (**K**), a pozitív feszültségű az anód (**A**). A kisnyomású térben az U_1 fűtőfeszültség hatására az izzó katódból elektronok lépnek ki melyek az U_2 feszültség hatására felgyorsulnak és nagy sebességgel az anódra ütköznek.



7.1.ábra. A röntgen vizsgálat elvi vázlata

A mozgási energia nagy részben hővé alakul (>99%), a fennmaradó részből pedig röntgensugárzás keletkezik. A kilépő elektronok sebességét az Einstein-egyenlet (2) segítségével határozhatjuk meg, azaz:

$$e \cdot U_2 = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (2)$$

ahol e az elektron töltése ($e = -1,6021917 \cdot 10^{-19}$ C), m az elektron nyugalmi tömege ($m = 9,109558 \cdot 10^{-31}$ kg), v a kilépő elektron sebessége, U_2 a csőfeszültség. A (2) összefüggés szerint tehát a kilépő elektronok mozgási energiája a csőfeszültséggel (U_2) egyenesen arányos.

A csőből kilépő röntgensugárzás hullámhosszát a következő egyenlet adja meg:

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{c \cdot h}{\lambda} \quad (3)$$

ahol **c**: a fénysebesség ($c = 2997925 \text{ m/s}$), **λ** : a sugárzás hullámhossza, **h**: a Planck állandó ($h = 6,616196 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$).

A (2) és (3) összefüggés alapján a kilépő sugárzás hullámhossza:

$$\lambda = \frac{c \cdot h}{e \cdot U_2} \quad (4)$$

Anyagvizsgálati célokra a röntgensugárzást azon tulajdonsága miatt lehet felhasználni, hogy valamely tárgyon való áthaladásakor a sugárzás intenzitása csökken. Ha tehát a csőből kilépő sugárzás **I_0** , akkor a **d** vastagságú tárgyon áthaladva **I_1** intenzitásúra csökken, az (5) kifejezésnek megfelelően.

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d} \quad (5)$$

ahol **μ** : a gyengülési együttható, **d**: pedig a vizsgált tárgy vastagsága.

A vizsgálat során az **I_0** kezdeti intenzitású röntgensugarak egy része a tárgyon áthaladva **I_1** intenzitásúra, míg azok a sugarak melyek az **x** vastagsági mérettel jellemzett hibás részen haladnak át **I_2** intenzitásúra csökkennek. A tárgy ellentétes oldalán elhelyezett filmen tehát a nagyobb intenzitású (**I_2**) sugárzás erősebb feketedést hoz létre, mint a kisebb intenzitású, így a film elszíneződéséből a hibás részek helye és vastagsági mérete meghatározható. A röntgensugarak többféle eljárással is kimutathatók (Geiger - Müller számlálóval, ionizációs kamrával, szcintillációs számlálóval, arányos számlálóval, kalorimetriával, hőlumineszcenciás eljárással, félvezetős érzékelőkkel, röntgen-fényérzékeny filmmel, stb.). Roncsolásmentes vizsgálatoknál azonban majdnem kivétel nélkül a fényérzékeny filmes eljárást használják. Ezen eljárással a vizsgálat dokumentációja maga az előhívott film. A fényérzékeny réteg a fényképezésnél is használatos filmekével azonos, ezüst-halogenid (többnyire AgBr).

7.2. A vizsgálat korlátai, megbízhatósága, reprodukálhatósága

A vizsgálat folyamán elkészített felvétel a vizsgált tárgy egy adott irányú vetülete, ezért a hibának is csak egy vetületi képét láthatjuk. A hiba méretének pontos meghatározásához több irányból kell felvételt készíteni. A felvétel minősége jelentősen meghatározza a vizsgálati pontosságot.

Az elkészített film minőségére befolyással van:

- az anyag minősége,
- az ezüst-halogenid szemcsék nagysága,
- az expozíciós idő,
- a röntgenső feszültsége és a fűtőáram nagysága,

- a film és a sugárforrás egymástól való távolsága,
- a vizsgált tárgy és a film távolsága.

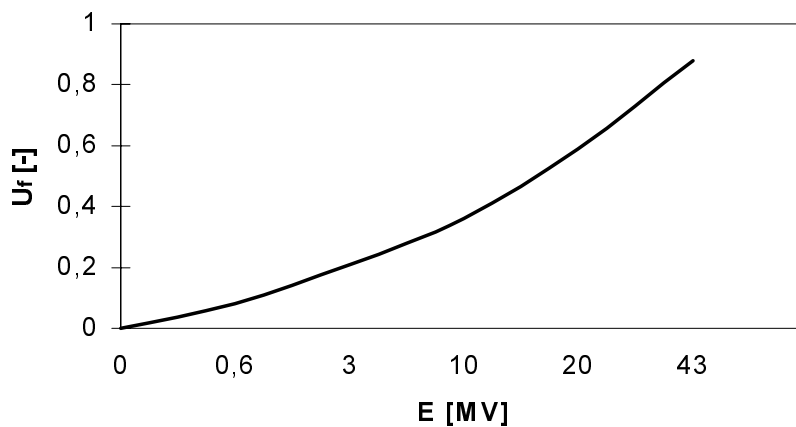
A film teljes életlenségét (U_T) a következő kifejezés segítségével határozhatjuk meg:

$$U_T = \sqrt{\sum_i U_i^2} \quad (6)$$

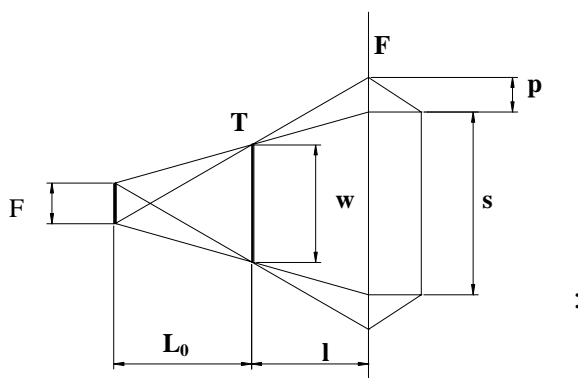
ahol U_i : a különböző életlenséget okozó tényezők, azaz U_g : geometria életlenség, U_m : mozgás miatti életlenség, U_s : erősítőfólia miatti életlenség, U_f : a röntgensugárzás energiájától függő tényező.

Ezen tényezők értékeinek csökkentésével a film élessége (azaz minősége) a következő módon javítható:

- U_g értékének csökkentése úgy lehetséges, ha a sugárforrás és a vizsgált tárgy egymástól való távolságát növeljük, vagy a sugárforrás szélességi méretét csökkentjük (7.3. ábra),
- U_m csökkentése úgy lehetséges, ha a vizsgálatot álló darabon végezzük (amennyiben ez lehetséges),
- U_s akkor lesz minimális, ha nem használunk erősítőfóliát,
- U_f pedig a röntgensugárzás energiájának csökkenésével együtt csökken (7.2. ábra).



7.2 ábra. A röntgensugárzás energiájának a kép életlenségére gyakorolt hatása [7]



7.3. ábra. A legkisebb észlelhető hiba meghatározása

Elemi geometriai módszerekkel belátható, hogy a nagyítás (M) mértéke

$$M = \frac{l + L_0}{L_0} \quad (7)$$

A félárnnyék nagysága :

$$p = \frac{F \cdot l}{L_0} \quad (8)$$

A teljes árnyék nagysága pedig:

$$S = \frac{(L_0 + l) \cdot w - F \cdot l}{L_0} \quad (9)$$

A legkisebb észlelehető hibaméretet (w') akkor kapjuk, ha a teljes árnyék nagysága 0. Azaz a 9 összefüggésből kifejezván w' -t, a következő összefüggést kapjuk a minimális hibaméretre:

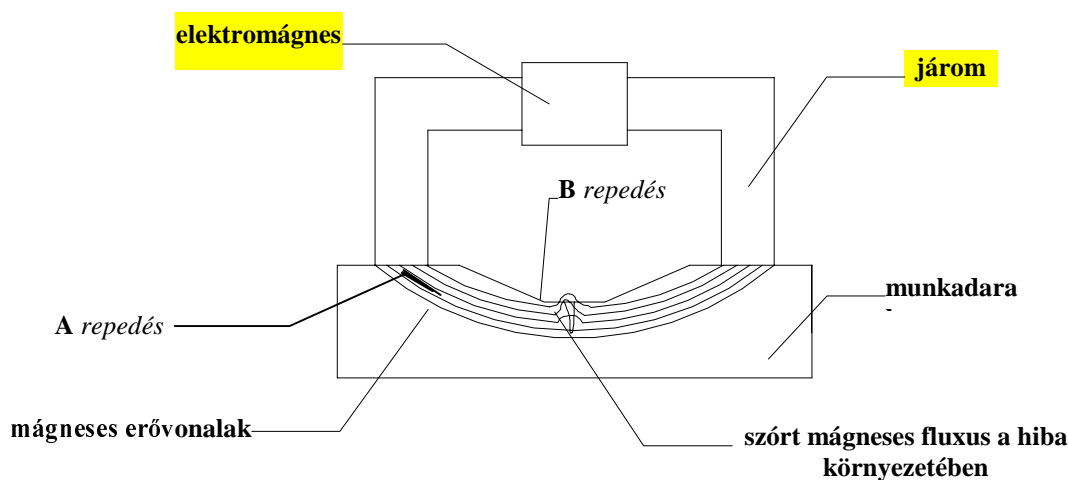
$$w' = \frac{F \cdot l}{(L_0 + l)} \quad (10)$$

Ez pedig, ismert vizsgálati elrendezésnél meghatározható.

8. Mágneses repedésvizsgálat

8.1. A vizsgálat elve, fizikai alapjai

A mágneses erővonalak irányát a vizsgálandó anyagban elhelyezkedő és az anyagtól eltérő mágneses permeabilitású részek eltérítik. Ezen erővonalakat láthatóvá téve (pl. vasreszelékkel) a hiba helye meghatározható. A vizsgálat elvi elrendezése a 8.1. ábrán látható.



8.1. ábra. Mágneses repedésvizsgálat

Vizsgálatot csak ferromágneses anyagon lehet végezni, és csak a Curie-pont alatt. (A Curie-pont az a hőmérséklet, amely felett az anyag elveszíti ferromágneses tulajdonságát. E hőmérséklet az α -vas, az Fe esetében $T_C = 770^\circ\text{C}$).

Az eljárásnak két fő változata a száraz valamint a nedves vizsgálat. A száraz változat az egyszerűbb és a felszín alatti repedéseknél a pontosabb eljárás. A nedves mágneses repedésvizsgálatnál a vas (vagy egyéb ferromágneses tulajdonságú) szemcsék szuszpenzióban helyezkednek el, így könnyebben be tudnak fordulni a repedés által eltérített erővonalak irányába. Emiatt ezen változat nagyobb felismerési pontosságot tesz lehetővé kisebb repedésméreteknél is. A mágneses mezőt előállító elektromos mező lehet egyen-, ill. váltakozó áramú.

8.2. A vizsgálat korlátai, megbízhatósága, reprodukálhatósága

Általánosságban megállapítható, hogy a vizsgálatnál csak olyan repedések találhatók meg, melyek hossza legalább háromszorosa a szélességnek [7]. A repedésnek vagy a felszínen kell lennie, vagy a felszínhez közel. Ha a repedés 6 mm-nél mélyebben helyezkedik el, akkor a száraz eljárással egyutas egyenirányítással detektálható a legnagyobb pontossággal. A nedves eljárást

használva egyenárammal gerjesztett mágneses mezővel 1,2 mm, váltakozó árammal gerjesztett mágneses mezővel pedig 0,25 mm mélység szab határt a kimutathatóságnak (8.1. táblázat).

Az alkalmazott mágneses mező erővonalainak 45 és 90 ° közötti szöget kell bezárni a repedés hossz tengelyével (8.1. ábra, **B** jelű repedés), mert ellenkező esetben (8.1. ábra, **A** jelű repedés) a szórt fluxus olyan gyenge lesz, hogy a hiba detektálásához már nem elegendő.

A repedés csak akkor mutatható ki megbízhatóan, ha a mágneses szuszceptibilitása az alapanyagétól eltérő, ill. - mint ahogy azt már az előző pontban említettem -, *kizárólag* ferromágneses anyagok vizsgálhatók ezen eljárással. A vizsgálat nagyon érzékeny a felületi szennyeződésre, ezért vizsgálat előtt a felületet gondosan le kell tisztítani.

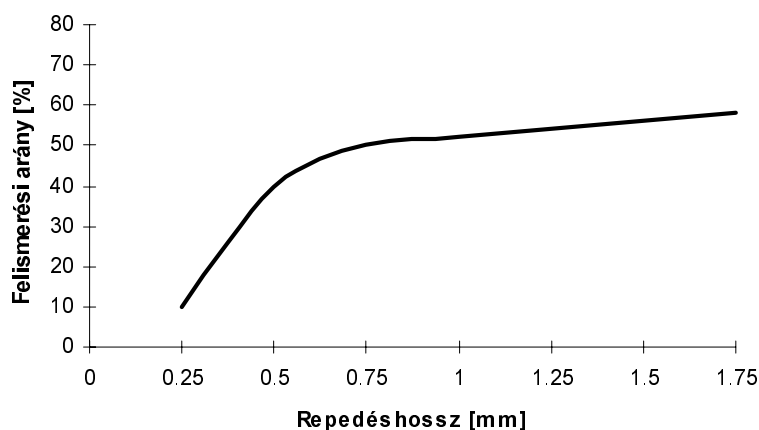
A felületen lévő, nem mágnesezhető bevonatnak 0,075 mm-es vastagságig nincs számottevő befolyásoló szerepe a vizsgálatra, azonban ha a bevonat ferromágneses, akkor csak 0,025 mm-es rétegvastagság engedhető meg.

