

## ANYAGSZERKEZET-VIZSGÁLAT

## INVESTIGATION OF STRUCTURE

Az LHC ÚJ RÉSZECSKÉJE - EREDMÉNYEK ÉS FELADATOK

SIKLÉR FERENC

**Kulcsszavak:** atomok, elektronfelhő, kvark, bozon, LHC, Higgs-mező, Higgs-bozon

A körülöttünk levő világ alapvető építőkövei az atomok, melyek egy parányi atommagból, valamint az őket körülvevő elektronfelhőből állnak. Az atommagok erősen kötött protonok és neutronok alkotják, melyek maguk is összetett objektumok: két  $u$  kvark és egy  $d$  kvark egy protont, egy  $u$  és két  $d$  kvark pedig egy neutront eredményez. Jelenleg úgy gondoljuk, hogy a tört töltésű ( $+2/3$  illetve  $-1/3$  elektrontöltés) kvarkok és az elektronok már tényleg elemi, pontszerű részecskék.

A részecskefizika "periódusos rendszere" 18 részecskét és 12 antirészecskét tartalmaz. Az anyagi világot a feles sajátperdületű (spin) leptonok és kvarkok építik fel. A legkönnyebb töltött lepton az elektron, de van még két, nagyobb töltésű testvére is (a müon és a tau-lepton). Mindegyik leptonhoz tartozik egy-egy nagyon kis tömegű neutrínó. A fent említett  $u$  és  $d$  kvarkon kívül még négy, nagyobb tömegű kvarkot is találunk:  $s$ ,  $c$ ,  $b$ ,  $t$ . Ez utóbbi top-kvark tömege a proton tömegének mintegy 190-szerese.

A részecskék közötti kölcsönhatásokat egész sajátperdületű részecskék (bozonok) közvetítik. Ilyenek az elektromágneses kölcsönhatás fotonja, a gyenge kölcsönhatás nehéz  $W^+$ ,  $W^-$  és  $Z^0$  részecskéi (tömegük a protonénak 85- illetve 95-szerese), valamint az erős kölcsönhatásért felelős gluon. A feltételezett Higgs-mező (valamint a Higgs-bozon) szerepe kettős: egyrészt teljessé teszi az elektromágneses- és gyenge kölcsönhatások egységét, valamint gondoskodik a fent említett elemi részecskék tömegéről. Ebbe a képbe a sokkalta gyengébb, de sokkal nagyobb hatótávolságú tömegvonzás egyelőre nem illik bele, feltételezett közvetítő részecskéjét, illetve a gravitációs hullámokat még nem sikerült kísérletekkel kimutatni. Szabad kvarkot nem figyelhetünk meg: csak kötött állapotban hármásával (barionok), valamint kvark-antikvark formában (mezonok) fordulnak elő. Antianyagot akkor kapunk, ha a barionok kvarkjait antikvarkokra cseréljük.

A környezetünkben csak stabil részecskéket látunk, a nagyobb tömegű vagy rövid élettartamú társaik megfigyelése érdekében részecskegyorsítókra van szükségünk: a nagy energiájú ütközések során a kezdeti mozgási energia egy része új részecskék keltésére fordítódik ( $E=mc^2$ ). Sokunk-

nak van részecskegyorsítója otthon: a katódsugárcsöves televíziókban a katódról kilépő elektronok az elektromos tér hatására gyorsulnak, a mágneses térben megfelelően eltérülnek, majd a fluoreszcens ernyőn képet hoznak létre. Egy részecskegyorsító működése nagyon hasonló, azzal a különbséggel, hogy az alkalmazott tér nem 10 kilovolt, hanem a gigavolt nagyságrendjébe esik, valamint a gyorsítandó részecske lehet proton, vagy nehéz atommag is.

Egy kör alakú gyorsító viszonylag rövid szakaszán találjuk a gyorsító üregeket. Bennük a teret üregről üregre az áthaladó részecskecsomagok sebességéhez kell hangolnunk, így végeredményben egy pontosan beállított rádiófrekvenciás térre van szükségünk. Minden egyes lefutott kör után kicsit gyorsítunk a részecskéken, maga a körgyűrű csak arra szolgál, hogy a részecskecsomagokat ismét visszahozza a gyorsítás helyére. A körpályán tartáshoz nagy mágneses terű dipólmágnesekre van szükség, a Lorentz-erőt használjuk. Az egymással szembe haladó nyalábok akár ezer milliárd részecskét is tartalmazhatnak, de ahhoz, hogy több ütközést is láthassunk, a nyalábokat nagyon kicsire (akár 10 mikron átmérőjűre) kell összenyomnunk. Ezt a feladatot a több helyen beiktatott fókuszáló hatású kvadrupólmágnesekkel végezzük el.

A Nagy Hadronütköztető (Large Hadron Collider, LHC) a Genf melletti Európai Részecskefizikai Laboratóriumban (CERN) található, a svájci-francia határon. Magyarország 1992 óta tagja a CERN-nek, ennek az óriási nemzetközi szervezetnek. Az LHC kerülete 27 km, a föld alatt átlagosan 100 m mélyen fut egy 4 m átmérőjű alagútban. A protonnyalábok végenergiája jelenleg 4 teraelektronvolt (TeV), más szóval mozgási energiájuk a tömegüknek több, mint 4000-szerese. A fénysebességtől alig eltérő sebességű nyalábok élettartama 10-20 óra. A gyorsító üregek (nyalábokként 8) 400 MHz-en működnek, gyorsító terük méterenként 5 MV. Az LHC-t nagyrészt az 1232 darab, egyenként 15 m hosszú, 35 tonnás szupra-vezető dipólmágnes alkotja. Teljes mágneses tér (mintegy 5 Tesla) esetén mindegyikük 1,3 GJ energiát tárol. A nyalábcsőben a mágneses teret nióbbium-titán tekercsekkel állítjuk elő, melyeket nem-mágneses ausztenit tart a helyén. A mágnesek 1,8 K hőmérsékleten működnek, így az LHC nyalábcsövében még a világűrnel (2,7 K) is hidegebb van. A gyűrű hatalmas térfogatát kell hűteni

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont RMI, Budapest-  
A VIII. RAKK-on előadás rövidített változata

(több ezer kW hűtőteljesítmény), melyre a kezdeti nitrogénes előhűtés után folyékony héliumot használunk. A nyalábcsőben nagy vákuumra van szükség ( $10^{-10}$  Torr), amely megfelel a Föld felszínétől 1000 km magasban uralkodó viszonyoknak. Különös feladatot jelentett a 3 MA áram – felszíni forrásokból szupravezető mágnesekbe való – több lépcsős levezetése is. Teljes betöltöttség mellett a gyűrűben 2800 protoncsomag fér el, nyalábokként. A vékony nyalábcsomagok 25 ns-onként találkoznak, amikor több tíz, de akár 80 proton-proton ütközés is létrejöhet. Fontos megjegyeznünk, hogy LHC egy hosszú gyorsítási folyamat utolsó lépcsője, melyet több előgyorsító előz meg (Linac, PS Booster, PS, SPS), mindig többszörösére növelve a belőtt nyalábok energiáját.

A nyalábok a gyűrű négy pontján vihetők ütközésbe, melyek köré négy nagy (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb) és két kisebb detektorrendszert (Totem, LHCf) építettek. A CMS (Compact Muon Solenoid) detektor célja a Higgs-bozon megtalálása, valamint új, eddig nem ismert fizika felfedezése. A kölcsönhatási pontot több rétegben nagyon jó helyfelbontású, szilícium alapú félvezető detektorok veszik körül, ezek rögzítik az ütközésben keletkező töltött részecskék pályáját. Ezek a vékony, mintegy 300 mikron vastagságú rétegek p-n átmenettel rendelkező diódák inverz kapcsolásban. A töltött részecske áthaladása során elektronlyuk párokat kelt, melyeket elektromos térrel olvasunk ki. A detektor 3,8 T mágneses térben található, a pályák görbületének iránya és mértéke egyértelműen megadja a részecskék elektromos töltését, valamint impulzusát. A kijebbe elhelyezkedő kaloriméterek javarészt ólom-wolframát kristályokból állnak. A töltött és semleges részecskéket lelassítják, elnyelik, energiájukat – párkeltéssel és fékezési sugárzás során – fényjelekké alakítják, így megméri teljes energiájukat. A szolenoid mágnesen kívül található a müonok érzékelésére szolgáló kamrák.

Magyarországról a budapesti Wigner Fizikai Kutatóközpont, a debreceni ATOMKI és a Debreceni Egyetem kutatói vettek és vesznek részt a kísérlet detektorainak megépítésében és működtetésében, az adatok kiértékelésében és publikálásában. Csoportunk végzi a belső félvezető detektor időbeállítását, kalibrációját, a szenzorok és a kiolvasó chip hatásfokának nyomon követését. Hasonlóan fontos a detektor, valamint a müon kamrák helyének figyelése, a megfelelő paraméterek igazítása, melyet nagy pontosságú LED-es mérésekkel, majd szoftveres optimalizálással, a felvett pályák ismételt kiértékelésével végzünk el. Az adatfeldolgozás számítástechnikai háttérét az LHC Computing Grid szolgáltatja, amely az egyes intézetekben működő, egymással összekapcsolt

számítógép-klaszterek együttesét jelenti. Ez év júniusában adták át a Wignerben működő új adatközpontot, mely kiemelt szerepet fog játszani az LHC-ből ömlő adatok feldolgozásában és kezelésében. Csoportunk vezető szerepet játszott az első adatok feldolgozásában: feladatunk a keltett töltött részecskék szög- és impulzuseloszlásának meghatározása volt. Jelenleg is aktívan részt veszünk az erős kölcsönhatás, és a forró maganyag tanulmányozásában.

A fizikusokat mindig vonzotta a világban megfigyelt erők egyesítése, annak megmutatása, hogy a látszólag nagyon eltérő kölcsönhatások egy közös őstől eredhetnek. Az elektromágneses és gyenge kölcsönhatások egyesítése a feltételezett, négykomponensű Higgs-mezővel lehetséges. A mező értéke kezdetben nulla volt, egy metastabil állapotban nyugodott, majd az Ősrobbanás után egy kicsivel "elvándorolt", legurult a sokkal kedvezőbb potenciális energiájú völgybe (mexikói kalap alja), ahol nagysága a ma ismert értéket vette fel (spontán szimmetriasértés). A Higgs-mező négy komponensből pedig létrejött a tömeg nélküli foton, az 1983-ban kimutatott gyenge  $W^+$ ,  $W^-$  és  $Z^0$  bozonok. Ha a fenti elmélet igaz, akkor maradnia kellett még egy komponensnek (skalár), amely a Higgs-bozon. A mezőt Kibble, Guralnik, Hagen, Englert és Brout javasolták közel egy időben (1964), a bozont Peter Higgs ugyanakkor. Az elektrogyenge egyesítést 1968-ban fogalmazta meg Glashow, Salam és Weinberg, melyért 1979-ben Nobel-díjat kaptak.

A Higgs-bozon tömegére csak következtethetünk, meghatározásához mindenképpen mérésekre volt szükség. A kisebb energiás mérésekkel (a Tevatron Amerikában, a LEP a CERN-ben) egyre nagyobb tömegtartományokat tudtunk kizárni: abban biztosak lehettünk, hogy ha létezik, tömege 114 GeV-nél biztosan nagyobb. Proton-proton ütközésekben LHC energiákon leginkább két gluon egyesülése, valamint az ütközésben keltett  $W$  és  $Z$  bozonok fúziója során kelthetünk Higgset. A bozon nagyon gyorsan elbomlik, a sokféle bomlási csatorna közül a két fotonos, valamint a  $ZZ^*$ -on keresztül négy leptonra való bomlások megfigyelése ígéretes legegyszerűbbnek. A végállapot részecskék energiáinak és impulzusainak megfelelő összegzésével a kezdeti részecske tömege meghatározható. Ha a megfigyelt részecskék valóban ugyanannak a bozonnak a bomlásából származtak, a tömeg oszlopdiagramjában egy csúcsot kell kapnunk. Ha nem, akkor egy lapos, vagy legalábbis sima háttérrel várunk.

Mind a két fotonos, mind a négy leptonos bomlási csatornában egy-egy meggyőző csúcsot kaptunk egyaránt 125 GeV-nél, a kombinatorikus háttér felett. Az ATLAS és CMS adatai egymást

megerősítve vezettek el a 2012. július 4-i genfi bejelentéshez: egy új bozon találtunk, melynek jellemzői egyelőre jó egyezést mutatnak a feltételezett Higgs-bozonnal. A részecske a protonnál mintegy 130-szor nehezebb, vagyis hasonló a xenon vagy cézium magjának tömegéhez.

A Higgs-bozon illetve a -mező megléte sok kérdést tisztáz. Megmutatja, hogy a részecskefizikai elképzeléseink (Standard Modell) alapvetően helyesek, a többi elmélet megbukott. Az ismert elemi részecskék tömegüket a mezőhöz való kapcsolódástól nyerik. A Higgs-bozon az első nulla sajátperdületű közvetítő részecske. Egyesek feltételezik, hogy a mező kapcsolatban lehet a világegyetem kezdeti felfúvódásával (infláció). Sőt, akár az is elképzelhető, hogy a mező kezünkbe adhatja a kulcsot a többi, még nem egyesített kölcsönhatás (erős, tömegvonzás) közös kezeléséhez is.

A munka azonban közel sem ért véget. Bár a Higgs-bozon sajátperdülete nagy valószínűséggel 0 és nem 2, egy másik belső jellemzője, a paritása még nem dönthető el teljes bizonyossággal. Kissé gyakrabban bomlik két fotonra, de ez az eltérés akár statisztikus fluktuációkkal is magyarázható. Összefoglalva, ahhoz, hogy teljes bizonyossággal nyilatkozhassunk, még több adatra, mérésekre van szükségünk.