A vizsgálat során a megfelelő színű háttér használata szükséges. Ezen eljárásnál a fehér háttér a könnyebb felismerést segíti, valamint a dokumentáláshoz szükséges fényképfelvételekhez is ideális [7,8].

A vizsgálat során fontos a megfelelő megvilágítás. A fluoreszcens fény intenzitásának legalább 1000 luxnak (150 W-os izzólámpa fénye 1 m távolságról) kell lennie.

A kimutatható legkisebb repedésméret meghatározása elég bonyolult, ez ugyanis több tényező függvénye. Ezen tényezők a következők:

- **Repedésgeometria:** a repedés szélessége, hossza, mélysége, a repedés élének alakja, a repedés keresztmetszeti alakja, a repedés orientációja, a felszíntől való távolsága, stb.
- **Mágneses mező:** nagysága, az előállítás módja (egyen-, ill. váltakozó áram), a vizsgáló tekercs elrendezése, stb.
- **Próbatest állapota:** a próbatest mérete és alakja, a felületi érdesség, a repedések előfordulási gyakorisága, stb.
- **Vizsgálat objektív tényezői:** a vizsgálóberendezés állapota, az elektromos hálózat minősége, a mágneses por minősége, mérete, a megvilágítás mértéke, stb.



8.2. ábra. A felismerés valószínűsége turbinalapátokon végzett vizsgálatok alapján

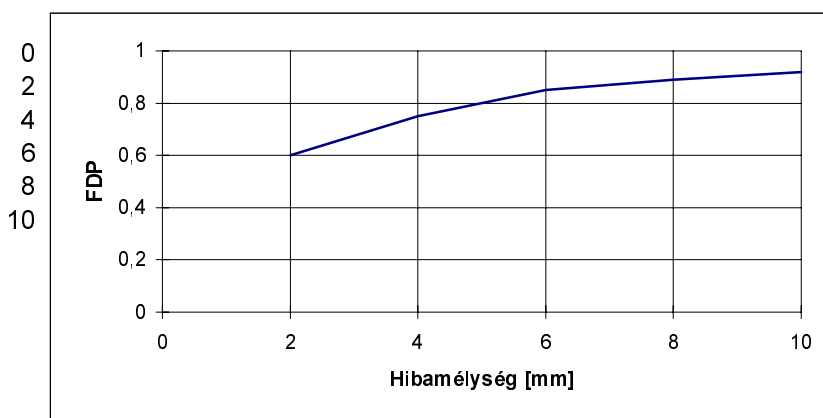
- **Vizsgálat szubjektív tényezői:** a vizsgáló és/vagy kiértékelő személy(ek) képzettsége, éleslátása(!), pszichikai állapota.

Mindezen tényezők nagymértékű szóródást eredményeznek a vizsgálat végzése során. Turbinalapá-tokon végzett mágneses repedésvizsgálat eredményei láthatók az 8.2. ábrán [9,10].

8.1. táblázat: Különböző repedéshosszak láthatósága [9]

A repedés mélysége [mm]	A láthatósági index (10-tisztán látható, 0-nem látható)	
	a mágneses teret gerjesztő térrő 0,3 A/mm ²	a mágneses teret gerjesztő térrő 1,2 A/mm ²
7,9	8	9
5,2	5	8
2,8	4	5
1,4	2	5
0,81	2	3
0,35	1	2
0,3	<1	1
0,22	<1	1
0,13	<1	1

A Nordtest és ICONÉ projektek által mágneses repedésvizsgálattal vizsgált alkatrészek esetében a hiba-felismerési valószínűséget a 8.3. ábra szemlélteti [18].



8.3. ábra. Hibafelismerési valószínűség mágneses repedésvizsgálatnál

9. Örvényáramos repedésvizsgálat

9.1. A vizsgálat elve, fizikai alapjai

Ha egy tekercsben váltakozó áram folyik (\mathbf{I}_1), akkor a tekercs körüli térben váltakozó mágneses mező indukálódik (\mathbf{H}_1). Ezen mágneses térbe helyezett elektromosan vezető anyagban a váltakozó mágneses mező hatására váltakozó elektromos áram indukálódik (örvényáram, \mathbf{I}_2). Ezen \mathbf{I}_2 áram iránya olyan, hogy az általa létrehozott mágneses mező (\mathbf{H}_2) a \mathbf{H}_1 mágneses mezőt gyengíteni igyekezik. A repedések és egyéb felületi tökéletlenségek megváltoztatják a felületen indukálódott örvényáram nagyságát (az impedancia változásán keresztül), ez a változás megjelenik a \mathbf{H}_2 mágneses mezőben is. A mérés elve pedig az, hogy a mágneses mező változását érzékeny elektronikus eszközökkel mérni lehet (9.1. ábra).

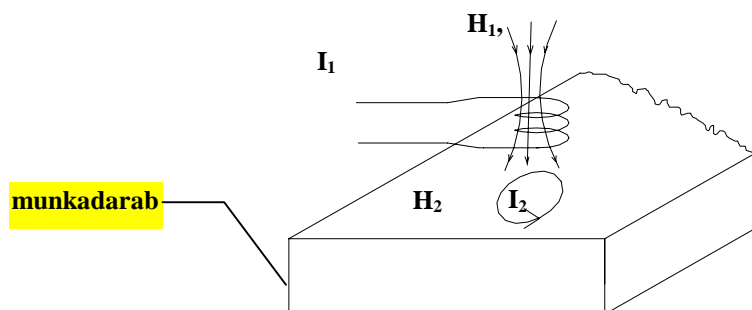
A mérés során a vizsgált tárgyban haladó áram impedanciájának változását mérjük. Az impedancia az (11) összefüggés segítségével határozható meg.

$$Z = R \cdot \sin \omega \cdot t + X_L \cdot \cos \omega \cdot t \quad (11)$$

ahol, \mathbf{Z} - impedancia [Ω], \mathbf{R} - ellenállás [Ω], \mathbf{X}_L – induktivitás [Ω], ω : körfrekvencia [1/s], t - fázisidő [s].

A (11) kifejezésből a \mathbf{Z} vektor nagysága (abszolút értéke), $|\mathbf{Z}| = \sqrt{X_L^2 + R^2}$, a fázisszöge pedig $\phi = \arctg\left(\frac{X_L}{R}\right)$.

A vizsgáló berendezés kijelzőjén (oszilloszkóp) a \mathbf{Z} impedancia értékét ($|\mathbf{Z}|$, ϕ) láthatjuk, mivel \mathbf{Z} vektormennyiség, ezért a kétdimenziós síkon neki egy pont felel meg. Repedés esetén az impedancia megváltozik, azaz a kijelzőn egy addig \mathbf{Z}_0 ($|\mathbf{Z}_0|$, ϕ_0) pontba mutató vektor helyett egy \mathbf{Z}_1 ($|\mathbf{Z}_1|$, ϕ_1) pontba mutató vektor lesz látható.



9.1.ábra
Örvényáramos repedésvizsgálat elvi elrendezése

9.2. A vizsgálat korlátai, megbízhatósága, reprodukálhatósága

A vizsgálat csakis elektromos vezetőknél használható. Mivel a vizsgálatnál használt váltakozó áram, valamint az indukálódott örvényáram a vezető felületén halad (Skin-effektus), ezért csak korlátozott mértékben hatol be a vizsgálandó tárgyba. A behatolási mélységet az 1.6.2. egyenlettel határozhatjuk meg:

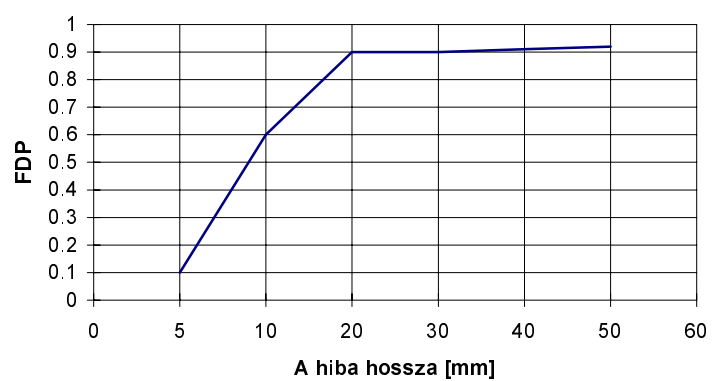
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \nu \cdot \sigma \cdot \mu_o \cdot \mu_r}} \quad (12)$$

ahol δ : a behatolási mélység [m], μ_o : a vákuum permeabilitása [$4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A²], μ_r : a relatív mágneses permeabilitás (nem ferromágneses anyagok esetén értéke 1), σ : a fajlagos vezetőképesség [S/m], ν : frekvencia [Hz].

Mivel a vizsgálat során a vizsgált darab felületén folyó áram változását mérjük, és ezt rendkívül sok tényező befolyásolja, ezért az alábbi tényezőket figyelembe kell venni:

- A (12) kifejezésből látható, hogy a frekvencia növelésével a behatolási mélység hatványozottan csökken. Tehát minél kisebb a frekvencia, annál mélyebben fekvő hibák mutathatók ki, viszont az érzékenység a kisebb frekvenciával csökken. Így a felszín alatti hibákhoz nagy, míg finom felszíni repedésekhez kis frekvenciát kell választani.
- A tekercs méretét illetve alakját a vizsgálandó munkadarab méretéhez kell választani; a mágneses mező annál erősebb minél keskenyebb a tekercs, illetve minél nagyobb a menetszám, tehát a tekercs megválasztásakor ezen szempontokra kell tekintettel lenni.
- A vizsgálati eredményekre hatással van a hőmérséklet is, ezért a vizsgálatot csak állandó hőmérsékleten szabad végezni.
- A mérőberendezés pontossága is határt szab a legkisebb észlelhető hibának, hiszen a mágneses mező bármilyen kis mértékű változása nem mérhető, a használatos mérőberendezések (vizsgálótekercs, Hall-féle gaussmérő) a mágneses mezőnek mintegy csak kb. 0,01%-os változását tudják regisztrálni.
- A vizsgált anyag elektromos vezetőképessége.
- A vizsgált darabon lévő folytonossági hiányok (repedés, zárvány, horpadás, furat, karcolás, stb.).
- A felület állapota (bevonat, rozsda, stb.).
- A vizsgált darab alakja, mérete.
- A fém állapota (szemcseméret, hőkezeltségi állapot, homogenitás, ötvözők).
- Más elektromosan vezető (vagy ferromágneses) felületek közelsége.

A Nordtest és ICONÉ projektek által örvényáramos repedésvizsgálattal vizsgált alkatrészek esetében a hiba-felismerési valószínűséget az 9.2. ábra szemlélteti [18].

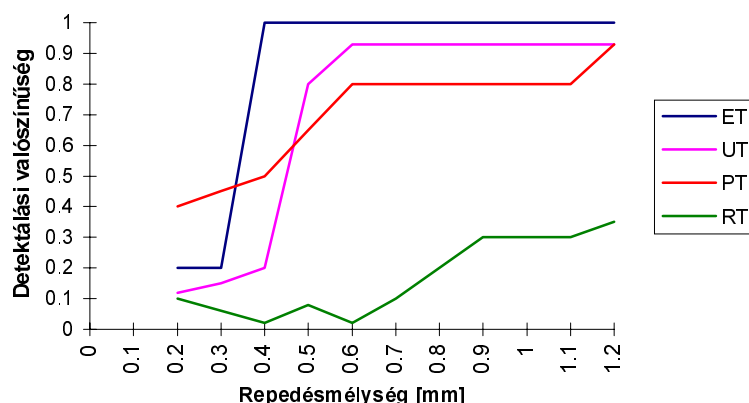


9.2. ábra. Hibafelismerési valószínűség örvényáramos repedésvizsgálatnál

10. A roncsolásmentes vizsgálatok megbízhatósága és reprodukálhatósága

10.1. Bevezetés

A különböző roncsolásmentes eljárások közül egyik sem tökéletesen megbízható (10.1.ábra); és bár az eljárások fejlődnek, a 100%-os pontosság talán sohasem lesz elérhető. Ezért legjobb ezen ténybe belenyugodni és a vizsgálat megbízhatóságát figyelembe véve végezni a kiértékelést. A gyártás és működés közbeni vizsgálat fontos eszköz a megbízhatóság növelésére. Pontos vizsgálatoknál szükség van a megfelelő vizsgálati módszer kiválasztására, az anyagi lehetőségeket is figyelembe véve.



10.1. ábra. A különböző roncsolásmentes vizsgálati eljárások megbízhatósága [17]

- **ET:** örvényáramos vizsgálat
- **UT:** ultrahangos vizsgálat
- **PT:** folyadékpenetrációs vizsgálat
- **RT:** röntgen vizsgálat

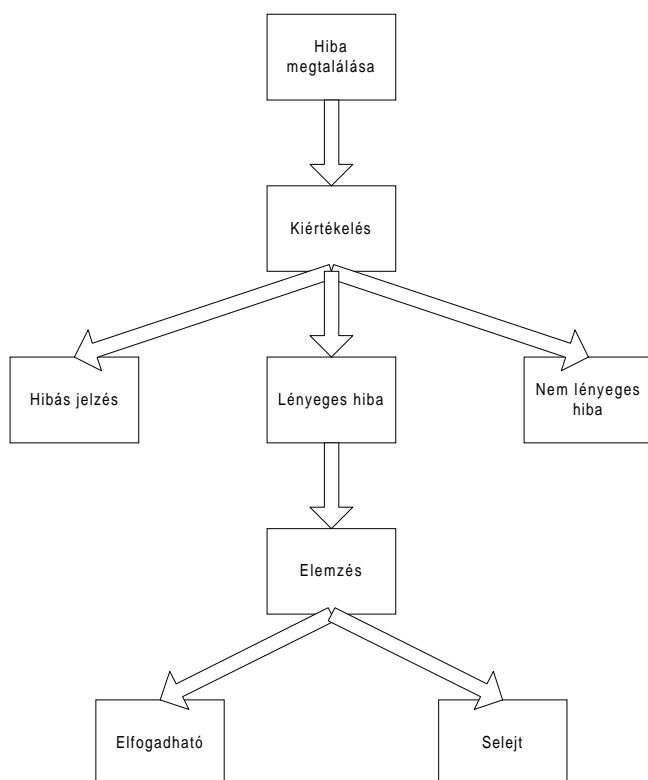
Roncsolásmentes vizsgálatok eredményein alapuló vizsgálatok fontos szerepet játszanak egy szerkezet integritásának a megítélésében. A vizsgálat elvi kivitelezése a 10.2. ábrán látható. A vizsgálat eredménye gyakran a vizsgáló személy képzettségétől függ, így a vizsgálat nem tekinthető egyszerűen mérésnek; azaz a hiba-felismerési, hiba osztályozási és hiba méretének meghatározási képességét nem lehet konfidencia-intervallummal jellemezni.