A sikerek mellett maradt még jó pár megoldatlan probléma is: a mikrovilágot leíró kvantumelmélet és a tömegvonzás összeegyeztetése; a világunk nagyobb részét alkotó sötét anyag mibenléte; a világ gyorsuló tágulását eredményező sötét energia megértése; az ismert kölcsönhatások nagy egyesítése. Az LHC a két éves nagyjavítás után 2015 elején indul újra, duplázott nyalábenergiával és nagyobb nyalábbintenzitással.

## [AZ ELŐADÁS ÁBRÁI](#)

RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLAT – KIHÍVÁSOK ÉS VÁLASZOK

TRAMPUS PÉTER

**Kulcsszavak:** mérnöki szerkezetek, roncsolásmentes vizsgálatok, atomerőművek, műszaki fejlődés, kockázat

**BEVEZETÉS**

A VIII. Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Konferencia és Kiállítás mottójául a szervezők a következőt választották: „Az anyagvizsgálat nem cél, hanem eszköz.” A célhoz vezető utat megkönnyíti, ha megfelelő eszközök állnak rendelkezésünkre. Előadásunkban megkíséreljük a roncsolásmentes vizsgálatot, mint eszközt a célok tükrében elemezni. Célok alatt a roncsolásmentes vizsgálatot alkalmazó környezet igényeit értjük. Megvizsgáljuk napjaink és az elkövetkező időszak céljait, azaz a vizsgálatokat alkalmazó környezet támasztotta igényeket, majd arra keressük a választ, hogy milyen eszközökkel érhetők a célok, azaz milyen választ ad a roncsolásmentes vizsgáló társadalom (fejlesztők, vizsgálók, készülékgyártók) a környezeti kihívásokra.

Vizsgálódásunkat a mérnöki szerkezetekre és azok elemeire / alapanyagra korlátozzuk. Általánosságban úgy fogalmazhatunk, hogy a roncsolásmentes vizsgálatok célja a mérnöki szerkezetek használatra alkalmas állapottól való eltéréseinek a felderítése. Az eltérések lehetnek folytonossági hiányok (repedés, gázhólyag, zárvány, varrat összeolvadási hiány), de lehetnek szövetszerkezeti inhomogenitások, vastagság csökkenés, deformáció, stb. A roncsolásmentes vizsgálat elvégzését egyidejűleg két különböző cél vezérli. Az egyik az ember és a környezet védelme abban az esetben, amikor a mérnöki szerkezet vagy annak egy eleme, roncsolásmentes vizsgálat által fel nem derített eltérés következtében tönkremegy (törik, lyukad) és a tönkrement szerkezet vagy létesítmény veszélyforrás a környezetére nézve. Ezt akár „társadalmi” célnak is felfoghatjuk. A másik cél a vizsgált szerkezet vagy létesítmény teljesítőképességének, teljesítmény kihasználásának optimalizálását szolgálja, ami nyilvánvaló „üzleti” cél. E két cél könnyen ellentmondásba kerül egymással, és miután ez megnehezíti a roncsolásmentes vizsgálat valódi értékének a meghatározását, elbizonytalaníthatja egy vizsgált létesítmény üzemeltetőjét (pl. visszafogott lesz új technika alkalmazásával kapcsolatban).

A képet árnyalja a vizsgálatot elrendelő (hatóság) és a vizsgálatot elvégeztető (üzemeltető) közötti ellenérdekeltség, amennyiben a talált

eltéréseket kezelni kell, pl. javítás útján. Ha a vizsgálat nem talált eltérést, annak nincs következménye – függetlenül attól, hogy ténylegesen van-e eltérés (hiba) vagy nincs. Köszönhetően a szabványok konzervativizmusának, ha nem történik meghibásodás, akkor az esetek többségében soha nem derül ki, hogy volt-e, van-e „hiba”. Új technika bevezetése mindig a vizsgálat érzékenységeinek a növekedésével, tehát kényszerű módon több eltérés detektálásának a lehetőségével jár.

Ezeket a gondolatokat azért bocsátottuk előre, hogy rávilágítsunk arra, hogy a roncsolásmentes vizsgálatok fejlődését sok tényező befolyásolja (bővebben erről lásd [1]). Itt elsősorban a vizsgált szerkezet, létesítmény üzemeltetőjének a szempontjait vettük figyelembe, de ne feledjük el, hogy ettől eltérő szempontjai lehetnek még a vizsgálatot szolgáltatásként végző cégeknek és megint mások a vizsgáló készülékek fejlesztőinek és gyártóinak.

**AZ IGÉNYEK - HELYZETELEMZÉS**

Az utóbbi évtizedek alapvető törekvése a mérnöki szerkezetek **teljesítőképességének növelése**, ami kihasználtságuk fokozásához vezet. A teljesítőképesség növelésével egyidejűleg, illetve részben annak feltételeként jelentősen csökken a szerkezetek súlya. Erre a 2. ábra mutat egy példát. Az ábrán az autóiparban újabban alkalmazott (Nb, Mo mikroötvöztetésű), növelt folyáshatárú acélok alkalmazásával elérhető súlycsökkenés látható [2]. Ez a tendencia értelemszerűen fokozza a roncsolásmentes vizsgálatokkal szemben támasztott követelményeket, másrészt – más szerkezeti anyagok, pl. könnyűfém ötvözetek, kompozitok, keramikus anyagok alkalmazásának megjelenése – új vizsgálati feladatokat is megfogalmaz.

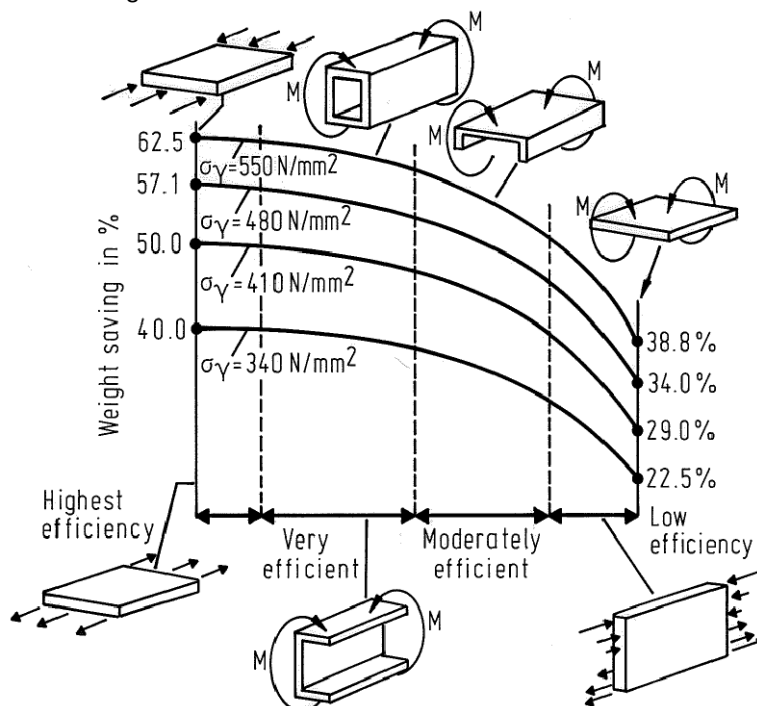
A nagy értékű és egyúttal nagy kockázatú **létesítmények öregednek**, de további folyamatos használatukra szükség van, ami a biztonsági tartalékaik fokozatos csökkenéséhez vezet. Az USA olajfinomítóinak és csővezetékeinek az átlag életkora meghaladja a 40 évet és teljes kihasználtsággal üzemelnek [3]. Nyilvánvaló – egyéb öregedési mechanizmusok mellett – a korrózió előrehaladott állapota ebben a korban. Ha a világ atomerőműveinek a korfáját vizsgáljuk, 2. ábra, láthatjuk, hogy a ma üzemelő reaktorok 50%-ának az üzemideje meghaladja a 27 évet, ami közelíti vagy már elérte a tervezett üzemidőt. Világtendenciává vált az atomerőművek üzemidő hosszabbítása,

Prof. Trampus Péter, MAROVISZ

A VIII. RAKK-on elhangzott előadás írott változata

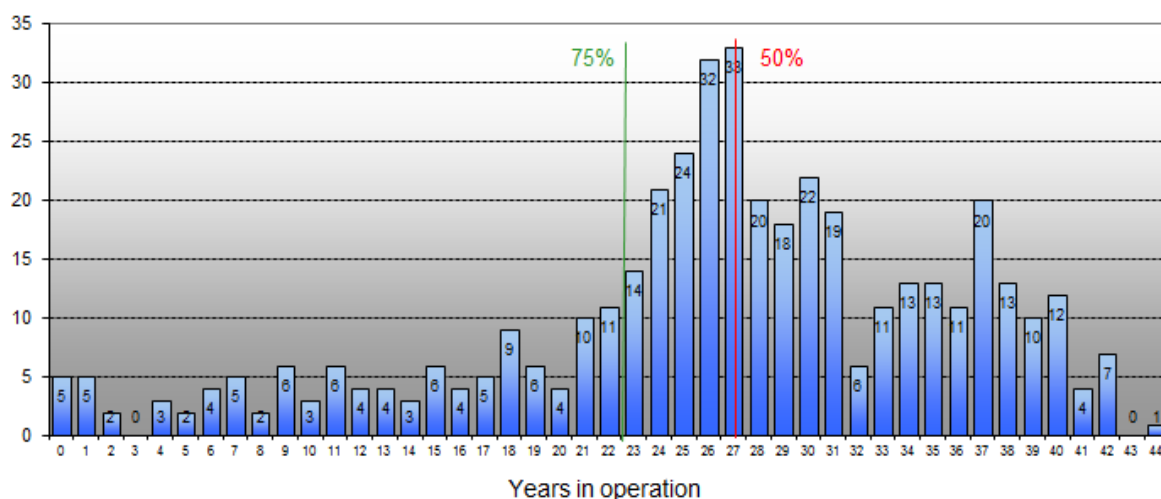
aminek a legalapvetőbb műszaki feltétele a berendezések szerkezeti integritásának biztosítása a meghosszabbított üzemidő végéig. Mindkét ipari szegmens esetében (és ezek csak példák) nyilvánvaló a roncsolásmentes vizsgálatok kiemelt és

egyre növekvő jelentőségű szerepe. Álljon itt ennek bizonyítására két példa.



1. **ábra.** Súlycsökkentés lehetősége nagyszilárdságú acélok alkalmazásával, különböző terhelési körülmények esetén [2]

Number of operational reactors by age



2. **ábra.** A világon üzemelő atomerőművek kora, 2011. december 31. [4]

A 3. ábra az USA Washington államában 1999-ben bekövetkezett, három halálos áldozatot követelő és jelentős környezet szennyeződést kiváltó gázvezeték robbanás következményeit mutatja. A robbanás közvetlen kiváltó oka

az volt, hogy egy földmunkagép megsértette a csővezetékét. Az esemény kivizsgálása szerint jelentősen hozzájárult a robbanás bekövetkezéséhez a csővezeték előrehaladott korróziója.

A 4. ábrán a japán Mihama atomerőmű tápvízvezetékén 2004-ben bekövetkezett felszakadás látható. Az esemény négy ember halálát és többek sérülését okozta. A csővezeték eredetileg 10 mm falvastagsága áramlás segítette korrózió következtében 1,5 mm-re csökkent. A károsodási folyamat megfelelő vizsgálattal időben észlelhető lett volna, ha a csővezetéknek ez a kritikus szakasza (mérőperem közelsége, lásd a képen) része lett volna az időszakos ellenőrzési programnak. Sajnálatos módon nem volt az.



3. ábra. Acéli csővezeték robbanás, USA, Bellingham, WA, 1999



4. ábra. Atomerőmű tápvízvezeték felszakadása, Mihama, Japán, 2004

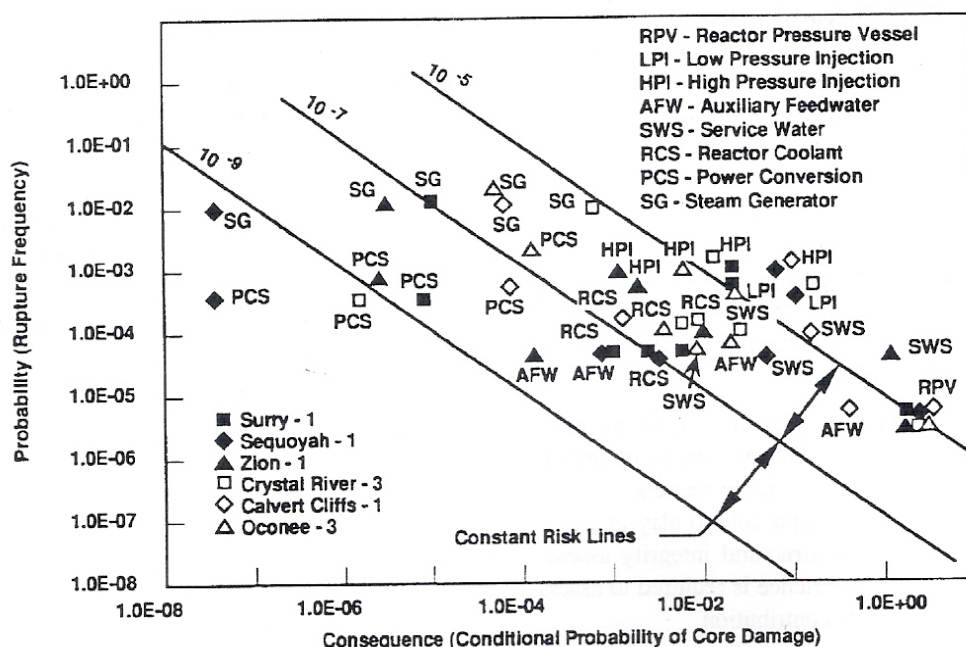
Mai tudásunk és tapasztalatunk alkalmas az ismert öregedési mechanizmusok (korrózió,

fáradás, erózió, stb.) felismerésére, elkerülésére, lassítására. Roncsolásmentes vizsgálatainkat is ezek függvényében választjuk meg és minősítjük. Nem szabad azonban megelégedni arról, hogy a létesítmények üzemidejének meghosszabbításával az ismert öregedési mechanizmusoktól eltérő, korábban nem ismert és így nem várt jelenségek is felléphetnek. Ezekre fel kell készülni.

Mindezekkel párhuzamosan, de részben mindezek következményeként is, változik a világ **biztonsággal kapcsolatos felfogása**. Csökken a társadalom által elviselt kockázat, és ez a hatóságokat, amelyeknek az a feladata, hogy a biztonságot függetlenül verifikálja a közvélemény felé, a biztonsági követelmények fokozatos szigorítására kényszeríti. Ez is a roncsolásmentes vizsgálatok szerepét helyezi előtérbe. Másrészt egyre több hatóság magatartásában jelenik meg a **kockázati szempontok figyelembe vétele**, ami azt jelenti, hogy a vizsgálati ráfordításokat a nagyobb kockázatú helyekre csoportosítják át és a vizsgált berendezéseket elfogadható kockázati sorrendbe állítják. Ez így még akár a vizsgálatok mennyiségének a csökkenését is jelenthetné, de ezzel egyidejűleg a nagykockázatú helyek vizsgálatára gyakran már nem elegendők a hagyományos vizsgálati eljárások és eszközök, ami nem mennyiségi, hanem minőségi kérdés. Tehát itt is új igények jelennek meg a roncsolásmentes vizsgálatokkal szemben.

Példaként az 5. ábra egy USA elemzés eredményét mutatja be. Több atomerőmű több technológiai rendszerének a kockázatát elemezték, ami a meghibásodás bekövetkezésének a gyakoriságával és a meghibásodás következményeinek a súlyosságával arányos. Megjegyezzük, hogy a roncsolásmentes vizsgálat a kockázat két eleme közül kizárólag a meghibásodás bekövetkezésének a valószínűségét befolyásolja, a következmények tekintetében irreleváns.

Az elmúlt évtizedek, a jelen és az elkövetkező egy-két évtizedre prognosztizálható események, változások, fejlődési irányok tekintetében összefoglalóan azt mondhatjuk, hogy úgy mennyiségileg, de még inkább minőségileg új igények jelennek meg a roncsolásmentes vizsgálatokkal szemben. A mérnöki szerkezetek új területein, öregedő berendezéseken és létesítményeken, esetleg még ismeretlen károsodási mechanizmusok következményeinek egyre megbízhatóbb detektálása és (kvantitatív) jellemzése fogalmazódik meg feladatként. Ezekre kell megadni a hatékony választ.



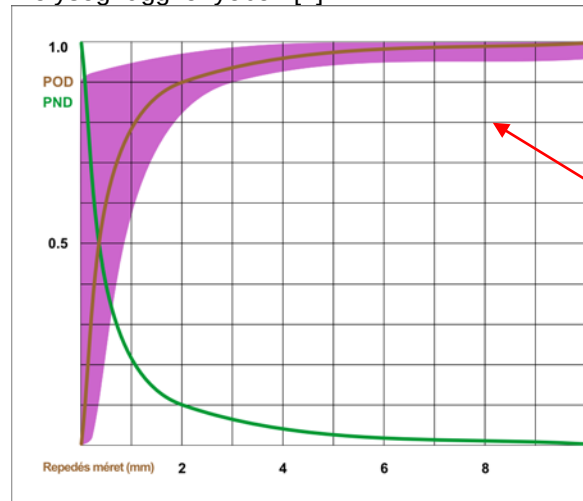
5. ábra. Atomerőműi rendszerek kockázatának bemutatása

## A MŰSZAKI FEJLŐDÉS KÍNÁLTA LEHETŐSÉGEK

Ugyan történelmileg korábbi időszakot érint, de a roncsolásmentes vizsgálat fejlődésére kiemelkedő hatást gyakorló műszaki lehetőségek tárgyalásakor nem hagyható ki a **törésmechanika** elterjedése. A törésmechanika ma már széles körben alkalmazott és bevált része a tervezésnek és a szerkezeti integritás elemzésének olyan iparágakban, mint a repülés, vasút, energiatermelés és továbbítás, vegyi üzemek, építészeti szerkezetek, stb. A tervezésben meghonosodott a hibátűrő módszer (*damage tolerance*), az integritáselemzésben a használatra való alkalmasság fogalom (*fitness for service*). A törésmechanikai koncepció megjelenése fogalmazta meg az igényt a roncsolásmentes vizsgálat teljesítőképességének kvantitatív módon történő leírása vonatkozásában. Hagyományosan azt várták a roncsolásmentes vizsgálatról, hogy találja meg a „legkisebb folytonossági hiányt”. A kérdés ilyen módon történő megfogalmazása összefügg a vizsgáló technika érzékenységevel, de törésmechanikai értelemben akár a hiány kiinduló méretének is tekinthető. A fontos ezzel szemben annak a „legnagyobb folytonossági hiánynak a mérete, amit nem talál meg a roncsolásmentes vizsgálat”.

Ez vezetett a NASA által kezdeményezett és szponzorált program végrehajtásához, aminek eredményeként az 1970-es években kidolgozták az első **detektálási valószínűség** (*probability of detection, POD*) adatbázist és

elemzési eljárást [5]. Mára a POD koncepció szerves részévé vált a mérnöki tervezésnek és a kockázat, illetve élettartam elemzésnek és előrejelzésnek. Miután a POD-t gyakran azonosítják a roncsolásmentes vizsgálat megbízhatóságával, lásd pl. [6], meg kell jegyeznünk, hogy a megbízhatóság eleme még a reprodukálhatóság (itt fontos a kalibrálás szerepe) és a megismételhetőség (vizsgáló rendszer stabilitása). A POD szigorúan véve a vizsgálat teljesítőképességére ad választ. A 6. ábra a NASA űrprogram egyik POD görbét mutatja, ahol egy speciális szimulációs eljárás az eredeti mérési pontokból újakat generált és így felrajzolhatóvá vált a görbe konfidencia intervalluma is a hibamélység függvényében [7].

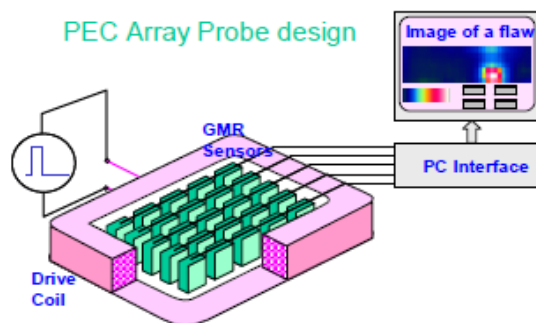


6. ábra. POD görbe a hibamélység függvényében, konfidencia intervallummal ( $a=3\text{mm}$ )

repedés mélység esetén  $POD = 90\%$ , konfidencia szint =  $95\%$ ) [6]

Hatalmas a fejlődés az **információs technológia** és a **mikroelektronika** területén. Csak példaként: ma már olyan fejlesztő architektúrák vannak, amelyek képesek a különböző technológiák (magasan integrált mikroelektronika, digitális technika és számítástechnika) integrálására; észrevehetően megindult a szoftver és hardver eszközök határának összemosódása a mikroelektronikai eszközök egyre „intelligensebbé” válása következtében; a vékonyréteg technológia fejlődése eredményeként kvantumfizikai hatások is kimérhetők a mikroelektronikába jelfeldolgozás céljából beintegrált érzékelőkkel (*sensor-on-chip*).

Ez utóbbira álljon itt egy példa. Az óriás mágneses ellenállás (*giant magneto-resistance, GMR*) elvén történő érzékelés az örvényáramos vizsgálat legújabb fejlődési foka. Az örvényáramos tekercsek itt kvantumfizikai eszközök, a ferromágneses spin hatásán keresztül igen kis mágneses tér jelenlétet vagy változást óriási magnetorezisztencia változásként érzékelnek. (Megjegyezzük, hogy a 2007 évi fizikai Nobel díjat megosztva egy francia és egy német tudós kapta a magnetorezisztencia jelenségének a felfedezéséért.) Az örvényáramos vizsgálatához több tekercsből álló *array*-t készítenek, amire a 7. ábra mutat egy példát. Egészen 512 érzékelő tekercsig elmennek ( $32 \times 16$  elem), ami az érzékenység növekedésén túlmenően jelentősen csökkenti a vizsgálati időt is [8].



7. ábra. GMR array elrendezés és vizsgáló rendszer [8]

A vizsgálattechnika változása mellett, a számítástechnika kínálta szinte felmérhetetlen teljesítménynövekedés következtében egyre fontosabb helyet foglal el a **numerikus szimuláció** a roncsolásmentes vizsgálat területén azokban az iparágakban, amelyek igényes vizsgálati eljárásokkal dolgoznak (pl. repülőgépgyártás, szállítás, energiaipar, acélgyártás). Ma már olyan integrált modellekkel történik a szimuláció, ami CAD tervezésű komplex geometriát és inhomogén szerkezeti anyagot vesz figyelembe és közvetlenül kapcsolódik a

roncsolásmentes vizsgálat céljainak megfelelő interfészhez. A korszerű szimuláció kiterjed az ultrahangos (beleértve a vezérelt hullámokat is), az örvényáramos és a radiográfiai vizsgálatokra; továbbá nem szorítkozik kizárólag a hullámterjedés (*ray tracing*) bemutatására, hanem kezeli a hullám és a hiány kölcsönhatását. Ez teljes mértékben megfelel az ipari igényeknek, úgy a reprezentativitás, mind a szimuláció gyorsasága és egyszerűsége tekintetében.

A lehetőségek körét bővítik azok a megoldások is, amelyek az egyes eljárások egyébként már ismert **fizikai elvének** azokat a részleteit aknázzák ki, amelyekre eddig nem került sor. Ezek közé tartozik az ultrahang nemlineáris viselkedésének a kihasználása. Ennek a lényege, hogy amíg a visszaverődésen alapuló eljárás szorosan összezárt repedés detektálására alacsony hatékonyságú, addig az érintkező felületek gerjesztette nemlineáris válaszok (harmonikusok) értékelése eredményre vezet [9]. Ugyancsak ide sorolható a dinamikus termográfia, aminek lényege, hogy a vizsgálandó darabbal külső energiát közölnek (pl. mechanikai, villamos, hő), ami a folytonossági hiány (repedés) közvetlen környezetében hővé alakul és ezt a sugárzó hőt detektálják. Akár néhány tízed  $^{\circ}\text{C}$  hőmérséklet különbség is generálható a folytonossági hiánynál, ami jelentősen növeli a kimutatás érzékenységét [10]. Szintén itt kell megemlíteni az utóbbi évtizedben elterjedő terahertz technikát. Ez az elektromágneses spektrum infravörös és mikrohullámú tartománya közötti – és eddig nem használt – tartományát aknázza ki (a frekvencia 3 GHz-től 3 THz-ig, hullámhossz tartomány 3000  $\mu\text{m}$ -tól 100  $\mu\text{m}$ -ig terjed). A terahertz jelentős szerepet tölt be a személyi biztonsággal kapcsolatos (pl. repülőtéri) vizsgálatokban, mert nincs káros élettani hatása, de az egyetlen használható roncsolásmentes eljárásnak bizonyult a NASA űrsiklóhiabszigetelésének az ellenőrzésében is [11]. A jelfeldolgozás területe is egyre bővül olyan módszerek alkalmazásának a bevezetésével, mint a mesterséges ideghálózatok vagy a fuzzy logika [12].

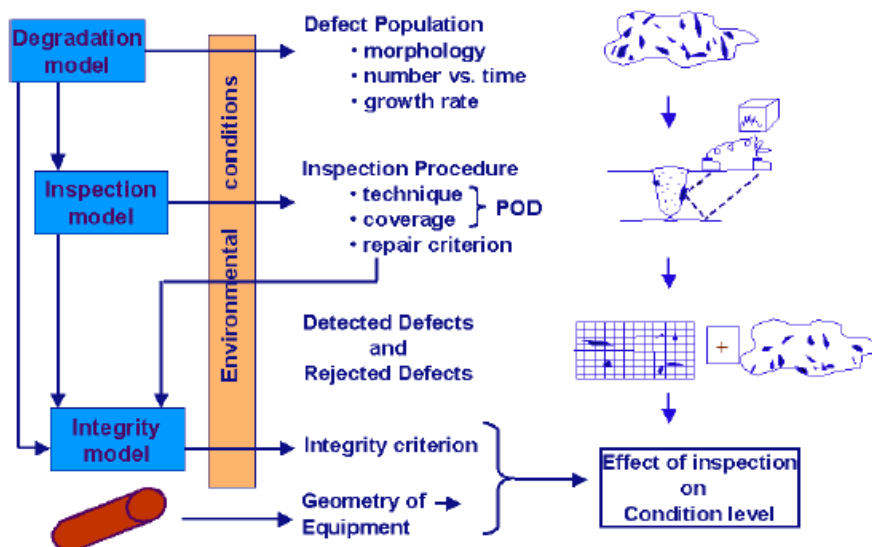
Érzékelhető tehát, hogy a műszaki fejlődés egyre szélesebb lehetőséget teremt a folytonossági hiányoknak a törésmechanikai koncepció alkalmazása követelte kvantitatív jellemzésére (POD), sőt az adott hiánnyal rendelkező berendezés kockázatának a meghatározására. A technikai megoldások is egyre érzékenyebbé válnak, a jelfeldolgozás egyre gyorsabb és komplexebb lesz. Ugyan a roncsolásmentes vizsgálat hagyományosan az eljárások szerint szerveződik, újabban egyre több feladatorientált megoldást fejlesztenek ki, amelyek között nem

egy megoldás több eljárás integrált egysége. A megoldások között olyanokat is találunk, amelyek célja a költségcsökkentés vagy a vizsgálati idő redukálása. A technológiatervezést és a talált hiányok interpretálását szimulációs eljárások gyorsítják és könnyítik. A következőkben néhány példával illusztráljuk az előzőekben leírtakat.