Ahhoz, hogy a roncsolásmentes vizsgálatok eredményeit a szerkezeti integritás megítélésében felhasználhassuk, meg kell tudnunk válaszolni a következő kérdéseket:

- Egy bizonyos határ fölötti méretet minden esetben ki tudunk-e mutatni?
- Milyen pontosak a kapott hosszúsági és mélységi méretek?
- Mi a felismerési valószínűsége egy bizonyos méretű hibának?
- Milyen pontossággal tudjuk a hiba helyét meghatározni?
- Milyen pontossággal tudjuk a hiba típusát meghatározni?

- Milyen pontossággal tudjuk a hiba méretét meghatározni?
- Milyen valószínűséggel kapunk hibás jelzést?

Ezekre a kérdésekre a következő fejezetek próbálnak meg választ adni.



10.2. ábra
Egy megtalált, detektált hiba
kiértékelésének folyamata

10. 2. Statisztikai módszer

Számos statisztikai modell létezik, azonban a hiba méretének meghatározásához ezek közül az 1987-ben DAVIES által valamint az 1990-ben HEASLER által felállított regressziós modell a legalkalmasabb. Ezen modellekben a vizsgálat arra törekedik, hogy minél pontosabban meghatározhassuk a hiba mérési pontatlanságának az eloszlását, valamint függvénykapcsolatot találjunk a valóságos és a mért hibanagyság között. DAVIES úgy találta, hogy a méretek logaritmikus transzformációjával a mérési hiba értéke stabilizálódik és szimmetrikussá válik. Az általa használt regressziós formula:

$$\log(M_i) = \beta_1 + \beta_2 \cdot \log(T_i) + \varepsilon_i \quad (13)$$

$$\text{Var}(\varepsilon_i) = \sigma_\varepsilon^2 \quad (14)$$

$$\beta_2 = 1 \quad (15)$$

ahol \mathbf{M}_i : az anyagfolytonossági hiányosság mért mérete, \mathbf{T}_i : az anyagfolytonossági hiányosság tényleges mérete, ε_i : a mérési hiba, σ_ε : a normál eloszlás szórása, β_1 és β_2 konstansok, \mathbf{n} : a vizsgált esetek száma és $\mathbf{i} = 1 \dots \mathbf{n}$.

Ezen regresszióknak előnye az, hogy a mérési hiba arányos az anyagfolytonossági hiány nagyságával. Míg a másik modellben (HEASLER és társai., 1990. lásd a 16 és 17 kifejezéseket) ez nem így van és már kis méretű anyagfolytonossági hiányhoz is akkora mérési hibát rendel mint a nagyhoz. További különbség az is, hogy a regressziós egyenesnek a DAVIES modellben át kell haladni az origón, míg HEASLER modelljében ez nem szükséges. Azonban még ez a módszer sem veszi figyelembe azt a tényt, hogy a kis anyagfolytonossági hiányok esetén a mérési hiba sokkal nagyobb valószínűséggel pozitív (azaz nagyobbak mérik, mint amilyen valójában), amíg nagy anyagfolytonossági hiányok esetén a mérési hiba sokkal nagyobb valószínűséggel negatív (azaz a valóságosnál kisebbnek mérik). A HEASLER féle regresszió a következő alakú:

$$(M_i) = \beta_1 + \beta_2 \cdot (T_i) + \varepsilon_i \quad (16)$$

$$Var(\varepsilon_i) = \sigma_\varepsilon^2 \quad (17)$$

A továbbiakban a (matematikailag) egyszerűbben kezelhető HEASLER-féle modellen elemezzük a statisztikus kiértékelést. A (16) kifejezésből látható, hogy az anyagfolytonossági hiány mért mérete akkor lesz egyenlő a tényleges mérettel, ha $\beta_1 = 0$, $\beta_2 = 1$ és $\sigma_\varepsilon = 0$. Ugyanis ekkor $M_i = T_i$ (ideális eset!).

Tehát a mérési adatok kiértékelésekor a három regressziós paraméter értékét meghatározva és összehasonlítva az ideális esethez tartozó értékekkel, a kiértékelés minősége megállapítható. Ha ezek értékei megfelelnek az ideális esetnek, akkor a roncsolásmentes anyagvizsgálat tökéletesen megfelelő volt az anyagfolytonossági hiány méretének meghatározásában. Ha ezek az értékek (vagy közülük akár csak egy is) eltér, akkor a méretek meghatározásában hibát követtünk el. Ha a β_1 és β_2 értéke tér el az ideálistól, akkor szisztematikus hibáról van szó, ha az σ_ε értéke különbözik nullától akkor véletlen hibáról van szó.

Két (vagy több) regressziós eredményt összehasonlításra is lehetséges, ekkor minőségi sorrendet is fel lehet állítani a különböző mérések eredményei között.

Az összehasonlításnak is több módja lehet, itt most a közepes négyzetes eltérés (**Root Mean Square Error** = RMSE) és a közepes abszolút eltérés (**Mean Absolute Deviation** = MAD) módszer használata kerül bemutatásra.

Az RMSE olyan statisztikai eljárás, amely összegzi a három regressziós paraméter eltérését az ideálistól. A közepes négyzetes eltérés statisztikai módszer mérőszáma a következőképpen definiálható:

$$RMSE^2 = \frac{\sum_i (M_i - T_i)^2}{n} \quad (18)$$

Bár (18) -összefüggésből nem látszik közvetlenül, hogy valami köze lenne a három regressziós paraméterhez, azonban némi matematikai átalakítással a következő formulára hozható:

$$RMSE^2 = [\beta_1 + (\beta_2 - 1) \cdot \mu_T]^2 + (\beta_2 - 1)^2 \cdot \sigma_T^2 + \sigma_\varepsilon^2 \quad (19)$$

$$\text{ahol: } \mu_T = \frac{\sum_i T_i}{n}, \quad \sigma_T^2 = \frac{\sum_i (T_i - \mu_T)^2}{n}.$$

A (19) kifejezésből látható, hogy RMSE értéke csak akkor lehet nulla, ha ideális értékeket kapunk a regressziós tényezőkre. RMSE értéke annál nagyobb, minél nagyobb a regressziós tényezők ideálistól való eltérése. Más szavakkal a legkisebb RMSE érték eredményezi a legpontosabb vizsgálatot [33,35].

A másik eljárás a MAD statisztika. A közepes abszolút eltérések statisztikai módszerének a mérőszáma a következőképpen definiálható:

$$MAD = \frac{\sum_i |M_i - T_i|}{n} \quad (20)$$

A MAD értékei szintén alkalmasak minőségi sorrend felállítására, azonban általában az RMSE módszer érzékenyebb a nagyobb hibákra mint a MAD módszer. Létezik formula, ami összefüggést teremt a MAD és a RMSE módszer mérőszámai között, azonban bonyolultsága miatt nem kerül tárgyalásra [37].

10.3. Heurisztikus módszer

A módszer jellemzője az, hogy bizonyos jellemzőket definiál, azokra meghatároz egy határértéket és ezen határértékeket egymással összehasonlítva határozza meg a vizsgálatok megbízhatóságát és reprodukálhatóságát. A határértékek anyagminőségtől, geometriától (anyagvastagság) valamint eljárástól függenek.

Igen fontos azt megjegyezni, hogy ez a módszer a határértékeket nem elméleti megközelítésből határozza meg, hanem nagyszámú vizsgálat kiértékelésének eredményeiből (mint pl. a PISC – lásd. a következő fejezetben).

A jellemzők a következők (a következetesség kedvéért az angol rövidítéseket használva):

- **FDP:** a vizsgálcsoport detektálási teljesítménye egy adott hibacsoportra,
- **FDF:** a vizsgálcsoport detektálási teljesítménye egy adott hibacsoportra, vizsgálati módszerek összehasonlításakor,
- **FDFR:** a vizsgálcsoport detektálási teljesítménye a nem elfogadható hibákra, vizsgálati módszerek összehasonlításakor,
- **CRP:** a nem elfogadható hibák detektálási teljesítménye,
- **CRF:** a nem elfogadható hibák detektálási teljesítménye, vizsgálati módszerek összehasonlításakor,
- **CAF:** a vizsgálcsoport által helyesen elfogadhatónak detektált hibák aránya,
- **FCRD:** a hibás detektálások aránya a vizsgálcsoport összes detektálásához viszonyítva,
- **FCRR:** a nem elfogadható hibák detektálási aránya vizsgálcsoport összes detektálásához viszonyítva,

- **MESZ:** mélységirányú detektálási hiba közepes értéke *mm*-ben kifejezve,
- **SESZ:** mélységirányú detektálási hiba szórása *mm*-ben kifejezve,
- **MESD:** a hiba mélységi méretének meghatározásakor jelenlévő mérési hiba közepes értéke,
- **MESL:** a hiba hosszúsági méretének meghatározásakor jelenlévő mérési hiba közepes értéke,
- **MELS:** a hiba elhelyezkedésének meghatározásakor jelenlévő mérési hiba közepes értéke,
- **SESD:** a hiba mélységi méretének meghatározásakor jelenlévő mérési hibák eltéréseinek négyzetes közepe,
- **SESL:** a hiba hosszúsági méretének meghatározásakor jelenlévő mérési hibák eltéréseinek négyzetes közepe,
- **SELS:** a hiba elhelyezkedésének meghatározásakor jelenlévő mérési hibák eltéréseinek négyzetes közepe,
- **FCRP:** téves elutasításra vezető hibás jelzések aránya,
- **PM:** felderítetlen hibák jelenlétének valószínűsége a már vizsgált részeken,
- **PEA:** a nem helyesen elfogadott hibák valószínűsége.

A vizsgálat teljes megbízhatósága (**R**) három tényező együttes hatásától függ (21 kifejezés), melyet e módszer alapján egymástól különválasztva lehet tárgyalni. A három tényező a vizsgálat saját képessége (**IC**), az alkalmazás körülményei (**AP**) és az emberi tényező (**HF**).

$$R = f (IC) + g (AP) + h (HF) \quad (21)$$

Mivel az emberi tényező mértéke nagyon változékony így előre az nem becsülhető, ugyanis ha figyelembe vennénk, akkor a kapott megbízhatósági eredmények félrevezetők lennének. Így csak a vizsgálat hatékonyságát (**E**) elemezzük.

A vizsgálat hatékonysága a (22) összefüggéssel jellemezhető.

$$E = f (IC) + g (AP) \quad (22)$$

Az emberi tényezőt a minőségbiztosítási program során kell ellenőrizni, annak tudatában, hogy a vizsgáló személy a megbízhatóságot akár nullára is csökkentheti nem megfelelő hozzáállással vagy érdektelenséggel.

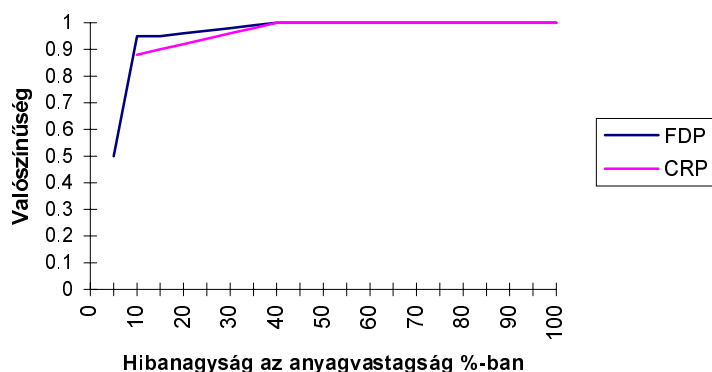
Bizonyos jellemzők (pl.: FDP) a hiba nagyságának a függvényei, így ezen értékeket átlagukkal helyettesítjük a kiértékelés során. A hiba méretének pontos meghatározása is nehézségekbe ütközik, és a használatos szerkezeti anyagoknál a 10 - 250 mm-es falvastagsági tartományban még a legpontosabb vizsgálati módszerrel sem lehet a hiba méretét ± 1 mm pontossággal meghatározni [18]. A nagyszámú vizsgálat eredményei lehetővé tették a következő határértékek definiálását, amelyet a 10.1. táblázatban foglaltunk össze.

10.1. Táblázat. Határértékek ultrahangos- és röntgenvizsgálatra

	MESD	SESD	MESL	SESL	MELS	SELS
Ferrites acél, minősített vizsgálat	3	5	3	10	2,5	5
Ferrites acél, nem minősített vizsgálat	-5	15	-20	30	2,5	5
Auszténites acél, minősített vizsgálat	0	5	-5	12	NA*	NA*
Auszténites acél, nem minősített vizsgálat	-4	7	-10	40	NA*	NA*

*NA = nincs adat

A vizsgálat eredményeiből az is kiderült, hogy mind az ultrahangos, mind a röntgenvizsgálat kielégíti a megkövetelt biztonsági előírásokat. A 10.3. ábrán a felületre merőleges orientációjú hibák detektálási valószínűsége látható képzett vizsgálószeméllyel végzett vizsgálat során.



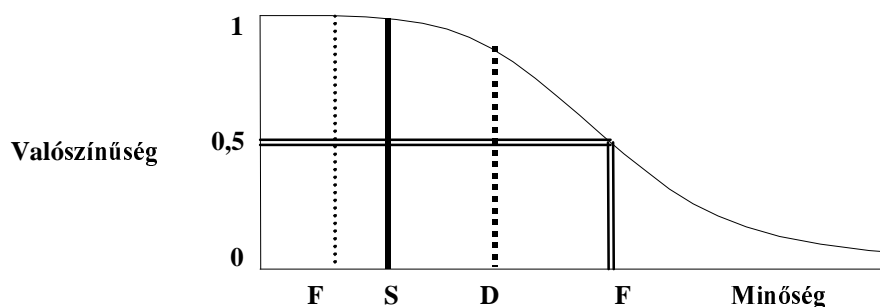
10.3. ábra
A felületre merőleges orientációjú hibák detektálási valószínűsége

10.4. A Detection Performance¹ módszer

Mivel már az alapanyag tulajdonságai sem mindig azonosak, valamint a gyártás, megmunkálás során ezek a tulajdonságok tovább változnak ezért a vizsgálati eredmény sem lehet azonos. A tulajdonságok bizonyos érték körüli szóródnak, így a vizsgálat eredménye hasonlóképpen szórást mutat. A vizsgált jellemzőket eloszlási görbén ábrázolhatjuk. A termék minőségére vonatkozó eloszlási görbe látható a 10.4. ábrán ahol feltüntetésre kerültek a következő minőségi kategóriák is:

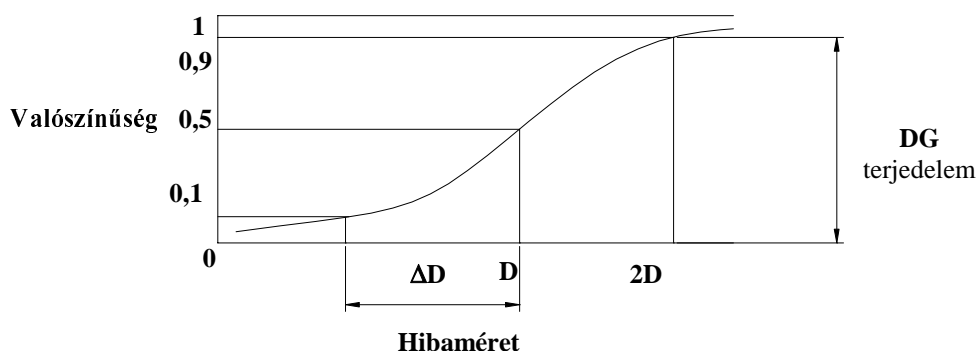
- **R:** ez az elméletileg megkövetelt minőség, de megvalósítása csak akkor lenne lehetséges, ha nem lennének ismeretlen befolyásoló tényezők,
- **S:** a gyártás, tervezés során megvalósítandó minőség,
- **D:** az ellenőrzés, anyagvizsgálat során megvalósítani kívánt minőség,
- **F:** a végeredmény (késztermék) minősége.

¹ Detection Performance = Detektálási teljesítőképesség



10.4. ábra. A termék minőségére vonatkozó eloszlási görbe

Az anyagvizsgálat célja, annak elérése, hogy a termék minősége legalább a detektálás minőségével (**D**) legyen egyenlő. A detektálási görbe a 10.5. ábrán látható.



10.5. ábra. Detektálási görbe

Ahol,

- **D**: közepes hibadetektálási érték, ez több féleképpen definiálható, pl.: 50%-os detektálási valószínűséghez tartozó hibanagyság,
- **ΔD**: a vizsgálat szelektivitására jellemző érték, definiálása: (**D-ΔD**) értéknél a hibadetektálás valószínűségének 10%-nak kell lennie,
- **DG**: a detektálás foka (terjedelem), pl.: a detektálás valószínűsége **2D**-nél.

Ezen paraméterek jelentése a vizsgálat során sokrétű:

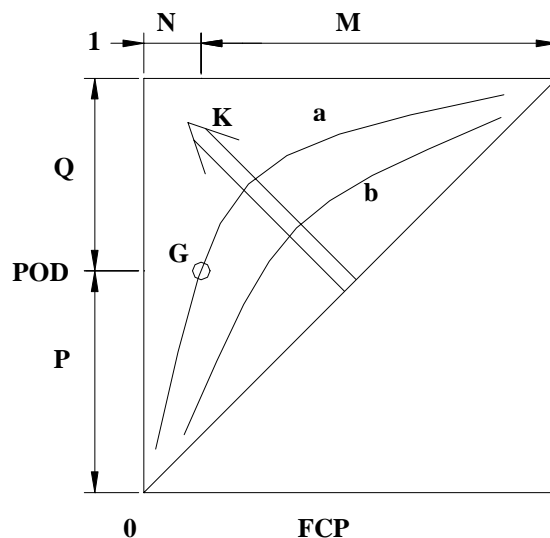
- **D** nagy értéke azt eredményezi, hogy bizonyos hibákat (melyek jelenléte nem elfogadható) a vizsgálat nem fog kimutatni; **D** kis értéke pedig sok hamis detektálást fog eredményezni,
- **ΔD** nagy értéke (alacsony detektálási szelektivitás) nagymértékű bizonytalanságot okoz a vizsgálat eredményeiben, azaz túl sok kis (még elfogadható nagyságú) hibát jelez, ugyanakkor túl sok nagy (már nem elfogadható) hibát nem jelez.
- **DG** a detektálási képesség hiányosságának a mértéke. Nagy mértékű, elfogadhatatlan hibák is észrevehetetlenek maradhatnak bizonyos körülmények között, így például:
 - vékonyfalú szerkezetekben a repedés röntgenvizsgálattal nem mutatható ki a kedvezőtlen orientáció miatt

- menetes furatokban lévő repedés örvényáramos vizsgálattal nem mutatható ki a menetek okozta elektromos zavar miatt
- hegesztett varratok gyökében lévő hiba ultrahanggal szintén nem mutatható ki a gyök alakja okozta hamis jelek miatt

Az ROC² görbe (10.6. ábra) a hibadetektálás valószínűségét és a hamis detektálási arányt is magában foglalja. Az ábrából több jellegzetesség leolvasható. Minden vizsgálati technológiának megfelel egy-egy görbe (**a**, **b**). A görbék átlótól vett távolsága (**K**) jellemző a vizsgálati pontosságra. Hiperbolikus görbét feltételezve a vizsgálat teljesítőképességét a (23) összefüggés fejezi ki:

$$K = 1 - 2 \cdot \sqrt{(1 - POD) \cdot FCP} \quad (23)$$

ahol **K**: vizsgálati teljesítőképesség [-],
POD³: detektálási valószínűség [-],
FCP⁴: hamis jelzés valószínűség [-].



10.6. ábra. Tipikus ROC görbe

A **K** értéke függ a technológia alkalmazhatóságától az éppen vizsgált esetre, valamint attól is, hogy a vizsgálat során milyen körülmények között járt el a vizsgáló személy. A vizsgáló személy képzettsége a görbét a 10.7. ábrának megfelelően fogja elmozdítani. 10.6. ábrán a **G** pont jelöli az éppen folyó vizsgálat munkapontját, a **G** pont annál magasabban helyezkedik el a görbén, minél érzékenyebb a vizsgálat. Azaz, amíg **K** értéke azt adja meg, hogy milyen a vizsgálat teljesítőképessége, addig a görbén lévő **G** pont a vizsgálat érzékenységet határozza meg.

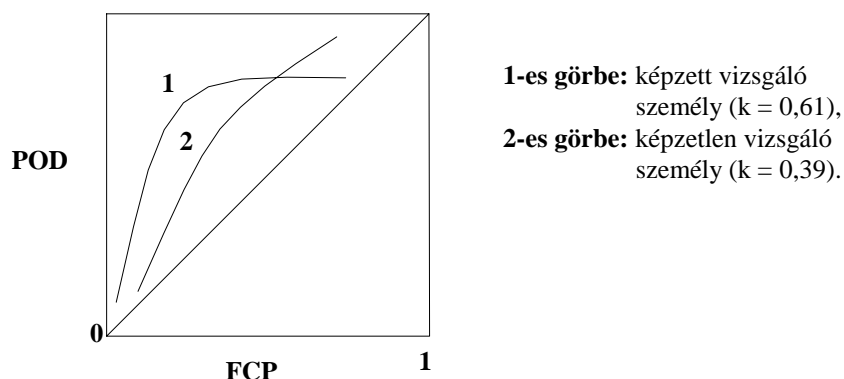
1

² ROC = **R**eliability **O**perating **C**haracteristic (Megbízhatósági Működési Jelleggörbe)

Megjegyzés: ezt a módszert a II. Világháború idején fejlesztették ki radarok jeleinek megbízhatósági vizsgálatára.

³ POD = **P**robability **O**f **D**etection (Detektálási Valószínűség)

⁴ FCP = **F**alse **C**all **P**robability (Hibás Jelzés Valószínűsége)



10.7. ábra. A vizsgálószemély képzettségének hatása az ROC görbére

A K görbén lévő G pont abszcisszája legyen N , ordinátája pedig P . Ekkor a 10.6. ábra jelölései alapján:

$$M = (1 - N) \quad (24)$$

$$Q = (1 - P) \quad (25)$$

ahol P : a helyesen el nem fogadott hibák hányada (= POD)

Q : a helytelenül elfogadott hibák hányada (= $1 - \text{POD}$)

N : a helytelenül el nem fogadott hibák hányada (= FCP)

M : a helyesen elfogadott hibák száma (= $1 - \text{FCP}$)

Ezen megbízhatósági jellemzők segítségével néhány gyakorlati szempontból fontos hányados képezhető:

- *Hibás jelentés aránya:*

$\alpha = N / P$, azaz a helytelenül és helyesen elutasított hibák aránya.

- *Sikerességi index:*

$\beta = M / Q$, azaz a helyesen és helytelenül elfogadott hibák aránya.

A vizsgáló személy célja természetesen a magas sikerességi index és az alacsony hibás jelentés arány. Ez természetesen magas K értéket jelent, és optimális G pontot a görbén. Az α és β bevezetésével könnyebben kezelhető a probléma, mint a K és G értékkel, hiszen α értéke közvetlenül megadja mennyi a hibás elutasítások aránya és β közvetlenül megmutatja mennyi a helyes elfogadások aránya. Sőt, az α értéke a gyakorlatban közvetlenül folyamatosan ellenőrizhető és az érzékenység állításával szabályozható [17,19].

A vizsgálati rendszer megválasztása különböző kritériumok alapján történhet, a 10.2 táblázatban két különböző rendszer (egy szigorúbb és egy enyhébb) kritériumai figyelhetők meg.

10.2. Táblázat. Megbízhatósági jellemzők és referencia értékek a hatásos vizsgálat két kategóriájához

Jel	Jellemző	Megbízhatósági referencia értékek		
		Szigorú	Közepes	Megjegyzés
D	A hibadetektálás közepes értéke	n.a.	n.a	
$\Delta D/D$	Detektálás szórása	0.1-0.5	0.5-1.0	(a)
DG	Detektálási fedettség	>0.95	>0.90	
POD	Detektálási arány	>0.95	>0.5	
FCD	Hibás jelzések aránya	<0.1	<0.5	
K	Vizsgálati teljesítőképesség	0.8	0.6	(b)
α	Hibás jelentések aránya	<0.1	<0.5	
β	Sikerességi index	>10	>2	
C	Konzisztencia	>0.9	>0.75	(c)

- (a) a közepes hibadetektálási érték (D) nem megbízhatósági kritérium, értéke több más tényezőtől is függ,
- (b) a vizsgálati teljesítőképesség egy relatív érték, amely 0 -tól (rossz) 1-ig (jó) terjedhet. (pl.:hiperbolikus görbét feltételezve, a működési pontban vett $POD = 0,9$ és $FCP = 0,1$ értékekkel a K értéke 0,8 -ra adódik),
- (c) a konzisztenciát (C) lehet az érzékenységre vonatkoztatni, de lehet más jellemzőre is (pl. C_G két különböző vizsgálat érzékenységeire vonatkoztatva: $G_1/G_2 = 0,75$).

11. A PISC¹ program eredményei

11.1. Előzmények

Mint az előzőkből nyilvánvaló, a roncsolásmentes vizsgálatokkal nem mutathatók ki 100%-os biztonsággal a szerkezetekben levő anyagfolytonossági hiányok. Ebből adódóan teljes mértékben gyakorlati követelmény a hibák detektálási valószínűségének kísérleti vizsgálata. Az első ilyen vizsgálatsorozatot az ASME szervezte úgy, hogy 1965-ben az Amerikai Egyesült Államokban megalakult az Amerikai Nyomástartóedény-kutató Bizottság (PVRC²) ami céljául tűzte ki az ultrahangos vizsgálati eljárás fejlesztését a hibafelismerésben, a hiba helyének és méretének meghatározásában. Az akkor használatban lévő eljárások semmilyen hasznos eredménnyel nem jártak ezért 1974-ben új tesztvizsgálatot indítottak az ASME³ XI. fejezetének megfelelően. 1975-ben bevonták a munkába a Biztonsági és Megbízhatósági Igazgatóságot (SRD⁴) valamint az Európai Közösség Kutatóintézetét (CEC/JRC⁵). Az Európai Közösség 10 országa 34 vizsgálócsoporttal létrehozta a Lemezvizsgáló Bizottságot (PISC⁶) [27].