## PÉLDÁK A KORSZERŰ RONCSOLÁSMENTES MEGOLDÁSOKRA

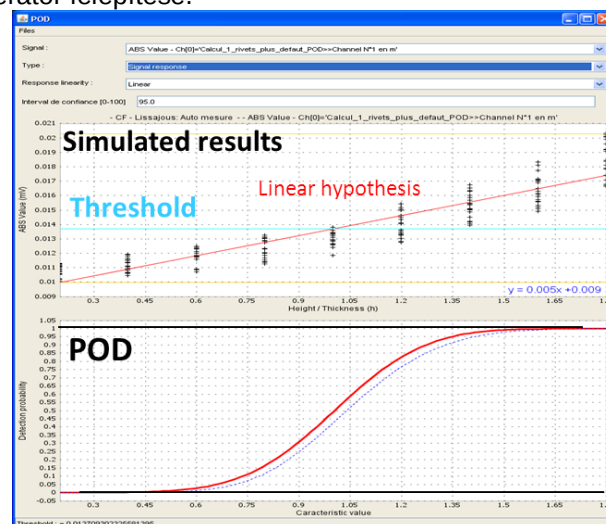
A **POD** alapproblémája, hogy statisztikai feldolgozásra elegendően nagyszámú releváns folytonossági hiányt kell biztosítani, ami rendkívül költséges és időrabló. Többféle módszert dolgoztak ki a probléma megoldására. Az ún. *bootstrap* szimulációs módszert [13] már említettük korábban, amellyel az eredeti adatbázisból új adatok generálhatók. Egy másik módszer az ún. POD generátor [14]. A POD generátor

egy numerikus modell, ami három egymásra épülő egységből áll, úgymint az anyagkárosodási, a vizsgálati és az integritás ellenőrzési egységből, 8. ábra. A károsodási modul egy statisztikai modellen alapszik, és valamennyi előforduló károsodást szimulálja a vizsgálandó berendezés meghatározott részén, az idő függvényében. Ez az eredmény képezi a vizsgálati egység bemenő adatait. A vizsgálati modul a vizsgálat szimulációja. Ez a választott roncsolásmentes eljárás, annak technológiája, technológiai paraméterek változtatása (pl. ultrahangos vizsgálófej és frekvencia) egyéb vizsgálati körülmények figyelembe vételével szolgáltatja a „vizsgálat” eredményeit. Az eredményeket manuálisan vagy automatikusan értékelve előállítható a szimulált POD görbe. Az integritás egység – a választott integritás kritérium segítségével – elvégzi a vizsgált berendezés szerkezeti integritásának az értékelését.



8. ábra. POD generátor felépítése.

A leghatékonyabb eszköz a numerikus szimulációval támogatott POD görbe felvétel. Ennek egyik változata a modellezéssel támogatott POD (*Model Assisted POD*, *MADOP*) [15]. Hasonló elv került alkalmazásra az Európai Bizottság PICASSO projektje keretében is [16]. Ennek a módszernek a lényege, hogy a vizsgálati paraméterek változását használják fel a POD görbe értékeléséhez. A 9. ábra példaként egy örvényáramos vizsgálat szimuláció eredményeit mutatja, ahol egy paramétert, a folytonossági hiány mélységét változtatták, majd Monte Carlo módszert alkalmazva értékelték a válaszokat és ebből szerkesztették meg a POD görbét.

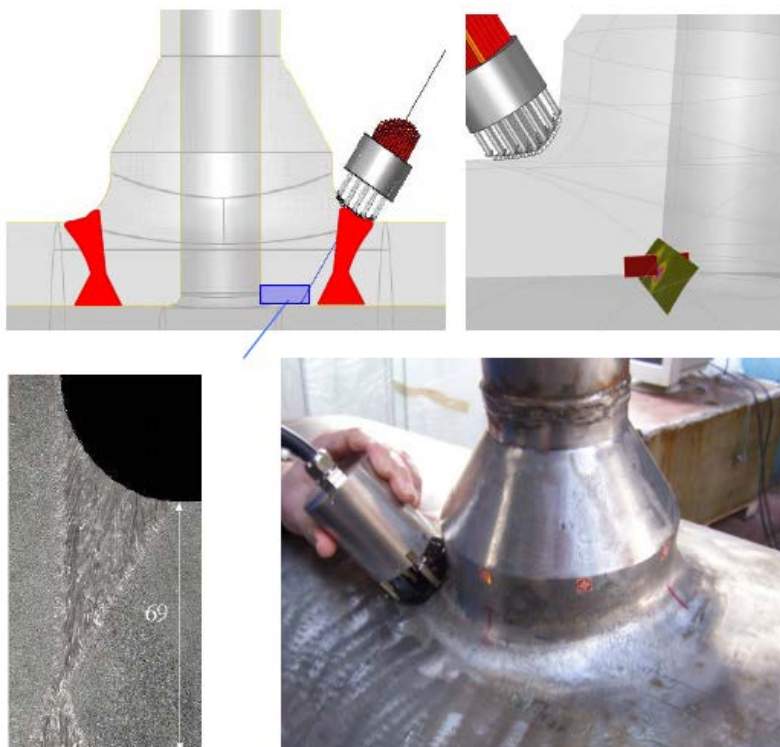


9. ábra. Szimulációval előállított POD görbe [17]

A **szimuláció** alkalmazása természetesen szélesebb, mint a POD modellezés. Legkézenfekvőbb a hiány jellemzése és méretének meghatározása. Ennek egy ígéretes jövőbeli alkalmazása lehet a modell alapú inverz módszer, amely az ember által elvégzett értékelés egy kiegészítő automatikus értékelését szolgáltathatja. Ugyancsak elterjedt és hasznos eszköz a szimuláció a vizsgálatminősítés területén. Ahogy a POD görbék generálása esetében, itt is jelentősen csökkenthetők a ráfordítások, ha a gyakorlati vizsgákat vagy azok egy részét szimulálják. A szimuláció igen fontos alkalmazási területe az új technikák és technológiák kipróbálása. Különösen terjedőben van a fázisvezérelt (*phased array, PA*) ultrahangos technikák fejlesztése terén. Lehetőséget teremt az *array*-k optimális kialakítására, adott komponensben elhelyezkedő adott folytonossági hiány esetében a késleltetési törvény illesztésére. A 10. ábra csomak belső íves átmenetében található sugárirányú fáradásos repedés detektálására szolgáló flexibilis fázisvezérelt (ún. *smart*)

vizsgálófej optimalizálására mutat példát. Itt a nehézséget egyebek mellett az okozza, hogy a hangnyalábnak át kell haladnia az átmeneti hegesztési varrat heterogén és anizotróp szerkezetén. Kijelenthető, hogy mára a szimuláció a tervezők „virtuális vizsgálatává” vált, ami a tervezés korai fázisában lehetőséget ad vizsgálatbarát berendezések létrehozására.

A vizsgálattechnikák közül számtalan példát lehetne kiemelni és illusztrálni velük a fejlődést. Ha csak az ultrahangos vizsgálatot nézzük, akkor feltétlenül első helyre lehet tenni a fázisvezérelt (*PA*) technika elterjedését, de említeni kell a futásidő szóródásos (*time of flight diffraction, TOFD*) eljárást, a vezetett hullámok (*guided wave, GW* vagy *long range ultrasonic testing, LRUT*) alkalmazását vagy az elektromágneses akusztikus fejek (*electromagnetic acoustic transducer, EMAT*) terjedését. Jelentős lépése a fejlődésnek a digitális (film nélküli) radiográfia megjelenése és térhódítása. Ezek közül – terjedelmi okokból – csak a *PA* és az *LRUT* technikát mutatjuk be röviden.

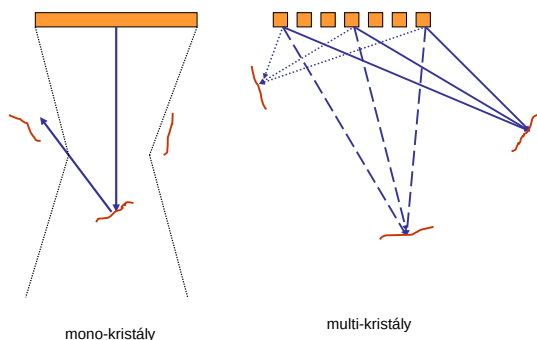


10. ábra. Fázisvezérelt vizsgálófej optimalizálása [17]

A **PA** technika lényege, hogy a mechanikus rezgést kibocsátó hagyományos mono-kristály helyett több egyedi kristályból (*multi-kristály*) álló szabályos elrendezést (*array*-t) alkalmaznak hangforrásként. A kis egyedi források hangtereinek hullámfrontjai interferálnak és egy közös hullámfrontot képeznek. Az egyedi hangforrások gerjeszthetők egymáshoz képest késleltetéssel, valamint szinkronizálhatók fázis,

illetve amplitúdó szerint és így egy vezérelhető, fókuszált hangnyaláb hozható létre, aminek szoftver úton változtatható a szöge, a fókusz távolsága, a fókuszban mért átmérője. A 11. ábra szematikusan mutatja a mono- és a multi-kristály (*PA*) közötti különbséget. A mono-kristály hangnyalábjában egytengelyű és divergens, ezért ez kis valószínűséggel reflektál a hangnyaláb tengelyén kívül eső repedésekről. A fázisvezérelt vizsgálat esetében a nyaláb fókuszált és

többtengelyű, ezért a legkülönbözőbb orientációjú repedések detektálásának is nagy a valószínűsége.



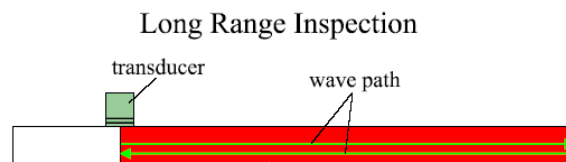
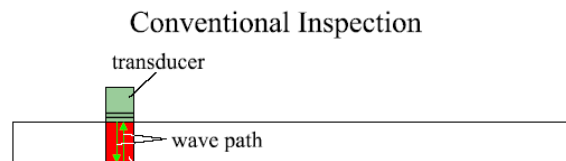
11. ábra. Különböző orientációjú repedések detektálása mono- és multi-kristállyal.

A PA technológiát a radar és a szonár rendszerek alkalmazásához fejlesztették ki a II. világháború idején. A 70-es évektől alkalmazták az orvosi diagnosztikában és csak az utóbbi évtizedben tört be a roncsolásmentes vizsgálat területére [18]. Napjainkban igen gyorsan terjed a PA technika alkalmazása, aminek oka, hogy a korszerű készülékek használata könnyen elsajátítható, hordozhatók (ellentétben a korai példányokkal) és egyre olcsóbbak.

Míg az ultrahangos vizsgálatok jelentős részét továbbra is korlátozott kiterjedésű hangnyaláb alkalmazásával (azaz hagyományos módon) végzik, amely esetben az ultrahang hullámhossza lényegesen kisebb, mint a vizsgálandó tárgy mérete, és így viszonylag lokalizált információt kapunk, addig megjelent és rohamosan fejlődik egy másik ultrahangos terület, a **vezetett hullámok (LRUT)** alkalmazása. Ennek lényege, hogy az alkalmazott hang hullámhossza a falvastagság nagyságrendjében van vagy nagyobb annál, és ez az alacsony frekvenciájú ultrahang úgy terjed a vizsgálandó tárgyban, hogy annak geometriai határa vezet. A vizsgálat hatótávolsága nagy és általában globális információt szolgáltat, 12. ábra [19].

Az LRUT berendezések napjainkban már kereskedelemben kaphatók, az ultrahangot vagy piezoelektromos vagy magnetosztatikus elemekkel viszik be az anyagba. Fő alkalmazási területe a csövezetékek vizsgálata, elsősorban azok korróziós károsodási helyeinek az azonosítása. Az LRUT egy kereső technika, és általában nem alkalmas a detektált hiány pontos jellemzésére. Alkalmas viszont a hiányok

osztályozására amplitúdójuk alapján és – megfelelő kalibrálás esetén – a falvastagság csökkenése is meghatározható [20]. Rendkívüli előnye, hogy rövid idő alatt nagy terjedelmű vizsgálatot lehet vele végezni. A 13. ábrán vizsgálati példák láthatók.



12. ábra. A hagyományos és a vezetett hullámokkal történő ultrahangos vizsgálat elve

## AZ EMBERI TÉNYEZŐ SZEREPE

A műszaki fejlődés kínálta lehetőségek mellett nem szabad említés nélkül hagyni a roncsolásmentes vizsgálat minőségi rendszerének mind a mai napig leggyengébb elemét, a vizsgáló személyt. Szerepét a vizsgálat elvégzésének, az adatok gyűjtésének és értékelésének automatizálása csökkentti ugyan, de teljesen nem tudja kiküszöbölni. A 14. ábra a roncsolásmentes vizsgálat minőségi infrastruktúráját mutatja [21]. A bal oldali négy, vastag vonallal határolt mező a vizsgálatok elvégzésének elemeit, a többi (vékonyabb keretű) mező a minőség elérése érdekében teendőket ábrázolja.

A minőségi rendszer lényeges eleme a **személyzet képzése, minősítése és tanúsítása**. Az egységes szakmai képzés megteremtésének szándéka hozta létre az ISO/TR 25107:2005, illetve az azzal azonos CEN ISO/TR 25107:2006 jelű műszaki útmutatót. Ezek sillabuszokkal szolgálnak a roncsolásmentes vizsgálók felkészítő tanfolyamaihoz. A műszaki útmutatók megjelenésével szinte egy időben négy EU tagállam – Spanyolország, Franciaország, Németország és az Egyesült Királyság – szakemberei didaktikai útmutatókat és kézikönyveket fejlesztettek ki. Ez a munka jól szolgált az egységes európai piac létrejöttét, ezért az Európai Bizottság a Leonardo projektje keretében finanszírozta. A projekt keretében létrehozott – 1-es, 2-es és 3-as szint szerint strukturált – dokumentumokat a projektben részt vett négy országban ma rutinszerűen használják a vizsgáló személyzet

képzésében. A befejezését követően kézenfekvő volt a gondolat, hogy egy újabb európai

projekt révén további országokat is bevonjanak az egységes képzésbe.



13. ábra. LRUT alkalmazások: gázvezeték és offshore szerkezet.

| NDT system           | Standards for                        | Procedures                              | Qualification                            | Inspection, Certification, Notified Bodies  | Accreditation Bodies                                            |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>PROCEDURES</b>    | Techniques                           | Job Specific Procedures;                | Validation                               | Surveillance Audit                          | Accredited laboratories acc. EN ISO/IEC 17025                   |
| <b>EQUIPMENT</b>     | Equipment Accessories Calibration    | Capability Trials Proficiency Tests     | Performance Demonstration                | Certification, e.g. EN ISO/IEC 17020        | Accredited Inspection Bodies acc. EN ISO/IEC 17020              |
| <b>PERSONNEL</b>     | Training Qualification Certification | Job Specific Training and Qualification | Inspection Qualification e.g. ENIQ, ASME | Quality System Certification, e.g. ISO 9001 | Accredited Personnel Certification Bodies acc. EN ISO/IEC 17024 |
| <b>HUMAN FACTORS</b> | Code of Ethics                       | Management and Planning (Riskbased)     | Letter of Intent Associations            |                                             |                                                                 |

14. ábra. A roncsolásmentes vizsgálat minőségi infrastruktúrája.

Hosszas előkészületeket követően, 2011-ben az említett Leonardo projekt logikus folytatásaként, kezdetét vette egy második, „Roncsolásmentes Anyagvizsgálók Minősítése – Európai Képzési Program Továbbadása” (angol rövidítéssel „TRANSFER PROQUALINDT”) elnevezésű Leonardo projekt, aminek a célja az Unió szemszögéből nézve az, hogy az első projekt eredményeit további európai országoknak adhassák át. A pályázó országok – pontosabban azok roncsolásmentes vizsgálati szövetségei – szempontjából pedig az, hogy csatlakozhassanak a közös képzési programhoz és honosíthassák annak dokumentumait. A magyar, a portugál, a cseh és a horvát szövetség eredményesen pályázott a részvételre, és a projekt eredményeként, előreláthatólag 2013 végén, korszerű anyagokkal lehet majd ellátni a hazai

roncsolásmentes vizsgálati képzéssel foglalkozó intézményeket [22].

A minősítés és tanúsítás területén az utóbbi időszakban egyre hangsúlyozottabb lett az igény a releváns szabványok (ISO 9712, EN 473 és esetleg az ANSI-ASNT CP-106) egymás felé közelítésére. A felsorolt szabványok ugyan tartalmaznak eltéréseket egymástól, de ezek nem jelentősek (pl. tematika, gyakorlat hossza, újratanúsítási követelmények), és az eltérések kompromisszumok árán kezelhetők. 2012 végén kiadásra került az EN ISO 9712:2012, amely még ugyanabban az évben magyar szabványként is megjelent. Az USA koncepciója az ország iparszerkezetéhez illeszkedve továbbra sem igényli a harmadik fél általi tanúsítást.

Meg kell említeni a nukleáris iparban dolgozó roncsolásmentes vizsgálati személyzet esetében a személyzetminősítést. Ez része a

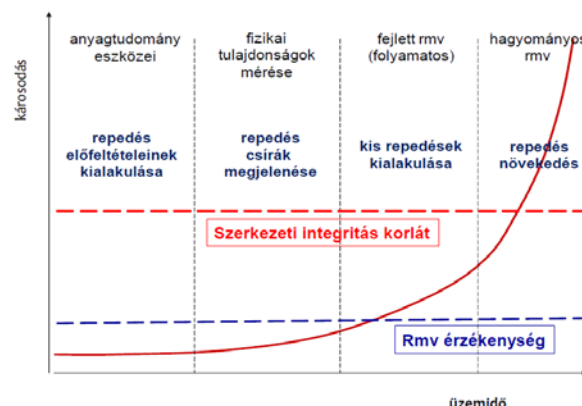
minősítés európai módszertana szerinti eljárásnak [23]. Maga a vizsgálatminősítés roncsolásmentes vizsgáló rendszer (vizsgáló berendezése, eljárás, vizsgáló személyzet) szisztematikus értékelése annak megbízható igazolása céljából, hogy a vizsgáló rendszer képes a követelményeknek való megfelelésre valós vizsgálati körülmények között. Míg a vizsgáló rendszer első két elemének minősítését gyakorlatilag rutinszerűen végzik a világban, a személyzetminősítés eddig csak korlátozott mértékben terjedt el. Ennek oka, hogy a vizsgáló személy minősítésének leghatékonyabb módja az ún. realizitikus hibákat tartalmazó ellenőrző testek alkalmazása. Ezek előállítását lényegesen nehezebb és drágább, mint a megszokott, mesterséges hibákat tartalmazó ellenőrző testeké. A személyzetminősítés – a gyakorlati megvalósítás nehézségei ellenére – jelentős hozzáadott értéket képvisel a roncsolásmentes vizsgálatok teljesítőképességének igazolása terén a nukleáris szektorban.

## A JÖVŐ ÚTJA

Az előzőekben bemutatott folyamatok eredményeként egy koncepcionális változás tanúi lehetünk. Ennek a lényege, hogy a hagyományos roncsolásmentes vizsgálat következtében elmozdul a károsodások proaktív kezelése irányába, aminek a lényege, hogy a korábbi (jelenlegi), azaz a „találd meg és javítsd ki a hibát” gondolkodást és cselekvést felváltja a megelőző eljárásokat integráló koncepció. Ennek legfontosabb elemei a következők: a károsodási mechanizmusok ismerete, a károsodást kiváltó tényezők (*stresszor*-ok) ismerete és kezelése, a berendezés élettartam gazdálkodásának szempontjai és a maradék élettartam (műszakilag lehetséges üzemidő) pontos előrejelzésének a módszere [24]. A proaktív koncepció lényegét mutatja a 15. ábra.

A változás tendenciája azt is sugallja, hogy a jelenlegi gyakorlatunkból ismert, és fogalmi rendszerünkben meghonosodott roncsolásmentes vizsgálatot valamikor fel fogja váltani a szerkezet „globális egészségének” a monitorozása (*Structural Health Monitoring, SHM*) [25]. Az SHM legfontosabb jellemzője az, hogy a monitorozó rendszer érzékelőit (optikai, ultrahangos, akusztikus emissziós, elektromágneses, stb.) beágyazzák a szerkezet megfelelő pozícióiba. Ezek egyébként a ma használatos roncsolásmentes rendszerek elemei is. Így azok a tényleges üzemi és üzemzavari terhelés állapotában gyűjtik az adatokat, és továbbítják azokat folyamatosan az adatfeldolgozó rendszer felé. A rendszer a szerkezet állapotának (*health*) értékeléséhez a számára megтанítottak

alapján felismeri a károsodási folyamatot, meghatározza a károsodás helyét (tágabb régióját), fokát, majd ezekből az információkból előrejelzést ad a szerkezet jövőjére nézve. Az SHM rendszer legfontosabb elemei az érzékelők, a vezeték nélküli adatforgalom és a károsodási algoritmusok.



15. ábra. A Structural Health Monitoring sémája

## HIVATKOZÁSOK

- [1] C. H. P. Wassink: Innovation in Non Destructive Testing, PhD Thesis, Technical University Delft, The Netherlands, 2012.
- [2] H. Mohrbacher: Reverse metallurgical engineering towards sustainable manufacturing of vehicles using Nb and Mo alloyed high performance steels, „Felfedező tudomány” Interdiszciplináris Tudományos Konferencia, Dunaújváros, 2012. 11. 12.
- [3] World Nondestructive Test Inspection Services Market, An Indestructible Future, Frost & Sullivan, N94C-30, 2011.
- [4] International Status and Prospects of Nuclear Power, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2012.
- [5] W. D. Rummel: Nondestructive inspection reliability – History, status and future path, Proc. 18th WCNDT, Durban, South Africa, 2012.
- [6] G. Dobmann, D. Cioclov, J. Kurz: The role of probabilistic approach in defect-detection, -classification, and -sizing.
- [7] C. Müller et al: Holistically Evaluating the Reliability of NDE Systems – Paradigm Shift, Proc. 18th WCNDT, Durban, South Africa, 2012.
- [8] H. I. Ringermacher: NDE: Surfing the electromagnetic spectrum, Proc. 18th WCNDT, Durban, South Africa, 2012.
- [9] K. Chougrani, A. Gisolf, F. Dijkstra: Detection of Transparent Cracks Using Nonlinear Acoustics, Proc. 18th

- [10] WCNDT, Durban, South Africa, 2012.
- [10] U. Netzelmann, G. Walle: Induction Thermography as aTool for Reliable Detection of Surface Defects in Forged Components, Proc. 17th WCNDT, Shanghai, China, 2008.
- [11] D. Zimdars et al: Technology and Applications of Terahertz Imaging NDE: Inspection of Space Shuttle Sprayed on Foam Insulation, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 25, p. 570 (2005)
- [12] R. Sikora et al: Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic in Nondestructive Evaluation, Proc. 18th WCNDT, Durban, South Africa, 2012.
- [13] B. Efron: The Jackknife, the Bootstrap, and Other Resampling Plans, Capital City Press, Montpelier, vermont, USA, 1994.
- [14] A. Mast et al: POD GENERATOR, Development of numerical modeling tools for quantitative assessment of the performance of non-destructive inspection techniques, Proc. 17th WCNDT, Shanghai, China, 2008.
- [15] R. B. Thompson: A unified approach to the Model-Assisted Determination of Probability of Detection, Materials Evaluation, Vol. 55, June 2008.
- [16] <http://www.picasso-ndt.eu>
- [17] S. Paillard: NDT Modeling for Advanced Controls, TÁMOP Kick-off Conference, Dunaújváros, 2012. 11. 13.
- [18] Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech
- [19] J. Rose et al: Recent Advances in Guided Waves in Pipe Inspection, Proc. 17th WCNDT, Shanghai, China, 2008.
- [20] P. Cawly, F. Cegla, A. Galvagni: Guided Waves for NDT and Permanently Installed Monitoring, Proc. 18th WCNDT, Durban, South Africa, 2012.
- [21] EFNDT Guidelines: Overall NDT Quality System, Issue I, EFNDT (2008)
- [22] Skopál I., Trampus P.: Roncsolásmentes anyagvizsgálók képzésének fejlesztése, 26. Hegesztési Konferencia kiadványa, Budapest, pp. 53-58 (2012)
- [23] European Methodology for Qualification of Non-Destructive Testing (third issue), EUR 22906 EN (2007)
- [24] L. J. Bond: Moving Beyond Nondestructive Examination to Proactive Management of Materials Degradation, Trans. ASME: J. Pressure Vessel Technology, 134, February, pp. (2012)
- [25] P. Trampus: Structural Health Monitoring – The Way Forward to Safety and Reliability, Proc. 16th „Buildings Services, Mechanical and Building Industry Days”, Debrecen, Hungary, pp. 9-19 (2010)

### A JÁRMŰIPAR RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATI IGÉNYEI

CZINEGE IMRE, KOZMA ISTVÁN

**Kulcsszavak:** járműipar, roncsolásmentes vizsgálatok, komputertomográfia, geometriai ellenőrzés

#### BEVEZETÉS

A hazai járműiparban az eredeti gyártók, valamint a TIER 1-es, 2-es és 3-as beszállítók egyaránt fontos szerepet töltenek be az ellátási láncban. Minden szinten jelentős minőségi igényeket kell kielégíteni, amely nem csupán az átvételre, hanem a termék teljes életciklusára is kiterjed. Ez a termékefelelősség komoly minőségellenőrzési feladatokat jelent a gyártók számára, amely a gyártásközi ellenőrzésre és a késztermék ellenőrzésére egyaránt vonatkozik. Az ellenőrzési folyamatban kiemelt szerepe van a roncsolásmentes vizsgálati eljárásoknak.

A vázolt felelősségi láncnak megfelelően a vizsgálatok a következőkre terjedhetnek ki: technológia fejlesztés, első darab átvétel, mintavételes ellenőrzés sorozatgyártásban, káreset elemzés futó gyártmányoknál. A vizsgált járműipari alkatrészek köre nagyon széles, az előgyártmányok között jelentős arányt képviselnek

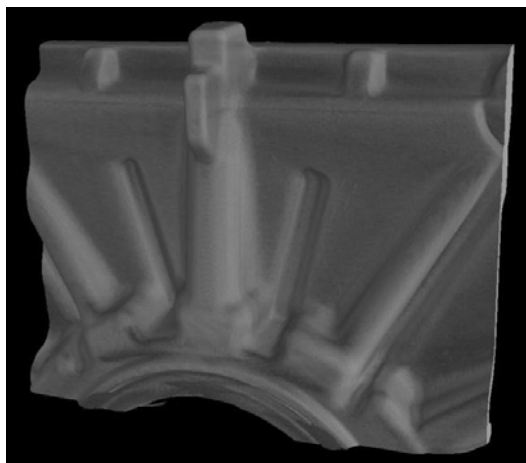
az öntvények, kovácsolt termékek, műanyag és kompozit alkatrészek. A befejező megmunkálások területéről a forgácsolt, köszö-rült alkatrészek, a felületi kérgék és a hegesztett szerkezetek varratai emelhetők ki.