11.2. A PISC program általános jellemzése

A PISC program fő célja, hogy vizsgálati eljárásokat és technikákat írjon elő nyomás alatt álló szerkezetekhez, mint például a könnyűvízes reaktor nyomástartó edénye valamint az ehhez kapcsolódó csővezeték rendszer. (Különös tekintettel a működés közbeni vizsgálatokra). A program nagyméretű hegesztett szerkezetek vizsgálatán alapul, melyek valós anyagfolytonossági hiányokat tartalmaznak. Ezen hibák helye és mérete jól meghatározott, gyakran roncsolásos vizsgálatokkal utólagosan feltárják azokat. E módszerrel egyrészt a roncsolásos vizsgálatok megbízhatóságának, reprodukálhatóságának megismerésén túl a törésmechanikai elvek alkalmazhatóságát, annak korlátait is ellenőrizni tudják.

A program 14 ország részvételével zajlik és jelen pillanatában (1998), - immár ENIQ⁷ néven, - a negyedik fázisában tart (*PISC I.*, *PISC II.*, *PISC III.*, *ENIQ*).

¹ **PISC** = Programme for the Inspection of Steel Components (Acélszerkezetek Vizsgálati Programja)

² **PVRC** = Pressure Vessel Research Committee (Nyomástartóedény-kutató Bizottság)

³ **ASME** = American Society of Mechanical Engineers (Gépészmérnökök Amerikai Szervezete)

⁴ **SRD** = Safety and Reliability Directorate (Biztonsági és Megbízhatósági Igazgatóság)

⁵ **CEC/JRC** = Commission of the European Communities / Joint Research Centre (Európai Közösség Bizottsága/ Egyesült Kutatóközpont)

⁶ **PISC** = Plate Inspection Steering Committee (Lemezvizsgáló Bizottság)

⁷ **ENIQ** = European Network for Inspection Qualification (Európai Hálózat Vizsgálati Minősítésre)

11.3. A PISC⁸ I eredményei

A vizsgálati program első fázisa néhány, az iparban is általánosan használt működés közbeni vizsgálat hátrányait tárta fel, bár a PISC I az ASME 1974/1977 számú előírás minimális követelményeinek felelt csak meg. A vizsgálat során 3 nagyméretű, hegesztett varratot tartalmazó próbatestet vizsgáltak melyekben *nagyszámú anyagfolytonossági hiány* volt (hibák száma > 500). A vizsgálatok eredményeit számítógép segítségével, statisztikai módszereket használva dolgozták fel.

A vizsgálatok eredményesebbé tételére a PISC I. az alábbiakat javasolta:

- a kisebb és bonyolultabb alakú repedések pontosabb kimutathatósága érdekében 20%-os DAC használata 50% helyett az ultrahangos vizsgálatban,
- olyan vizsgálati technikák használata, melyek a vizsgálandó hibákhoz vannak hozzáigazítva (pl.: felületközeli hibákhoz 70°-os vizsgálójfej),
- a magas érzékenységgű, több irányból végzett visszhangos technológiák közel tökéletes hibafelismerést eredményeztek, ezért ezek használatát javasolja.

11.4. A PISC II eredményei

A PISC I. eredményei olyan hiányosságokat tártak fel a vizsgálati eljárásokban ami indokoltá tette a PISC II. program beindítását. A PISC II. vizsgálati program ezen hiányosságokat szem előtt tartva került kidolgozásra. A PISC I. során a hibák száma túlságosan sok volt, vagy túl nagy vagy túl kicsi hibák voltak a vizsgálandó darabokban, valamint egyik darabon sem volt bevonat, plattírozás, így annak hatásait sem tudták vizsgálni.

E második programban már a vizsgálat paramétereinek a hatásait is figyelemmel kísérték. A következő paraméterekre helyezte a vizsgálat a fő hangsúlyt:

- A hiba helyének és alakjának hatása:
 - alak (kör, elliptikus, szögletes, sík, stb.),
 - elhelyezkedés (mélységi méret a varratban, vastagság irányú elhelyezkedés, stb.),
 - magasság (vastagság irányú méret),
 - ferdeség (a hibának a varrat középsíkjától való eltérése),
 - felületi érdesség (egy érdes és egy simított felület).
- A vizsgálóberendezés jellemzőinek hatása:

PISC = Programme for the Inspection of Steel Components (Acélszerkezetek Vizsgálati Programja). A program neve megváltozott, azonban a rövidítés ugyanaz maradt. vö. 1 és 6. számú lábjegyzetek-kel.

- a kibocsátott impulzus karakterisztikája,
 - vizsgálófrekvencia,
 - impedancia (adó, vevő),
 - szűrők (filterek) hatása,
 - a műszer helyesbítése.
- A felületi réteg hatása:
 - rétegvastagság,
 - bevonat típusa,
 - bevonatok száma.

A PISC II. célkitűzései:

- ✓ a nukleáris iparban használatos roncsolásmentes vizsgálatok hatékonyságának növelése,
- ✓ technológiák azonosítása elfoghatósági kritériumok alapján,
- ✓ eredményeinek előírások és szabványok módosításához való hozzáférhetőségét biztosítsa.

A vizsgálat során alkalmazott 4 próbatestben üzemeltetés közben, valamint már a gyártás során keletkezett hibák is megtalálhatók voltak. A programban összesen 50 vizsgálócsoport vett részt. (Jelen pillanatig a PISC II. vizsgálat során létrehozott adatbázis a legnagyobb, ami az ultrahangos vizsgálatokhoz kapcsolódik. Ezen adatok teljes körű nyilvánosságra hozása a 2000-2001 években várható⁹).

A PISC II. a vizsgálati eredmények alapján a következőket állapította meg [27, 32]:

- általánosságban a hibák nagy valószínűséggel kimutathatók, azonban minősítésük (hibatípus, méret) nem megfelelő mértékű [35],
- a vizsgálat összességét tekintve a 8 mm-nél nagyobb méretű hibák nagy valószínűséggel (90%) kimutathatók,
- az emberi tényező befolyásolja a vizsgálat hatékonyságát, mértéke esetenként az 50 % - ot is meghaladhatja,
- a vizsgálat eredményessége a hiba típusától is függ,
- az el nem fogadható hibák detektálása során a hiba méretét alábecsülte a kiértékelő személy(zet),

⁹ pl. a következő nemzetközi konferencián: Structural Integrity Assessment: How Safe is It? An Evaluation of the Integrated Approach Through the Results of the NESC I Case Study, Párizs 2000. március 27-28.

- 50 % **DAC** helyett 20 % **DAC** használata (v.ö.: PISC I. eredményei) nagyobb detektálási arányt biztosít, azonban a **DAC** értékének további csökkentése (10 %-ra) a detektálási arányt nem növeli,
- 50 % **DAC**-ot használó vizsgálati technikáknál kiegészítő vizsgálat is szükséges, ennek hiányában a megfelelő hibafelismerési arány nem biztosítható,
- ugyanazon vizsgálati technikában a kézi vizsgálat akár pontosabbnak is mutatkozhat a gépinél (11.1. táblázat vastagon szedett értékei) [28],
- a felületen lévő bevonat zavarja a hiba pontos méretének meghatározását 20 %-os és 50 %-os **DAC** használata esetén,
- a vizsgálóberendezés kábelhosszának változtatása igen jelentős hatással van a mérés eredményeire (a hiba megtalálásának, a hiba helyének és méretének pontos meghatározására) [29], további fontos paraméter a kábel impedanciája, és az impulzus hossza [30, 31].

11.1. Táblázat. A kézi és gépi vizsgálatok összehasonlítása

Eljárás	Kézi			Gépi (automatizált)		
	MDDF	MCRF	MCAF	MDDF	MCRF	MCAF
10 % DAC, B, S, TD	1,00	0,97	0,65	0,98	1,00	0,66
20 % DAC, U, S	0,94	1,00	0,65	0,86	0,73	0,76

- **B:** kétoldali vizsgálat,
- **S:** felületközei vizsgálat (70°-os vizsgálófej),
- **TD:** tandem technika,
- **U:** csak a nem bevonatos oldalról történt a vizsgálat,
- **MDDF:** átlagos hibadetektálási arány az összes vizsgálócsoport által az összes hibára vonatkoztatva ,
- **MCRF:** a nem elfogadható hibák nem elfogathatónak való detektálásának átlagos értéke egy vizsgálócsoport által az összes hibára vonatkoztatva,
- **MCAF:** az elfogadható hibák elfogathatónak való detektálásának átlagos értéke az összes vizsgálócsoport által az összes hibára vonatkoztatva)

11.5. A PISC III eredményei

A PISC I és PISC II eredményei alapján a szerkezetintegritással és a roncsolásmentes vizsgálatok megbízhatóságával foglalkozó nemzetközi szervezetek szükségesnek látták a program további folytatását. E vizsgálatssorozatban valóságos hibákat tartalmazó valóságos szerkezetekből (könnyűvízes reaktor) kivett próbatesteket vizsgáltak. Ezért 1986-ban kezdetét vette a PISC III. A PISC harmadik fázisa 8 különböző részegységből áll. Különbségek vannak a vizsgálandó anyagokban és a vizsgálandó geometriákban, a vizsgálati technikákban és a vizsgálati kritériumokban is. Ezen okok miatt a PISC III program eredményeinek bemutatása során ezek a részegységek, vizsgálati darabok külön- külön kerülnek tárgyalásra.

11.5.1. 1. vizsgálati darab: Ténylegesen sugárszennyezett szerkezetek vizsgálata

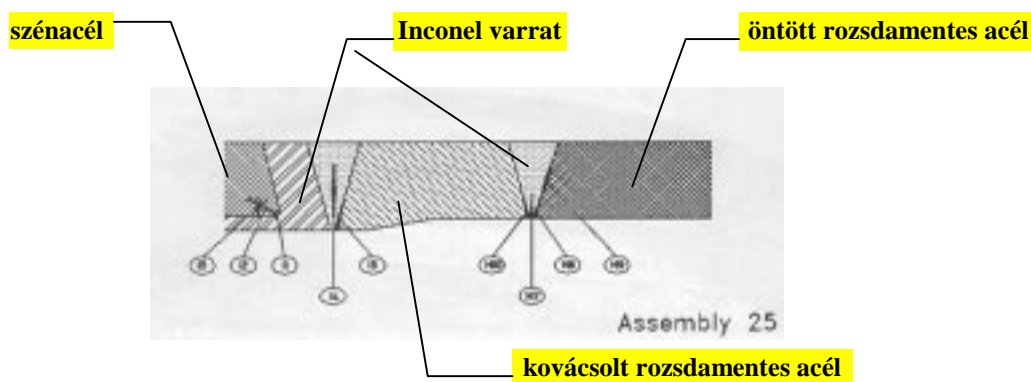
E részegységben könnyűvízes reaktor primer köréből származó munkadarabok valóságos hibáit vizsgálták mind roncsolásmentes, mind roncsolásos módszerrel. A vizsgálat célja az volt, hogy kapcsolatot találjon a valóságos és a mesterségesen elkészített anyagfolytonossági hibák vizsgálati jelei között[36].

11.5.2. 2. vizsgálati darab: Teljes méretű nyomástartó edények vizsgálata

A 2. vizsgálati darab, részegység feladata volt a PISC II. eredményeinek igazolása teljes méretű nyomástartó edények vizsgálatával. A vizsgálatot forróvízes reaktor alkatrészekén végezték automatikus vizsgálófejjel. A roncsolásmentes vizsgálatot roncsolásos vizsgálat követte, hogy a hibák típusa pontos helye és mérete ellenőrizhető legyen [34].

11.5.3. 3. vizsgálati darab: Csővégek és heterogén hegesztett kötések vizsgálata

A harmadik vizsgálati darabban, részegységben az atomreaktorokban alkalmazott csővégek és heterogén hegesztési varratoknak (11.1. ábra) a szerkezeti integritásra gyakorolt hatását vizsgálták. A darabot 10 országban 22 vizsgálócsoport ultrahangos vizsgálattal ellenőrizte, különböző vizsgálati technikákat alkalmazva.



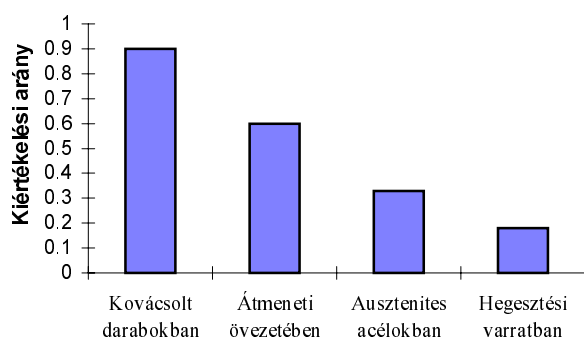
11.1. ábra. Három különböző anyagot tartalmazó csatlakozások a 25. számú próbatesten [50]
(a körökben lévő számok az anyagfolytonossági hiányokat mutatják)

A vizsgálati eredmények táblázatos összefoglalása a 11.2. táblázatban látható. Az eredmények alapján megállapítható, hogy bár az átlagos hiba kiértékelési szint nem éri el az elvártat, mégis néhány vizsgálati technikával megfelelő pontossággal detektálható a hiba még heterogén ausztenites varratokban is. Szem előtt kell tartani azonban azt is, hogy a vizsgálat csak speciális munkadarabon lett elvégezve, így a vizsgálat eredményeinek más darabra való kiterjesztésekor körültekintően kell eljárni [38, 39, 40].