#### ESETTANULMÁNYOK A CT-VIZSGÁLATOK KÖRÉBŐL

A mint viszonylag új eljárás számos járműipari alkatrész vizsgálatában olyan lehetőségeket nyitott, melyek a hagyományos technikákkal elképzelhetetlenek voltak. Ezek közül néhányat mutatunk be a továbbiakban.

##### ÖNTÖTT VEZÉRMŰ FEDÉL

A vezérmű fedél függőleges bordájától jobbra szivárgás volt tapasztalható. A CT-felvételek makró fókuszú csővel, sík detektoros képrögzítéssel készültek, a felbontás X-Y-Z irányban 0,084 mm volt.



1. ábra: Öntött fedél CT-vizsgálata

elhelyezkedése vált láthatóvá.

A jobb oldali ábra a vizsgált zóna keresztmetszetét mutatja, amelynek középső részén jól látszanak a lukerek. A metszősíkot mozgatva megállapítható volt, hogy a felülettől-felületig tartó összefüggő üregek okozták a szivárgást. Itt a hagyományos röntgen felvételekhez képest azzal nőtt az információ tartalom, hogy az üregsor térbeli

##### KOMPOZIT HÁZ SZIVÁRGÁSÁNAK ELEMZÉSE

A 2. ábrán látható alkatrész több gyártótól is érkezett a szerelősorra, egyik beszállító esetében volt tapasztalható szivárgás, más gyártótól származó alkatrészek viszont hibátlanak bizonyultak.

Dr. Czinege Imre, Professor Emeritus, Kozma István  
tanársegéd, Széchenyi István Egyetem  
A VIII. RAKK-on elhangzott előadás írott változata

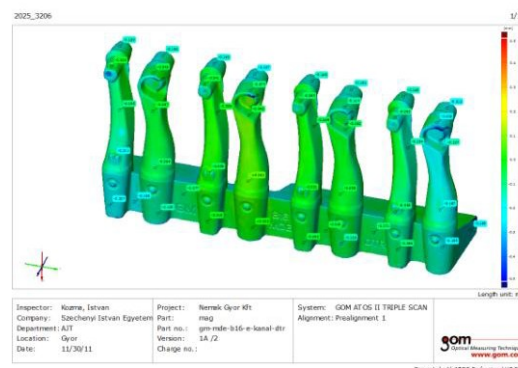
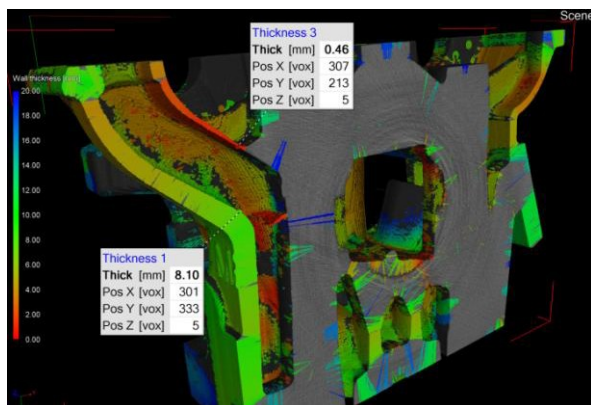


2. ábra: Kompozit ház hiba okának elemzése

A vizsgálat kimutatta, hogy a műanyag fröccsöntési technológia eltérése okozta a problémát, ugyanis az összecsapási vonal mentén keletkező légbuborék sor vezetett a repedés keletkezéséhez és ezzel járó szivárgáshoz. Ezt a fröccsöntési technológiai szimuláció is alátámasztotta. Megállapítható volt, hogy a hibás alkatrészekenél mások voltak a meglövési pontok mint a jó alkatrészekenél, ennek következtében az összecsapási vonal is kedvezőtlen helyre került annál a szállítónál, aki a helytelen technológiát alkalmazta.

## GEOMETRIAI MÉRETELLENŐRZÉS CT TECHNIKÁVAL

A komputertomográffal készített három dimenziós kép alkalmas a külső-belső geometriai méretek ellenőrzésére is. Funkciójában az értékelő szoftver ugyanazokat a lehetőségeket adja, mint a digitális optikai felvételek, de itt a belvilág megismerése érdekében nem kell roncsolni az alkatrészt. Ilyen mérésre mutat példát a 3. ábra bal oldali képe, ahol a méreteltéréseket színek is jelzik. Összehasonlításként a jobb oldali képen egy hagyományos digitális optikai felvétel látható, amellyel csak a külső méretek ellenőrizhetők.

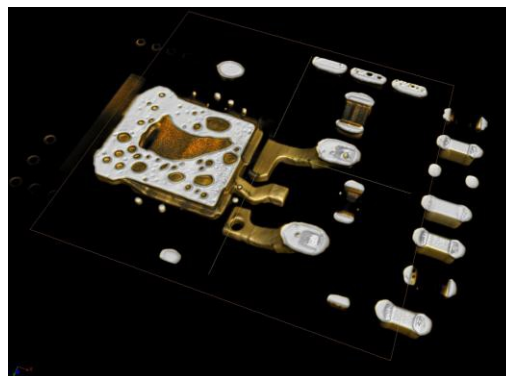
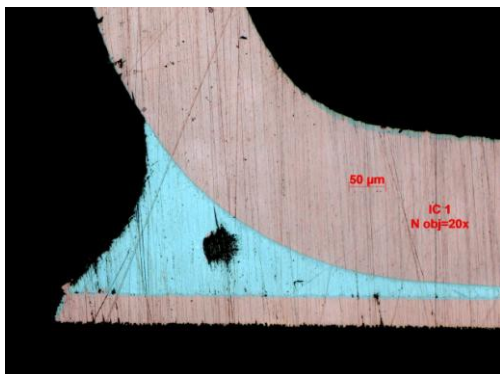


3. ábra: Geometriai méretek ellenőrzése

## JÁRMŰIPARI ELEKTRONIKAI ALKATRÉSZEK CT-VIZSGÁLATA

Az elektronikai alkatrészek forrasztásainak ellenőrzése komoly kihívás az anyagvizsgálók számára, mivel a porozitásokat, összeolvadási hibákat hagyományos technikákkal igen nehéz kimutatni teljes alak- és mérethűséggel. A CT eljárás itt is előnyösen alkalmazható, ahogy a 4. ábrán látható példa szemlélteti.

A bal oldali képen a CT-vizsgálattal feltárt porozitás mikroszkópi képe látható, ennek a vizsgálatnak a célja a felvétel hitelesítése volt. A jobb oldali kép egy komplex alkatrész csoport robbantott ábráját mutatja, ahol jól látható a forrasztanyag nem teljes felületre kiterjedő kötődése.



4. ábra: Forrasztott alkatrészek ellenőrzése

## ESETTANULMÁNYOK EGYÉB RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATOK KÖRÉBŐL

A járműipari alkatrészek vizsgálati eljárásai évtizedek óta kialakultnak tekinthetők, ennek ellenére lehet találni olyan érdekességeket, melyek a korábbi eredményekhez képest is mutatnak újdonságot. Ezek közül látható néhány esettanulmány a következőkben.

## KOVÁCSOLT FÉLTENGELY VIZSGÁLATA

Az 5. ábrán bemutatott féltengely fej és szár rész közötti átmenetére repedésvizsgálatát írták elő, melynek során felületi repedéseket észleltek a nyakrészben. A repedések jellege és kiterjedése olyan mértékű volt, hogy további vizsgálatot is célszerűnek látszott végezni. Az UH vizsgálat belső repedéseket is kimutatott, amelynek kiterjedését a metszeti kép jól szemlélteti. A repedés egyértelműen a kovácsolás során keletkezett, valószínű oka a nem megfelelő kovácsolási hőmérséklet. Sorozatvizsgálattal a hibás tengelyek kiszűrhetők voltak.

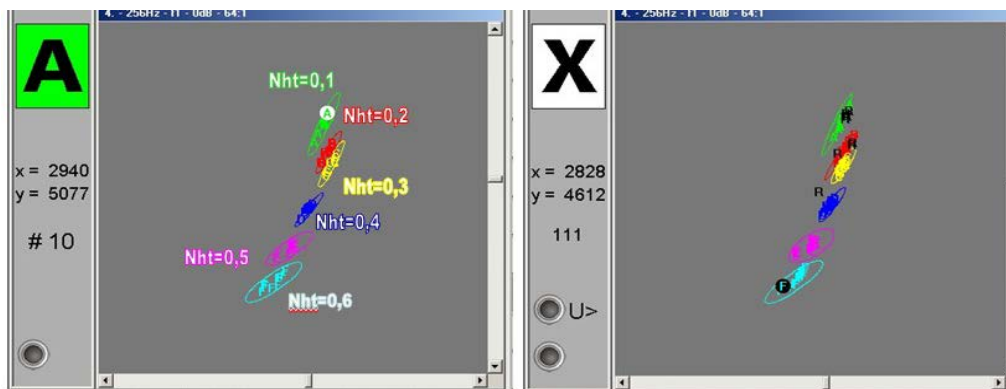


5. ábra: Féltengely UH vizsgálattal kimutatott belső repedése

## NITRIDÁLT KÉREG VASTAGSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

A nitridált kéreg roncsolásmentes vizsgálatára egyértelműen megbízható eljárás nem létezik, a rétegvastagság meghatározása mindig konkrét alkatrészhez kötődik. Egy bonyolult, tagolt külső felületekkel és bordás furattal rendelkező alkatrész rétegvastagság mérésére alkalmas eljárás kidol-

gozásának vázlata a következő: hitelesítés ismert kéregvastagságra nitridált próbákön 0,1-0,6 mm határok között hat fokozatban, majd az ismert kéregvastagságú alkatrészekkel a multi-frekvenciás örvényáramú vizsgáló berendezés kalibrálása. Ezután következhetett a mérés sorozatban gyártott alkatrészekben, elég jó megbízhatósággal osztályozva a vizsgált alkatrészeket.



6. ábra: Féltengely UH vizsgálattal kimutatott belső repedése

A 6. ábra bal oldali képe a kalibráció eredményét mutatja. Jól látható, hogy az azonos névleges rétegvastagságú próbatestek egyértelműen körülhatárolható területeken helyezkednek el. A jobb oldali kép a sorozatmérés eredményeit mutatja, ahol az eltérő kéregvastagságú alkatrészek szintén elkülönültek a képernyőn.

Megjegyzendő, hogy az irodalomban több ultrahangos vizsgálati eljárás is létezik a nitridált kéreg vastagságának meghatározására, ezek a Rayleigh hullámok felületi rétegben mért sebesség változásán alapulnak. Két fejes technikát és különböző frekvenciákat alkalmazva mérik az impulzusok között eltelt időt, és ebből következtetnek a terjedési sebességre. Kalibráció után az eljárás hibáját 0,02 mm-re becsülik. Az eljárás ismertetése a [http://www.hitachi.com/rev/1999/revoct99/r5\\_108.pdf](http://www.hitachi.com/rev/1999/revoct99/r5_108.pdf) honlapon található.

## FELÜLETI KÉREGVASTAGSÁG-MÉRÉS KVÁZIRONCSOLÁS MENTES ELJÁRÁSSAL

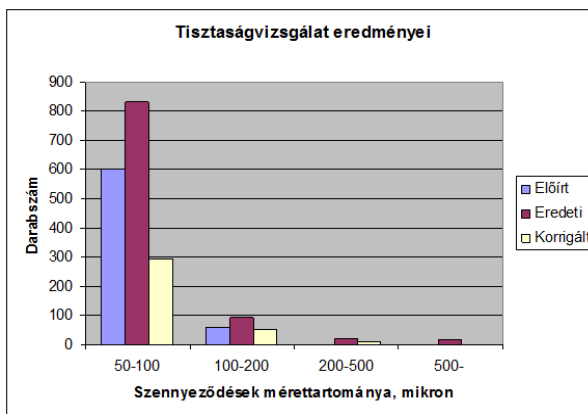
Az alkatrészek nem működő felületén végzett keménységmérés sorolható ide. Az eljárás során változó erővel terhelik a szúrószerszámot, az erőhatás lehet két diszkrét terhelési érték vagy egyenletesen növekvő terhelés is. Például Vickers keménységmérés esetében egyszerűen levezethető, hogy a felterhelési görbe homogén anyag esetében parabolikus, de ha a gyémánt áthatol a kérgesített zónán, akkor a görbe felfutása megtörik. Ebből következik, hogy kérgesített felületen az erő-behatolási mélység diagram változásából a kéregvastagságra lehet következtetni. Így mérhető nitridált vagy betétedzett kérgék egyaránt, de mindegyik esetben kellően széles erőtartományban kell a mérést végezni. Egy ismert megoldás a

speciális Rockwell eljárással készíthető vizsgálat, ahol két, 150 és 1200 kg-on végzett mérés kapcsolatba hozható a betétedzett réteg vastagságával. A kiértékelést a géphez kapcsolt mikroprocesszor automatikusan elvégzi, ezáltal sorozatmérésre is alkalmas.