11.2. Táblázat. Átlagos vizsgálati eredmények homogén és heterogén varratokra, külső oldali vizsgálat

Munkadarab	Varrat típusa	FDF	CRF	CAF	FCRD	FCRR	MESZ	SESZ
24	Homogén	0,53	0,53	-	0,32	0,30	1,7	3
24	Heterogén	0,64	0,69	1,00	0,35	0,23	0,1	5
21	Homogén	0,42	0,22	0,61	0,34	0,24	3,8	6
21	Heterogén	0,34	0,46	0,87	0,14	0,07	1,5	5
22	Homogén	0,18	-	0,93	0,36	0,33	2,1	3
22	Heterogén	0,23	-	0,86	0,20	0,17	6,6	6
25	Homogén	0,75	0,61	-	0,17	0,08	-3,5	5
25	Heterogén	0,80	0,75	-	0,12	0,04	-2,5	6

A 11.2. ábrán az anyagfolytonossági hiányt tartalmazó alapanyag hatását láthatjuk a detektálási szintre [49].



11.2. ábra. Az alapanyag hatása a detektálási szintre

11.5.4. 4. vizsgálati darab: Ausztenites acélok vizsgálata

A negyedik vizsgálati darabban, részegységben a könnyűvízes reaktorok ausztenites csővezetékeinek a vizsgálata folyt. A vizsgálatok kiterjedtek mind az alapanyagokra mind pedig a varratokra. Attól függően, hogy a varrat melyik két féle alapanyag (kovácsolt, öntött) között helyezkedik el a 4. vizsgálati darab a következő további három részre bontható.

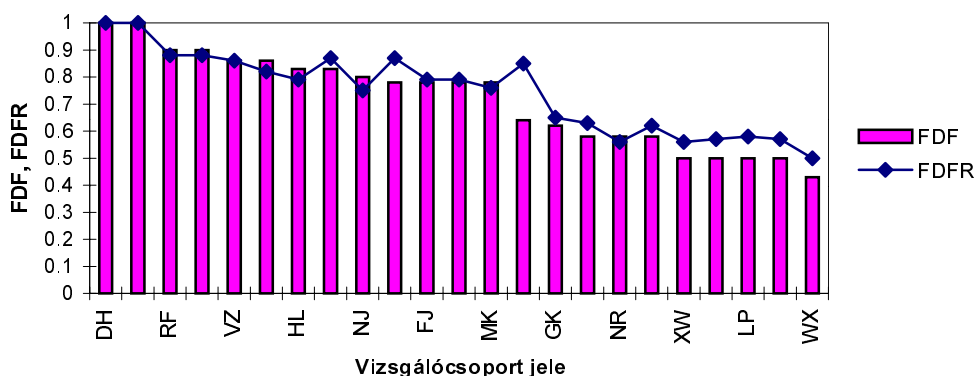
11.5.4.1. KOVÁCSOLT-KOVÁCSOLT DARABOK KÖZÖTTI VARRAT

E vizsgálat sorozatban 10 ország 23 vizsgálócsoportja 6 alkatrészben, darabon végzett vizsgálatokat. A 6 alkatrészben 26 hiba volt. A vizsgálócsoportok közül csak 9 csoport vizsgálati eredménye volt 80 % fölötti, bár a 7 mm-nél nagyobb anyagfolytonossági hiányt minden csoport 90 %-os

valószínűséggel megtalálta ($FDP > 0,9$) [41]. A hibák mélységi méretének meghatározása nem a megfelelő mértékű, ugyanis a valós és mért anyagfolytonossági hiányok méretei közötti korrelációs együttható csak 4 vizsgálócsoport esetében volt nagyobb 0,6-nál, holott ezen értéknek ideálisan 1-nek kellene lennie. A vizsgálócsoportok detektálási teljesítménye a 11.3. ábrán látható.

A vizsgálatok szerint a detektálás teljesítménye javítható:

- mindkét oldalról, a varratra merőleges irányból végzett vizsgálattal,
- transzverzális hullámot használó vizsgálati technikák alkalmazásával.



11.3. ábra. Vizsgálócsoportok detektálási teljesítménye (kovácsolt-kovácsolt)

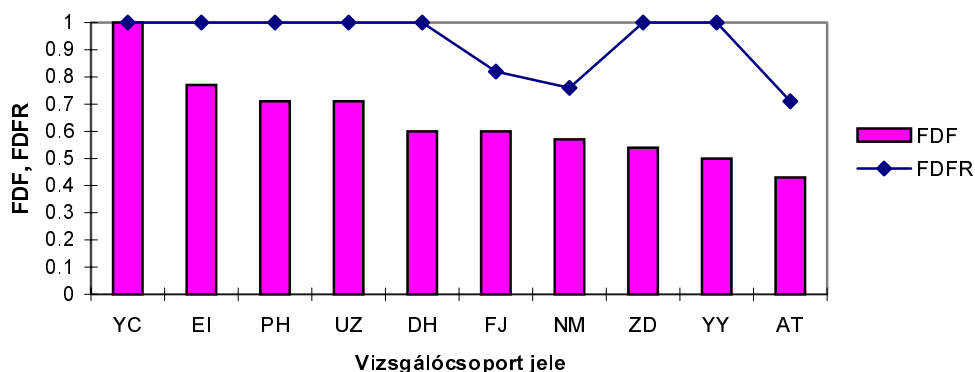
15.4.2. KOVÁCSOLT-ÖNTÖTT DARABOK KÖZÖTTI VARRAT

A vizsgálatssorozatot 9 ország 10 vizsgálócsoportja végezte, a munkadarabokban összesen 18 anyagfolytonossági hiány volt, nagyrésztük a varratban és a hőhatásövezetben. A vizsgálatok megállapították, hogy a következő hibák nehezen detektálhatók[42]:

- összeolvadási hiba a varratban,
- szikraforgácsolással készített szándékos repedések a hőhatásövezetben és a statikusan öntött rozsdamentes acélban (SCSS¹⁰),
- szándékosan készített hiba a varratszélek összeolvadási hibáinak szimulálására,
- a falvastagság-változásnál lévő hibák (kedvezőtlen geometriai viszonyok miatt).

Általánosságban a hibás jelentések aránya nagyon jó volt, szintén jó eredményt mutatott a hibák hosszanti méretének meghatározása, azonban a hibák mélységi méretének meghatározása nem érte el a megkívánt szintet (11.4. ábra).

¹⁰ SCSS = Statically Cast Stainless Steel (statikusan öntött rozsdamentes acél)



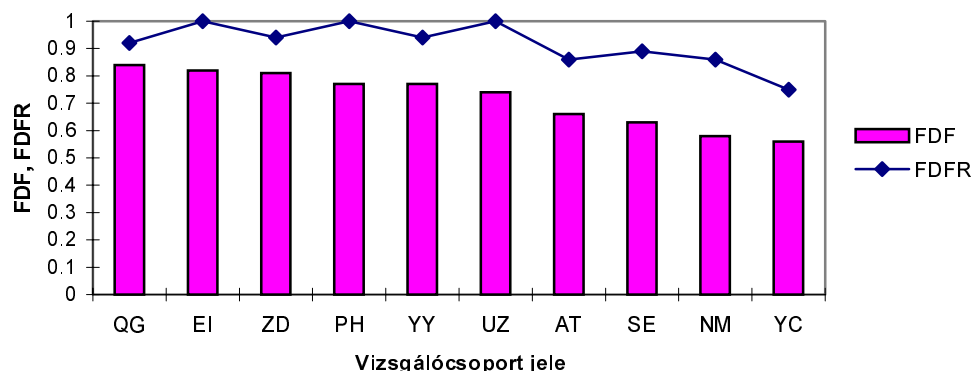
11.4. ábra. Vizsgálócsoporthoz tartozó detektálási teljesítménye (kovácsolt-öntött)

11.5.4.3. ÖNTÖTT-ÖNTÖTT DARABOK KÖZÖTTI VARRAT

Ezen vizsgálatot három egyenként 645.16 mm (31 inch¹¹) átmérőjű 68 mm falvastagságú csövön végezte el 7 ország 10 vizsgálócsoporthoz. A három munkadarabban összesen 22 anyagfolytonossági hiány volt, többségük a varratban és a hőhatásövezetben [43].

A vizsgálat eredménye megfelelő volt (11.5. ábra). A következő hibatípusok nehezen detektálhatók ($FDP \leq 0,5$):

- fáradásos repedések a centrifugálöntéssel készült rozsdamentes acél munkadarabok (CCSS¹²) között lévő varratban (ennek oka minden bizonnyal a kedvezőtlen szövetszerkezet),
- szikraforgácsolással készített mesterséges repedések, melyek mérete a falvastagság 10 %-a alatt van,
- szándékosan készített hiba a varratszélek összeolvadási hibáinak szimulálására.



11.5. ábra. Vizsgálócsoporthoz tartozó detektálási teljesítménye (öntött-öntött)

¹¹ 1 inch (hüvely) = 25,4 mm

¹² CCSS = Centrifugal Cast Stainless Steel (centrifugálöntéssel készült rozsdamentes acél)

A hibák mélységi méretének meghatározása (csakúgy mint az előző két esetben) nem kielégítő, és ebben az esetben a hibák hosszanti méretének meghatározása sem éri el a megkívánt szintet. Azon vizsgálócsoport (a 11.5. ábrán a QG jelű), amelyik röntgenvizsgálattal határozta meg a hibák helyét és méretét, sokkal nagyobb eredményességgel dolgozott.

11.5.5. **5. vizsgálati darab:** Gőzgenerátor csövek vizsgálata

Az 5. vizsgálati darab, részegység mind a munkadarab jellegében, mind pedig a vizsgálati technológia tekintetében különbözik a PISC III többi részegységétől [47]. E vizsgálat során kis átmérőjű ($\varnothing 7/8'' = \varnothing 22,22$ mm), kis falvastagságú (1,27 mm), INCONEL 600-as anyagminőséget¹³ vizsgáltak örvényáramos vizsgálattal [46]. A vizsgálandó munkadarabok a következő hibákat tartalmazták:

- korróziós repedések,
- szemcseközi korrózió,
- lyukkorrózió,
- súrlódási korrózió,
- lerakódás alatti korrózió.

A vizsgálat eredményei:

- a hibafelismerés valószínűsége nem kielégítő ($FDF < 0,75$),
- nagyszámú hibás jelzés történt, ami a biztonságot nem befolyásolja azonban gazdasági okok miatt nem elfogadható,
- az örvényáramos vizsgálatot célszerű ultrahangos vizsgálattal kiegészíteni a jobb vizsgálati eredmények elérése érdekében.

Általánosságban elmondható, hogy a vizsgálat eredményei a PISC I eredményeivel vethetők csak össze (az eredmények nagy szórása miatt), így további vizsgálatok, tanulmányok (pl.: paraméterek befolyásának vizsgálata) szükségesek [45].

11.5.6. **6. vizsgálati lépés:** A roncsolásmentes vizsgálat matematikai modelljei

Nyolc ország 16 szervezete jelezte részvételét ezen vizsgálati lépésben. A cél az volt, hogy az e téren létező matematikai modellek érvényességét a vizsgálatokkal ellenőrizzék, valamint, hogy megfelelően kezelhető és alkalmazható számítógépes modellt alkothassanak a vizsgálat kiértékelésére. Hat modell volt alkalmas további vizsgálatra, ebből csak hármat publikáltak, valamint további kettő vizsgálata tovább folyik [37].

¹³ INCONEL 600 összetétele: 76 % Ni, 15,5 % Cr, 8 % Fe, 0,5 % Mn, 0,2 % Si, 0,08 % C

11.5.7. **7. vizsgálati lépés:** Emberi megbízhatóság vizsgálata

A PISC II. vizsgálat megállapította, hogy az emberi tényező befolyása a vizsgálatok eredményeire esetenként az 50 %-ot is meghaladhatja, ezért a PISC III 7. vizsgálati lépése ezen tényező mélyrehatóbb megismerését tűzte ki maga elé.

A vizsgálat során jól képzett vizsgálószemélyek (vizsgálócsoporthoz) munkaközbeni teljesítményét figyelték különböző körülmények között. Az összehasonlítási alap a vizsgálócsoporthoz hibadetektálási teljesítménye (**FDF**) volt. Az egyik munkahely, ahol a megfigyelést végezték egy laboratórium volt ahol napi 8 órában, heti 5 napon át végeztek vizsgálatot, míg a másik munkahely egy hordozható műhely volt, ahol 12 órás műszakban 11 napon át, változó hőmérsékletben (egész 27 °C-ig), 40-50 %-os relatív páratartalommal és 80 dB háttérzajban (ezzel az ipari körülményeket szimulálták) végezték a vizsgálatokat. A kísérlet során mérték a vizsgálatot végző személy(ek) pszichológiai állapotát, valamint videó- és hangfelvételeket készítettek. A pszichológiai állapot rögzítésére azért volt szükség, hogy a vizsgálószemély fizikai és szellemi állapota valamint a vizsgálathoz való hozzáállása és a vizsgálati eredmények közötti kapcsolatot vizsgálni lehessen [44].

A vizsgálat eredményei alapján az alábbi megállapítások tehetők:

- a kalibrálás változékonysága laboratóriumi körülmények között 2-3 dB, amíg ipari körülmények között (hordozható műhely) 13 dB-ig is elmehet, ez a vizsgálószemély fáradtságának következménye,
- bár a vizsgálószemélyek mindegyike jól képzett, ennek ellenére a hibadetektálási teljesítmények változóak voltak, egy adott személy esetében is ki lehetett mutatni a napi változásokat, valamint a heti változásokat, ezek szintén a fáradtság miatt jelentkeztek, ami a koncentrációkéesség csökkenését vonta maga után,
- a hosszú műszakban végzett vizsgálatok során a fáradtság és a további munkavégzés motivációjának a hiánya erős befolyással van a vizsgálat megbízhatóságára,
- a vizsgálati hibák nagy száma az adatok rögzítésekor történt nem pedig a detektáláskor, ez megelőzhető olyan adatrögzítési eljárással ami speciálisan az adott munkához van kialakítva (pl. formanyomtatvány, a vizsgált darab rajza, stb.),
- a pszichológiai vizsgálatok célszerűnek bizonyultak a vizsgálat során, ezért ezen vizsgálatok további fejlesztése hasznos lenne.