## JÁRMŰIPARI ALKATRÉSZEK TISZTASÁG VIZSGÁLATA

A legtöbb jármű főegységbe (például motor, sebességváltó) beépülő alkatrészekre a megrendelő előírja az ISO 16232/VDA 19 szerinti tisztaság vizsgálatot. Ennek során cél az üzemi tisztítási folyamat után megmaradt szennyeződések kimutatása független laboratórium által. A folyamat során intenzív mosással oldják le az esetlegesen megmaradó szennyeződések, majd a mosó oldatot szűrőn áteresztve leválasztják a részecskéket. Ezeket speciális mikroszkópi eljárással osztályozzák méret szerint, illetve különbséget tesznek reflektáló (fémes) és nem reflektáló szennyeződések között. A vizsgálati eredmény akkor megfelelő, ha az egyes méretkategóriákra előírt részecske darabszám az előírt értékek alatt marad.

A 7. ábrán látható alkatrész tisztítási folyamatára mutat példát a jobb oldali kép. A kék oszlopok mutatják az előírt megengedett részecske darabszámot a gyári tisztítási folyamat után. A lila oszlopok azt jelzik, hogy az eredeti technológia nem volt megfelelő, minden méretkategóriában meghaladták az előírt értéket az észlelt részecske darabszámok. A tisztítási folyamat fejlesztése utáni második ellenőrzésnél már közel megfelelőnek bizonyult a minta.



7. ábra: Tisztaságvizsgálattal minősített alkatrész és mérési eredmények

## ÖSSZEFOGLALÁS

A járműiparban a termékfelelősség fokozott érvényesítése megköveteli a teljes körű minőségellenőrzést. Ennek legfontosabb eszközei a továbbfejlesztett roncsolásmentes vizsgálati eljárások, amelyek közül sokoldalúsága miatt kiemelkedik az ipari CT vizsgálat. E technikával a belső hibák

feltárása és a 3D geometriai vizsgálatok együttesen valósíthatók meg. Természetesen az egyre tökéletesebb hagyományos roncsolásmentes vizsgálati technikák is komoly szerepet játszanak az alkatrész ellenőrzésben. Különös figyelmet kap a felületi kérgék roncsolásmentes ellenőrzése és a tisztaságvizsgálat is, mint a roncsolásmentes vizsgálatok új eljárásai.

## NAGYÉRZÉKENYSÉGŰ ÉRINTÉSMENTES OPTIKAI MÓDSZER AZ EMBERI CSONTOK RONCSOLÁS-MENTES VIZSGÁLATOKHOZ

SZÁVA JÁNOS<sup>(1)</sup>, NECULA RADU<sup>(1)</sup>, GÁLFI BOTOND-PÁL<sup>(2)</sup>, ȘAMOTĂ IOSIF<sup>(1)</sup>, ADRIAN BURNARIU<sup>(1)</sup>

**Kulcsszavak:** csontok elmozdulásának mérése, digitális kép korreláció, DIC, VIC

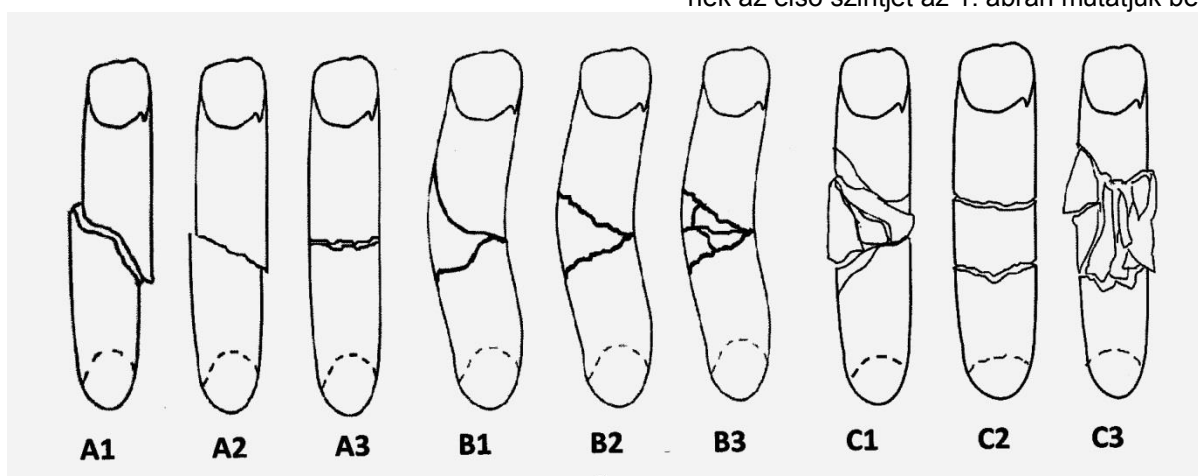
### 1. BEVEZETŐ ÉS ELŐZMÉNYEK

A szerzők egy modern optikai módszert elemeznek biomechanikai problémák szempontjából.

Mint ismeretes, a törött (főként a hosszú) csontok rögzítési módszere függvényében a páciens felgyógyulási idejét le lehet csökkenteni, ha e

rögzítési eljárás apró (mikron-nagyságrendű) viszonylagos elmozdulásokat tesz lehetővé.

A szakorvosokat még az 50-es évektől foglalkoztatta a törések osztályozása s ilyen szempontból az ú.n. AO-Iskola /Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthese-fragen/ még 1958-ban kidolgozott egy részletes, négy-szintű osztályozást [1], melynek az első szintjét az 1. ábrán mutatjuk be.



1. ábra. Az AO-osztályozás első szintje [1; 2; 3]

Ebben az esetben, figyelembe véve Perren professzor által kidolgozott-, és a klinikai praxis által is igazolt elméletet, az említett (félmerev) rögzítési eljárások előnyösek, főként a kezdeti csontképződés időszakában.

Perren professzor elmélete a csontok piezoelektromos tulajdonságára alapoz, s ennek értelmében, az apró, viszonylagos elmozdulásai a törött részeknek lehetővé teszik ezek érintkezését. Az így (ez által) generált apró áram-lökések elősegítik a kezdeti csont-képződést.

A szerzők által javasolt kísérleti módszer lehetővé teszi a rögzítési zóna érintés-mentes-, és ugyanakkor nagy pontosságú követését. Ezeknek alapján lehetőség nyílik arra, hogy különböző rögzítési módszereket tudjunk objektíven összehasonlítani s elemezni.

A javasolt módszer óriási előnye az, hogy érintésmentes, vagyis a vizsgált testek eredeti állapotát semmilyen módon nem befolyásolják. Így a vizsgálati eredmények 100%-ban hitelesek lesznek.

Ugyanakkor, a mérési pontossága is messze-menően jóval nagyobb a szokványos eljárásokénál.

Az úgynevezett Digitális Képkorrelációról, vagyis a „Digital Image Correlation” (vagy Video Image Correlation - VIC) van szó, melynek térbeli verziója (a VIC-3D) segítségével a szerzők különféle rugalmasságú rögzítési eljárásokat vizsgáltak. Itt az elmozdulás-mező felmérési (kiértékelési) pontossága 1 mikron nagyságrendű.

A módszert lehet statikus-, kvázi-dinamikus, illetve dinamikus körülmények között is alkalmazni.

A dolgozat illusztrálja a rendszer előnyeit, s ennek alapján felvázolja a biomechanikában a közeljövőben létrehozható alkalmazási területeit is, mint

<sup>(1)</sup>Universitatea „Transilvania” din Brasov, Romania  
(„Transilvânia” Egyetem Brassó, Románia)

<sup>(2)</sup>Autoliv, Brassó, Románia

A VIII. RAKK-on elhangzott előadás írott változata

nagypontosságú érintésmentes-, és ugyanakkor roncsolás-mentes módszert.

## 2. DIGITÁLIS KÉPKORRELÁCIÓ MÓDSZERE (VIC, DIC)

A fenti szempontokat figyelembe véve, a szerzők ennek az új, viszonylag kevésbé ismert, modern optikai módszer előnyeit mutatják be.

Mint említettük, ebben az esetben, az elmozdulás-mező feltérképezési (kiértékelési) pontossága

1 *mikrométer* nagyságrendű, s ugyanakkor 30-40 *mm*-es elmozdulásokat is jól tud érzékelni.

Hasonlóan az emberi szemhez, két videokamera segítségével egyidejűleg kép-párokat rögzítünk, melyeket a VIC-3D programja térbeli információként fog kezelni.

Elvileg a rendszer két nagyérzékenységű videokamerából áll, melyeket egy megfelelő merevségű alumínium rúdra rögzítünk (2. ábra), oly módon, hogy a vizsgálandó testhez képest szimmetrikus legyen az elhelyezésük.



2. ábra. A VIC-3D rendszer főbb elemei [7; 8]

A módszer elve röviden a következőkben foglалható össze:

Ezt viszont, vagy egy megfelelő merevségű és stabilitású háromlábra rögzítünk, vagy pedig a terhelő berendezésre (mint például a szakítógép oszlopaira, ha húzó-, illetve nyomó igénybevételt vizsgálunk).

A vizsgálandó testet előzőleg vízben oldódó aeroszolos oldattal fessük le, oly módon, hogy ennek felületén jó kontrasztos és ugyanakkor egyenlőtlen méretű és nagyságú foltok keletkezzenek.

A foltok mérete szoros összefüggésben van a vizsgálandó test méreteivel, a varható elmozdulások nagyságával, melyekre az illető cég megfelelő utasításokat nyújt.

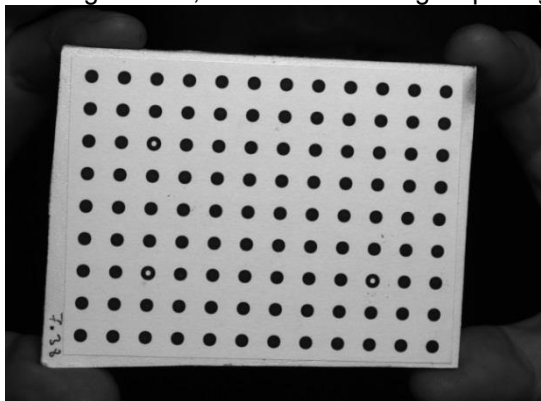
Az így előkészített felület szintjére beállítjuk (fókuszáljuk) a kamerákat, majd a vizsgálandó testet

onnan eltávolítva, és helyére (ennek volt síkjában) egy sajátos próbatestet helyezünk el, mely pontosan kijelölt távolságra elhelyezett pontthalmazt tartalmaz.

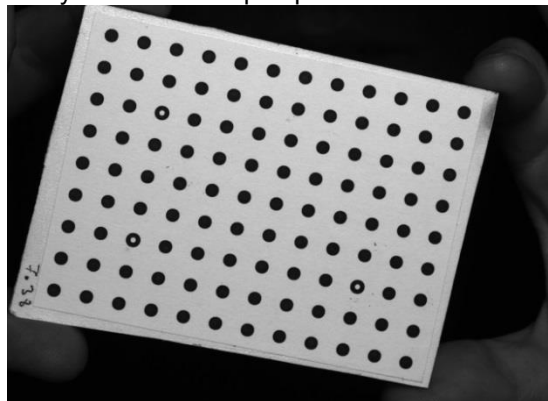
Ennek a speciális próbatestnek segítségével elvégezzük a rendszer bemérését (kalibrációját), melynek részleteit illusztráljuk (lásd a 3. ábrát).

A rendszer elvileg úgy működik, hogy a terheletlen állapotnak megfelelő két képet (kép-párat), melyek végül is egy-egy  $[n \cdot m]$  pixelből álló egység, egy előre kiválasztható alap-cella segítségével (mely jelen esetben  $5 \cdot 5 \text{ pixel}$  nagyságú négyzet), egy szintén előre kiválasztható lépéssel (itt például  $1...3 \text{ pixel}$  nagyságrendű), végigpásztázza, mint a szokványos képernyőt (4. ábra).

A program, az alap-cella minden adott helyzetének megfelelően, külön-külön megállapít egy



sajátos (egyedi) ekvivalens szürkességi fokot, melyet a cella középső pixeléhez rendel hozzá.



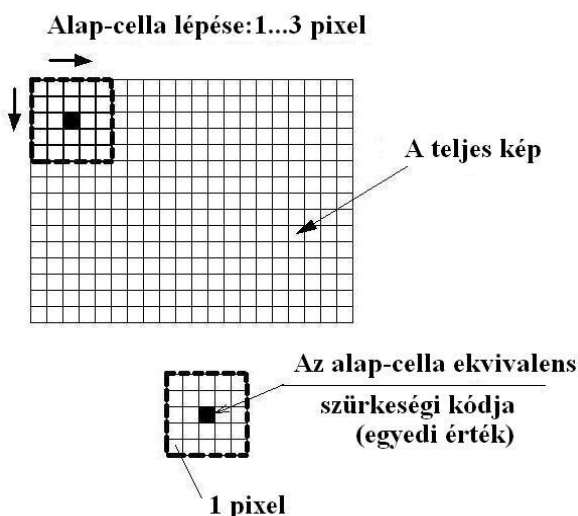
3. ábra. A bemérés (kalibráció) részletei

Minden, ilyen egyedi szürkességi fokkal ellátott (mellérendelt), alap-cellát tárol a program úgy a jobb-, mind a bal kamera esetében (tehát úgy a koordinátáit, mind a megfelelő szürkességi fokát is).

Ezeket az így egyedileg meghatározott cellákat követi a program, miközben ezek, a vizsgált test terhelése következtében, térbeli alakváltozást szenvednek.

A test igénybevétele alatt folyamatosan, mindkét kamera segítségével és egy tetszőleges mintavételezési frekvenciával követjük a jelenséget.

Utána pedig, elégséges egyetlen pontot azonosítani a bal-, és a jobb képsorozatok egyikéről, annak érdekében, hogy a program ennek alapján a többi pont-párokat (jobb-, és bal kép minden pont-párát) azonosíthassa és utána a keresett paramétereket (térbeli elmozdulás, térbeli fajlagos elmozdulás stb.) kiszámíthassa.