11.5.8. **8. vizsgálati lépés:** Szabványügyi szervezetek támogatása

Ezen vizsgálati lépés a PISC igazgatóságának a kérésére került be a vizsgálat sorozatba. A OECD/NEA¹⁴ és a CEC/JRC szintén támogatta ezen vizsgálat beindítását. A PISC program minden résztvevője a vizsgálatok során úgy járt el, hogy ezen kérést elősegítse.

¹⁴ OECD/NEA = **O**rganisation for **E**conomic Co-operation and **D**evelopment / **N**uclear **E**nergy Agency (Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet / Nukleáris Energia Képviselő)

A PISC III 8. lépésének a következő hármas célja volt:

- informálja a témához kapcsolódó szabványok szerkesztőit a vizsgálatok eredményeiről,
- a PISC programban résztvevők a jelentéseiket a szabványoknak megfelelően készítsék el, ezzel is segítve a különböző országok szabványai szerint (ISO, DIN, CEN, IIW, stb.) dolgozó kiértékelők munkáját,
- támogassa azon munkákat amelyek a vizsgálatok teljesítőképességének elemzését helyezik előtérbe.

Ezen részprogrammal a több mint 20 évig tartó (1974-1995) PISC program lezárult, és helyét a hasonló célkitűzésekkel működő ENIQ vette át. A PISC program eredményeit sok más program is átvette, felhasználta, bizonyítva ezzel a vizsgálat létjogosultságát. A program koordinálói remélik, hogy lehetővé vált (vagy a közeljövőben lehetővé válik) a szerkezeti integritás meghatározásához szükséges adatok roncsolásmentes vizsgálatokkal történő - megfelelő pontosságú - meghatározása [48].

12. Miért a felületi hibák vizsgálata a fontosabb?

12.1. Bevezetés

A mikroelektronika rohamos fejlődése robbanásszerű változást idézett elő a roncsolásmentes vizsgálatok reprodukálhatóságának javulásában. Különösen igaz ez az ultrahangos vizsgálatokra, ahol mind a vizsgálat paraméterei, mind pedig a regisztrált jelek digitálisan tárolhatók, ebből következően egyrészt bármikor azonos feltételekkel a vizsgálatok megismételhetők, ill. újabb értelmezési módszerek megjelenésével a tárolt hibajelek információtartalma értékelhető. Hasonló fejlődés tapasztalható a radiológiai jelek digitális feldolgozásával, hisz a számítógép segítségével tárolt képek információtartalma ugrásszerűen megnőtt a hagyományos vizuális, esetleg "feketedésmérés" alapján végzett értékeléshez képest. Mindkét említett terület azonban olyan szakembereket kíván, akik járatosak egyrészt a roncsolásmentes vizsgálatok, másrészt a számítógépes technika területén. Hazánkban a roncsolásmentes vizsgálat kialakulása és felfutása az 50-es évek második felében indult meg és a "virágkorát" a 70-es években érte el. Ekkor számos igen jól képzett szakember tevékenykedett a nagyberuházásokat megvalósító hazánk iparában. E korra alapvetően radiológiai vizsgálatok és manuális ultrahangvizsgálatok jellemzőek. A bevezetőben említett "digitális bázisú" roncsolásmentes vizsgálatra való átállás napjainkban jelentős problémát jelent, hisz egyrészt egyetemeinken a roncsolásmentes anyagvizsgálat oktatására a tantárgyakban igen kevés idő jut, másrészt a korábban (10-15 éve) végzett és praktizáló szakemberek számítógépes ismeretei, ill. "affinitásuk" e területhez természetes emberi adottságból adódóan jelentősen elmarad a ma végzett hallgatók mögött. Ezek a nagy számok törvényei alapján tények, amelyek figyelmen kívül hagyása csupán "strucc-politika". Én meg vagyok győződve arról, hogy van a roncsolásmentes vizsgálatnak egy olyan területe, amely egyrészt igen-igen fontos, másrészt pedig a korábban végzett és napjainkban még praktizáló szakemberek ismeretei nagyon jól hasznosíthatók. Ez pedig a felületi vizsgálatok területe.

E rövid fejezetben egyrészt a felületi vizsgálatok fontosságára kívánom felhívni a figyelmet a törésmechanika gyakorlati alkalmazásának szemszögéből, másrészt rá kívánok mutatni arra, hogy a világ egyik vezető intézetének, a *The Welding Institute* tanfolyamaiban milyen döntő súllyal jelentkeznek a felületi vizsgálatok.

12.2. A hibák veszélyességének megítélése

Az teljesen nyilvánvaló, hogy a folytonossági hiányok közül legveszélyesebbek a **repedésszerű** hibák. Ezek környezetében kialakuló viszonyok a törésmechanika¹ elveinek alkalmazásával

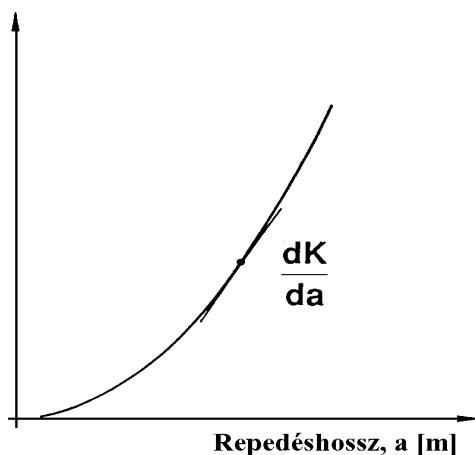
¹ Lásd pl. a TEMPUS S-JEP 11271 keretében elkészült következő anyagokat:

- G. PLUVINAGE: Lineáris törésmechanika
- KRÁLLICS Gy., LOVAS J., TATÁR L.: Fejezetek a nemlineáris károsodás- és törésmechanikából.

invariáns mennyiségekkel leírhatók (pl. feszültségintenzitási tényező, J-integrál, repedés kinyílás, stb.). Az anyagok repedés megindulásával szembeni ellenállása próbatesteken végzett vizsgálatokkal meghatározhatók, következésképpen biztonsági tényező értéke számítható a repedés figyelembételével is, amely nem más mint az anyagjellemző (a fenti mennyiségek kritikus, a repedés megindulásához tartozó értéke) és a repedés csúcs környezetének leírására használt mennyiség adott körülményekre vonatkozó értékének hányadosa. Amennyiben a roncsolásmentes vizsgálattal egy, vagy több repedést, repedésszerű hibát észlelünk természetes kérdésként jelentkezik az, hogy az mennyire veszélyes, ill. több repedés esetén melyik és hányszor veszélyesebb, milyen rangsort tudunk felállítani? Hogyan függ ez a terhelés jellegétől (statikus, avagy ismétlődő). E kérdések a bemutatásával szeretnék rámutatni arra, hogy a felületi hibák számottevően veszélyesebbek mint a belső hibák.

Kvázistatikus terhelésű szerkezeteknél a repedésszerű hiba környezetében kialakuló viszonyok jól jellemezhetők azon törésmechanikai mennyiségekkel, amelyek magukba foglalják a szerkezeti elem terhelését, geometriáját, a hibák alakját, méretét és elhelyezkedését, valamint az anyag jellemző tulajdonságait. Ilyen mennyiség pl. rideg anyag esetén a *feszültségintenzitási tényező (K)*. A feszültségintenzitási tényező az anyagjellemzők közül csak a rugalmassági modult tartalmazza, ezért a legkülönbözőbb kialakítású és terhelésű szerkezeti elemekben lévő repedések környezetében kialakuló feszültségintenzitási tényező számítható. Az 12.1. ábra egy adott terhelésű, adott geometriájú elemben kialakuló feszültségintenzitási tényező jellegét szemlélteti a repedés hosszának függvényében.

K [MPa√m]

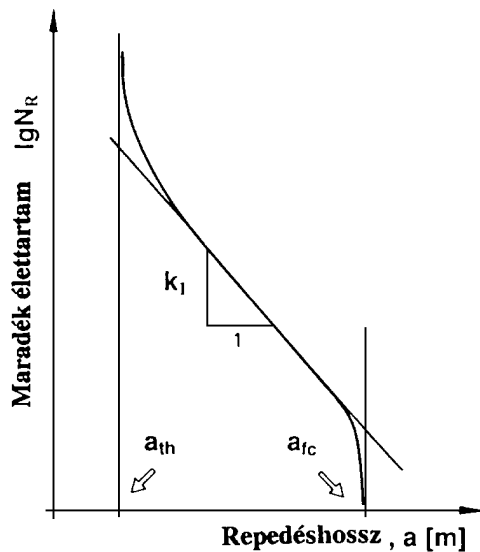


12.1. ábra

A feszültségintenzitási tényező jellege a repedéshossz függvényében egy adott geometriájú és terhelésű szerkezeti elemnél.

A 12.1. ábra kapcsán két megállapítást is tehetünk. Egyrészt azt, hogy minél meredekebb az adott pontban az érintő, annál nagyobb a hatása a feszültségintenzitási tényező változására a repedéshossz egységnyi növekedésének, azaz a biztonsági tényező erőteljesebben csökken. A derivált maga tehát a repedés veszélyességének - a szerkezeti elem *repedésérzékenysége* jellemzésére alkalmas, mivel ez minden esetben egy konkrét számérték. Egyszerű, pusztán számokkal jellemzett viszonyok összehasonlítása pedig egyszerű.

- LENKEYNÉ Biró Gy., J.G. BLAUDEL, L. HODULÁK, S. REÁLE: Az R6 módszer és Gyakorlati alkalmazása
- G. PLUVINAGE, TÓTH L.: Törésmechanikai példatár.
- TÓTH L.: A törésmechanikai alapelvei (VIDEO sorozat)
- LUKÁCS J.: A fáradásos repedésterjedés vizsgálata

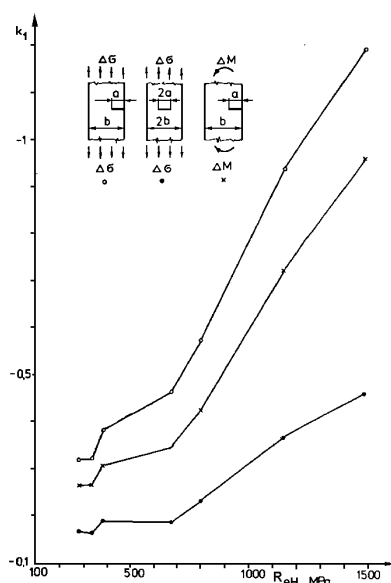


12.2. ábra

A maradék élettartam logaritmusának a repedéshossz függvényében ismétlődő terhelésű szerkezeti elemeknél

Az 12.1. ábra kapcsán tehető másik megállapítás pedig az, hogy a terhelés (a feszültség) növekedésével a hibák veszélyessége fokozódik. Mivel a feszültségintenzitási tényező értéke a terheléssel (feszültséggel) egyenesen arányos, a feszültség növekedésével a hiba veszélyessége is lineárisan növekszik. Részletes elemzésekkel az is kimutatható, hogy a felületi hibák a legveszélyesebbek éppen abból adódóan, hogy általában a felületi rétegben ébrednek a legnagyobb feszültségek (kivéve azokat az eseteket, amikor valamilyen módon maradós feszültségek is keletkeznek pl. hegesztés, hőkezelés, felületi képlékeny alakítás, stb.).

Az ismétlődő terhelésű szerkezeti elemek **repedésérzékenysége** is definiálható a repedéshossz egységnyi megváltozásával előidézett maradék élettartam változás segítségével. Ezt szemlélteti a 12.2. ábra, ahol a repedésérzékenységet a k_1 jelöli. A számszerűen kidolgozott példák közül 12.3. ábrán a különböző folyási határú anyagokból készült felületi és belső repedést tartalmazó húzott és hajlított elemek repedésérzékenysége látható, abban az esetben, ha az ismétlődő feszültség értéke a mindenkori folyási határ 75%-a.



12.3. ábra

A repedés terjedési érzékenységet általánosan tükröző k_1 értékek az azonos méretű, de különböző helyeken repedést tartalmazó húzott vagy hajlított, eltérő minőségű acélból készült lemezekre

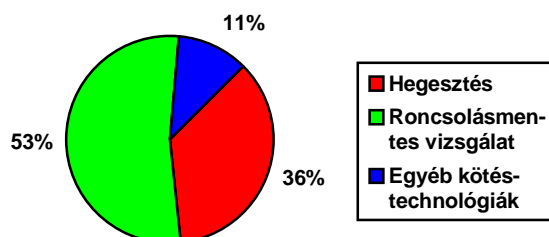
A 12.3. ábrát szemlélve megállapítható, hogy

- a felületi hibák lényegesen (2-2,5)-ször veszélyesebbek, mint a belsők,
- az anyagok szilárdságának növekedésével a szerkezeti elemek repedésérzékenysége növekszik,
- húzott szerkezeti elemekben a felületi repedés veszélyesebb, mint a hajlítótban.

Megítélésem szerint az előzők egyértelműen bizonyítják azt, hogy a felületi hibák veszélyesebbek mint az anyag belsejében lévők, következésképpen ezek vizsgálatára nagyobb gondot kell fordítani. Ennek nyilvánvalóan tükröződni kell abban is, hogy a szakemberek képzése kapcsán erre nagyobb gondot fordítanak.

12.3. Tanfolyamok tematikai megoszlása az angol hegesztési intézetben (The Welding Institute-TWI) 1996 évben

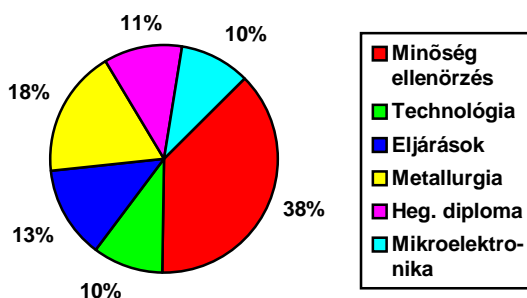
A világszerte ismert és elismert angol hegesztési intézet, The Welding Institute (TWI) 1996. évben 348 tanfolyamot hirdetett meg. Ezek tematikai megoszlását a 12.4. ábra szemlélteti.



12.4. ábra

A TWI tanfolyamok megoszlása *tematika* szerint (348 tanfolyam 1996-ban)

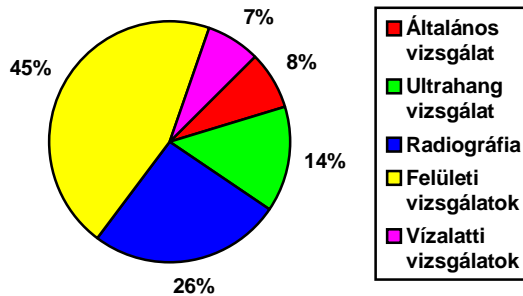
Az ábra jól szemlélteti, hogy a súlypontot a roncsolásmentes vizsgálatokhoz (53%) és a hegesztéshez (36%) kapcsolódó tanfolyamok adják. A hegesztésen belül meghatározó a minőségellenőrzéshez és a felügyelethez tartozó tanfolyamok száma (38%=48) tanfolyam. Ezt szemlélteti az 12.5. ábra.



12.5. ábra

A TWI tanfolyamok megoszlása *hegesztés* területén

A roncsolásmentes vizsgálatok közül a felületi vizsgálatok döntő súllyal rendelkeznek. Ezt híven tükrözi a 12.6. ábra. A számértékek összevetéséből az is látható, hogy a két "hagyományos", a radiológiai- és ultrahang vizsgálatához kapcsolódó tanfolyamok összesen kisebb arányt képviselnek mint önmagában a felületi vizsgálatok.



12.6. ábra

A TWI tanfolyamok megoszlása a
roncsolásmentes vizsgálatok területén

E tény egyrészt alátámasztja mindazt, amit a felületi hibák veszélyességének törésmechanikai elvek felhasználásával végzett elemzése kapcsán említettünk, másrészt azt, hogy a képzésben igenis nagy szerepet kell szánni a felületi hibák feltáráshoz, azok értékeléséhez kapcsolódó módszerekre. A hazai képzés struktúrájában is tükröződnie kell az előző szemléletnek.

12.4. Összefoglalás, következtetések

Az ismertetett megfontolások, a bemutatott eredmények és tapasztalatok birtokában az alábbi megállapítások tehetők:

1. A törésmechanika elvek következetes alkalmazásával lehetőség van a különböző repedésszerű hibák veszélyességének számszerű jellemzésére és ezáltal azok veszélyességének egyértelmű rangsorolására.
2. A felületi hibák számottevően veszélyesebbek, mint a belső hibák.
3. A felületi vizsgálatok szerepe az előzőkből következően jelentős, amire a roncsolásmentes vizsgálatokhoz kapcsolódó hazai képzések szervezése, tematikáinak kidolgozása kapcsán nagyobb hangsúlyt kell fordítani.
4. A világszerte ismert és elismert *The Welding Institute* által szervezett 1996. évi tanfolyamok tematikaiban az előzőekben tett megállapítások maradéktalanul tükröződnek.
5. A jól felkészült, hosszú ideje roncsolásmentes vizsgálatokkal foglalkozó, számítógépes ismerteket nehezebben befogadó szakemberekből a felületi vizsgálatokat végzők igen nívós csoportja alakítható ki hazánkban.

13. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **TÓTH L.:** Repedést tartalmazó szerkezeti elemek megbízhatósága ismétlődő terhelés esetén. Akadémiai doktori értekezés, 1994.
- [2] **TÓTH L. - LIZÁK J.:** Szerkezeti elemek üzemeltethetőségének megítélése törésmechanikai módszerekkel, *Gépgyártástechnológia*, 1996. XXXVI. Évf. 5. p. 47-52
- [3] **LIZÁK J. - TÓTH L.:** Törésmechanikára alapozott biztonságtechnikai elemzés, *Gépgyártástechnológia*, 1996. április, p. 25-28
- [4] Ultrasonic Nondestructive Testing, Monograph No. 9, The Institute of Metals, UK, 1988
- [5] Office of Nondestructive Testing, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD, USA, 1990
- [6] „Ultrasonic Testing,” CT-6-4, American Society for Nondestructive Testing, 1983
- [7] Nondestructive Testing, ASME Handbook, ASM International Publication, 1994
- [8] „Demagnetization Techniques” (Videoszalag leírással), A. Lindgren, L&L Consultants, Inc., 1629 Eddy Lane, Lake Zurich, IL 80047, 1991
- [9] **P. MCINTIRE:** Nondestructive Testing Handbook, Vol. 6., Magnetic Particle Testing, 2nd ed., American Society of Nondestructive Testing, 1989
- [10] **W.D. RUMMEL, D. H. TODD, S.A. FRESCKA, R.A. RATHKE:** „Detection of Fatigue Cracks by NDT”, CR-2369, National Aeronautics and Space Administration, 1974
- [11] **C.E. BETZ:** „Principles of Penetrants”, Magnaflux Corp., Chicago, 1963
- [12] **H. BERGER, Ed.:** Nondestructive testing Standards: A Review, STP 624, ASTM, 1976
- [13] **R.T. FICKER:** Mater Eval., Vol 31. Sept. 1972, p.200
- [14] **R.J. LORD AND J.A. HOLLAWAY:** Mater. Eval., Vol 34. Oct. 1975, p.249
- [15] ASM Handbook, Vol. 17. Nondestructive Evaluation and Quality Control, 1987
- [16] Reliability of Ultrasonic Testing, Insight, Vol. 39., 1997. 3., p. 156-157.
- [17] **J. BOOGAARD, G.M. VAN DIJK:** NDT Reliability and product quality, NDT & E International, Vol. 26. Number 3. 1993. p. 149-155
- [18] **S. CRUTZEN, F. FRANK, L. FABBRI, P. LEMAITRE:** Compilation of NDE effectiveness data, JRC Petten, The Netherlands, Kiadás alatt
- [19] **G.M. VAN DIJK, J. BOOGAARD:** ‘NDT reliability - a way to go’ Proceedings 13th WCNDT Sao Paulo, Brazil (1992) pp. xxxi-xliii
- [20] **SPENCER H. BUSH:** Reliability Strategies in Flaw Evaluation, in Non-destructive Evaluation: Microstructural Characterisation and Reliability Strategies, The Metallurgical Society of AIME, p. 70., 1981
- [21] Stress Intensity Factors Handbook (1987), Edited by Y. Murakami, Pergamon Press
- [22] **SAVRUK M.P.:** Stress Intensity Factors of Bodies Having Cracks, Fracture Mechanics and Strength of Materials, 1988. Vol. 2. Edited by V.V. panasjuk, Naukova Dumka, Kiev (orosz nyelvű)

- [23] **SIH, G. C.:** Handbook of Stress-Intensity Factors for Researchers and Engineers, Leigh University, Bethlehem Pa., 1973
- [24] **ROOKE, D.P., CARTWRIGHT, D.J.:** Compendium of Stress Intensity Factors, Her Majesty's Stationery Office, London, 1976
- [25] **TADA H., PARIS P.C., IRWIN G.R.:** The Stress Analysis of Crack Handbook, Del Research Corp., Hellertown, Pa., USA, 1973
- [26] **ROLFE, S., BARSOM, J. :** Fracture and Fatigue Control in Structures, Applications of Fracture Mechanics, Prentice Hall, Inc., 1979
- [27] **CRUTZEN, S.:** PISC I and PISC II, Looking for Effective and Reliable Inspection Procedures, In: Qualification of Inspection Procedures, Edited by E. Boorlo, P. Lemaitre, Kluwer Academic Publishers, p. 79-106., 1989
- [28] First evaluation of the PISC-II trials results, PISC II Report No. 5 - June 1985, JRC Petten, The Netherlands
- [29] PISC II: Parametric Study on the Effect of Equipment Characteristic (EEC) on Detection, Location and Sizing, First Evaluation of the Measurement Results, JRC Petten, The Netherlands, 1989
- [30] **E. BOORLO:** Parametric Studies on the Effect of Equipment Characteristic (EEC) on Detection, Location and Sizing, Preliminary Report, 1986 JRC Petten, The Netherlands
- [31] **F. LAKESTANI, F. MERLI, E. BOORLO:** Parametric Studies on the Effect of Equipment Characteristic (EEC) on Detection, Location and Sizing, Final Report , 1987 JRC Petten, The Netherlands
- [32] **S. CRUTZEN, R. NICHOLS ET AL.:** The Major Results of PISC II., Nuclear Engineering and Design, Vol. 8 (1988).
- [33] **P.G. HEASLER, T.T. TAYLOR, S.R. DOCTOR:** Statistically Based Reevaluation of PISC-II Round Robin Test Data, Prepared for Division of Engineering, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC., 1990
- [34] **CRUTZEN, S.:** PISC III Status Report, In: Non-destructive Examination, Practice and Results, State of the art and PISC III Results, Ed.: E. Borloo, P. Lemaitre, JRC Petten, The Netherlands, 1995
- [35] Impact of PISC Results on Codes, Standards and Industrial Practice, The Materials Challenge, News Bulletin of the Institute for Advanced Materials, JRC Petten, The Netherlands, 1997. June, Vol. 10. p. 4-6.
- [36] **CRUTZEN, S.:** Influence of Defect Characteristics on Inspection Performance, Proc. 8th International Conference on NDE in the Nuclear Industry, Orlando, November 1986.
- [37] **LAKESTANI F.:** Validation of Mathematical Models of the Ultrasonic Inspection of Steel Components. EUR Report 14673 EN, PISC III Report No. 16., 1989
- [38] PISC Report No. 20., Evaluation of the Inspection Results of the Safe-End Areas of PISC III Assembly No. 20, CEC JRC, OECD NEA/CSNI, 1995
- [39] PISC Report No. 24., Evaluation of the Inspection Results of the Safe-End Areas of PISC III Assembly No. 24, CEC JRC, OECD NEA/CSNI, 1995
- [40] PISC Report No. 25., Evaluation of the Inspection Results of the Safe-End Areas of PISC III Assembly No. 25, CEC JRC, OECD NEA/CSNI, 1995

- [41] **P. LEMAITRE, T. D. KOBLÉ, S. R. DOCTOR** Summary of the PISC round robin results on wrought and cast austenitic steel weldments, part I: wrought-to-wrought capability study, The International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 69. No.1. November 1996, p. 5-19.
- [42] **P. LEMAITRE, T. D. KOBLÉ, S. R. DOCTOR** Summary of the PISC round robin results on wrought and cast austenitic steel weldments, part II: wrought-to-cast capability study, The International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 69. No.1. November 1996, p. 21-32.
- [43] **P. LEMAITRE, T. D. KOBLÉ, S. R. DOCTOR:** Summary of the PISC round robin results on wrought and cast austenitic steel weldments, part III: cast-to-cast capability study, The International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 69. No.1. November 1996, p. 33-44.
- [44]. Human Reliability in Inspection, Final Report on Action 7 in the PISC III Programme, In: Non-destructive Examination, Practice and Results, State of the art and PISC III Results, Ed.: E. Borloo, P. Lemaître, JRC Petten, The Netherlands, 1997, p.: 99-102
- [45]. **C. BIRAC, R. COMBY, G. MACIGA, U. VON ESTORFF, G. L. ZANELLA:** The PISC Programme on Defective Steam Generator Tubes Inspection, A Status Report, In: Non-destructive Examination, Practice and Results, State of the art and PISC III Results, Ed.: E. Borloo, P. Lemaître, JRC Petten, The Netherlands, 1995, p.: 75-84
- [46] **C. BIRAC:** Final Report in the Inquiry for the Preparation of the Programme of the PISC III Action No.5: Steam Generator Tubes Testing (SGT), PISCDOC (87) 2., 1987
- [47] Watkins B.: Workshop on Steam Generator Integrity, CSNI-PWG 3 PISCDOC (89) 42Rev., 1989
- [48] **G. ENGL:** Inspection Qualification Strategies as Developed in PISC III Action 8 and in ENIQ, Part I - Overall Process, In: Qualification of Inspection Procedures, Edited by E. Boorlo, P. Lemaître, Kluwer Academic Publishers, p. 41-49., 1993
- [49] **REALE S., TOGNARELLI L.:** Structural Integrity Approach for PISC Results Evaluation and Comparison: PISC III Action 3, In: Non-destructive Examination, Practice and Results, State of the art and PISC III Results, Ed.: E. Borloo, P. Lemaître, JRC Petten, The Netherlands, 1997, p.: 105-124
- [50] **PH. DOMBRET:** PISC III Results on Action 3 „Nozzles and Dissimilar Welds”, In: Non-destructive Examination, Practice and Results, State of the art and PISC III Results, Ed.: E. Borloo, P. Lemaître, JRC Petten, The Netherlands, 1995, p.: 21.
- [51] **TÓTH L.:** Szerkezetek megbízhatósága. Törésmechanika-roncsolásmentes vizsgálat. Anyagvizsgálók Lapja. 1994/3. p. 67-70.
- [52] **TÓTH L.:** Szerkezetek integritása-Roncsolásmentes vizsgálatok megbízhatósága. Anyagvizsgálók Lapja. 1995/1. p.8-10.
- [53] **TÓTH L.:** Hegesztett kötések megbízhatósága, a hibák veszélyességének megítélése. Hegesztéstechnika. 1995/4. p.3-7.
- [54] **S. CRUTZEN, P. LEMAITRE, M. BIÉTH:** General lessons learnt from round robin qualifications tests relating to non-destructive examination. Pressure Vessels and Piping. 75 (1998) p. 417-427.