4. ábra. A pontok azonosításának elve

A nyújtott elmozdulások pixel nagyság-rendűek s ennek érdekében a kamerák felbontóképessége minél nagyobb kell, hogy legyen. Ugyanakkor, a használt optika kiválasztása is figyelembe kell, hogy vegye ezt az elvárást; erre a cég megfelelő utasítást nyújt.

A program egyszerűbb verziója is gyakorlatilag valós-idejű megfigyelést és kiértékelést biztosít, főként, ha a tanulmányozott jelenség statikus, vagy kvázi-statikusság. Az adatok feldolgozása, a mintavételezés szaporasága (frekvenciája) és képek száma függvényében néhány másodperc.

A rendszer előnyei közé tartoznak:

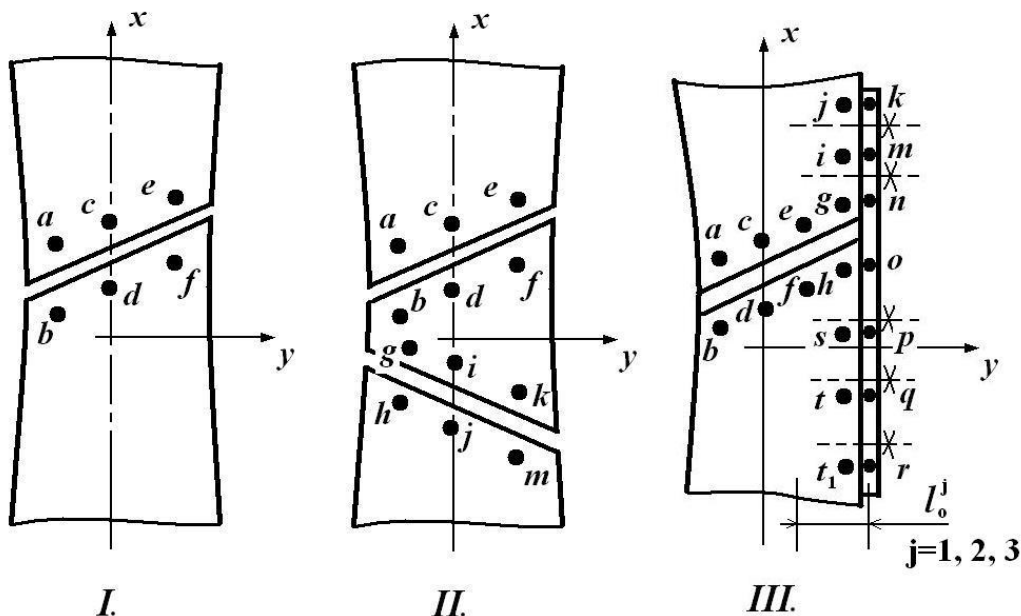
- nagy pontosságú és gyors adatfeldolgozást biztosít;
- egyszerű, fehér fény típusú, megvilágítást igényel;
- az adatok elemzése történhet egy egyenes, egy görbe mentén, s ezen adatok kimenthetők Excel formátumban, vagy pedig egyszerű-, illetve szín-es grafikonokban ábrázolhatók (hasonlóan a Véges Elemes Ábrázolással);
- érintésmentes módszer és térbeli elemzést biztosít;
- önműködően kiszűri a merevtest típusú elmozdulásokat s ezért a környezet rezgése például nem fogja a mérések eredményét/pontosságát befolyásolni;
- a használt optika függvényében mikros elmozdulásoktól néhány centiméteres értékekig alkalmazható.

### 3. KÍSÉRLETEK ELŐKÉSZÍTÉSE ÉS EREDMÉNYEK

Elvileg, a törés mindkét oldalán pontokat jelölünk ki, melyek pont-párok lesznek, mint például az s - p.

Ezen pont-pároknak rendre meghatározzuk/kiszámítjuk:

- az eredeti távolságukat  $\lambda_{s-p}^0$ ;
- a pontok közeledést, vagy távolodását  $\Delta\lambda_{s-p}$ ;
- ezen távolságok vetületeit az x, y és z tengelyekre, illetve
- a megfelelő fajlagos elmozdulásokat  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ .



5. ábra. A jellegzetes (számunkra fontos) pontok kijelölése különböző törések esetében:

*I.* Egyszerű, instabil törés, melynél belső rögzítőt alkalmaznak; *II.* Többszörös, instabil törés, melynél belső rögzítőt alkalmaznak; *III.* Instabil törés, melynél külső rögzítő-lapot alkalmaznak

| A rögzítő-lap típusa  | A j – szintnek megfelelő fajlagos lineáris $\varepsilon_x [-]$ |                   |                   | A j – szintnek megfelelő fajlagos lineáris $\varepsilon_y [-]$ |                   |                   |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
|                       | $\varepsilon_x^1$                                              | $\varepsilon_x^2$ | $\varepsilon_x^3$ | $\varepsilon_y^1$                                              | $\varepsilon_y^2$ | $\varepsilon_y^3$ |
| 1. típusú rögzítő-lap | 0.0003                                                         | 0.0020            | 0.0223            | 0.0600                                                         | 0.1320            | -0.3290           |
| 2. típusú rögzítő-lap | -0.0010                                                        | 0.0149            | 0.0237            | 0.0283                                                         | -0.0199           | -0.0213           |

A rendszer pontosságának, valamint lehetőségeinek illusztrálása érdekében bemutatjuk, a [2; 3] dolgozatok alapján, az alábbi táblázatban azokat a mérési eredményeket, melyeket a III. esetre nyertünk. Ennek érdekében, a rögzítő-lap mindkét oldalán, pont-párokat vettünk fel, úgy, hogy ezek

eredeti  $\lambda_0^j$ , ahol ( $j = 1, 2, 3$ ), távolsága megfelelt az  $\lambda_0^1 = 4.5 \text{ mm}$ ;  $\lambda_0^2 = 7.0 \text{ mm}$ , illetve  $\lambda_0^3 = 10.0 \text{ mm}$  értékeknek.

Utána a törött csontot többszörösen, ciklikusan terheltük 400 N axiális erővel s az alább bemutatott mérési eredmények ezt tükrözik.

Az itt-bemutatott eredmények alapján ki lehet mutatni, hogy melyik rögzítési típus felelne meg jobban, annak érdekében, hogy a viszonylagos elmozdulások a Perren professzor által meghatározott (javasolt) intervallumba maradjanak.

#### 4. ZÁRÓ GONDOLATOK

A bemutatott módszert lehet statikus-, kvázidinamikus, illetve dinamikus körülmények között is alkalmazni.

A szerzők eddigi tapasztalata alapján ez lenne a legmegfelelőbb módszer ilyen típusú objektív összehasonlító mérésekre.

Ugyanakkor, a már említett dolgozataikban a szerzők a megfelelő próbapadok leírását is részletesen bemutatták.

Ezek alkalmazása, egy részletes adatbázis létrehozását tudják lehetővé tenni, s ugyanakkor egy átfogó és hatékony objektív összehasonlító eljárás alapjait tudnák képezni.

A szerzők által ismertetett eljárás, valamint sajátfejlesztésű próbapadok, hasznos kiegészítói lehetnek az eddig ismert roncsolás-mentes eljárásoknak.

Ugyanakkor jelentős költségmegtakarítást is biztosíthatnak a szakorvosoknak, valamint a kórházaknak a legmegfelelőbb rögzítők beszerzésénél.

#### SZAKIRODALOM

- [1] Müller, M.E., Allgöwer, M., Bandi, W., Schenfelder, R., Willenegger, H., *Manual of Internal Fixation*, Springer Verlag, New York, 1970
- [2] Necula, R.D., *PhD Thesis*, "Carol Davila" University of Bucharest, Romania, 2011

- [3] Necula, R.D., Panait, Gh., Száva, I., Şamotă, I., *Evaluation of Micro-Movements in the Biomechanical Context of Bone Shaft Fracture Healing in Elastic versus Rigid Fixations*, *Annals of Academy of Romanian Scientists, Series: Medical Sciences*, Vol. 2, nr. 2., 2011, pp. 64-78, ISSN 2067—7766
- [4] Perren, S.M., at al., *Cortical Bone Healing. The Reaction of Cortical Bone to Compression*, *Acta Orthop. Scand.*, 1969 (Suppl.) 125, pp. 19-30
- [5] Perren, S.M., *Evaluation of the Internal Fixation of Long Bone Fractures. The Scientific Basis of Biological Internal Fixation: Choosing a Balance Between Stability and Biology*, *J. Bone Joint Surg. Br.*, 2002, Vol. 84 (8), pp. 1093-1110
- [6] Perren, S.M., *Physical and Biological Aspects of Fracture Healing with Special Reference to Internal Fixation*, *Clin. Orthop. Rel. Res.*, 1979, Vol. 138, pp.175-196
- [7] Sutton, A. M., Orteu, J. J., Schreier, W. H., *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*, Springer Verlag, 2010
- [8] \*\*\* VIC-3D 2010, *Reference Manual*, Correlated Solutions & ISI-Sys GmbH, USA, Kassel, Germany, 2010

**Kulcsszavak:** tartályok, nyomáspróba, korrózió, akusztikus emisszió

## 1. BEVEZETÉS

A Magyarországon sokezeres mennyiségben üzemelő pébégáztartályok – amelyek egyik jellegzetes példánya az 1. ábrán látható – időszakos vizsgálati előírásaiban és az ezekhez rendelt roncsolásmentes anyagvizsgálatokban olyan összetevők is jelen vannak, amelyek egy átfogó szakmai értékelésben nem mentesek az ellentmondásoktól. Példaképpen említhető a hidraulikus nyomáspróba, amelynek elvégzése az acéltartályok hosszú távú üzemeltetése során meghatározó kiváltó oka tartály belső oldali általános korróziójának, hiszen a nyomáspróba közegének teljes mértékű eltávolítása a tartályból gyakorlatilag lehetetlen.

Ugyancsak az ellentmondások példaként említhető az akusztikus emissziós vizsgálat (AE), amelynek elvégzésekor szintén bejuthat a tartályba és bent maradhat abban a korróziós hatású víz. Ennek a vizsgálatnak az ellentmondásai akkor is felmerülnek, amikor a saját közeggel végzett, ismételt nyomáspróbákat gyakran változatlan vagy alig növelt próbanyomással végzik. Ezeknél ugyanis a próbanyomás értéke állandó, ami elvileg is kizárja az AE-érzékeny hibák kimutatását, hacsak azok nem az előző vizsgálat óta képződtek, de az üzemi feltételek ismeretében ennek realitása is megkérdőjelezhető.

A fenti megállapításokat azoknak a tapasztalatoknak a nyomán vagyunk kénytelen megfogalmazni, amelyeket az elmúlt években szereztünk több száz pébégáztartály állapotának új szemléletű felülvizsgálata eredményeként. Ennek a Pébé-Coop Kft. megbízásából elvégzett felülvizsgálati programnak az lett a legfontosabb eredménye, hogy a megbízó számára kidolgoztunk egy olyan károsodáselemző szakértői rendszert, amely a tartályok gyártási, üzemeltetési és roncsolásmentes vizsgálati adatain alapulva alkalmas a tartályok károsodási mértékének és ez alapján a maradék élettartamának becslésére. Ezt a KOR-nak elnevezett szakértői rendszert a Pébé-Coop Kft. eredményesen alkalmazza a saját üzemeltetői tevékenységében.

## 2. A TARTÁLYOK ÁLLAPOTÉRTÉKELÉSÉT MEGHATÁROZÓ ÖSSZETEVŐK

A pébégáztartályok (1. ábra) állapotának értékelésére számos műszaki szempont alkalmazható.

MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport  
1111 Budapest, Műgyetem rakpart 3.



1. ábra – Öt köbméteres pébégáztartály

A károsodási osztályozási rendszer kidolgozása során mintegy 60 db ilyen tényezőt gyűjtöttünk össze, de ezek közül jelentős szerepet csak mintegy 8–10 tényező játszik az értékelésünk szerint, és ezeknek is számottevően eltérő a jelentősége. A fő károsító hatás a korrózió, amely a falvastagság csökkenését okozza, és mind a tartály külső, mind pedig a belső felületén felléphet. A külső korrózió a 2–3 rétegű védőbevonat sérüléseivel jelentkezik. A belső korrózió pedig a teljes belső felületen, mivel ott nincs védőbevonat, de azért itt sem feltétlenül egyenletesen. A tartályonként akár jelentősen is változó belső víztartalom miatt a belső korrózióról megállapítottuk, hogy az olykor szinte meg sem kezdődik a sokéves üzemeltetés ellenére. A korróziós szakirodalomban a propánra nézve „ $\leq 2$  Mils penetration/year”<sup>1</sup> korróziósebesség található. Belső korróziótól mentes esetben csak az eredeti, meleghegerlési reve borítja a felületet, szinte teljesen sértetlenül. Intenzív belső korróziós károsodás esetén pedig akár a teljes belső felületre kiterjed a rozsdásodás. Ezekre az esetekre mutat példát a 2–4. ábra. A 3–5 köbméteres tartályoknál a tervezők által alkalmazott korróziós ráhagyás 0,5–1,0 mm, a gyártók pedig jellemzően a szilárdsági és korróziós pótlékkal megnövel tervezési falvastagságnak is fölé választották a tartálypalástok lemezanyagát (vagy a meleghegerlési törések többlete miatt az „fölé választódott”). Ennek következtében a névlegesen 6,0 mm-es falvastagságú tartálypalástok tényleges falvastagság-tartaléka általában 1,5 mm körül mozog. Mindazonáltal működnek 5,7 mm-es, 9,0 mm-es lemezből gyártott 3–5 köbméteres pébégáztartályok is.

<sup>1</sup> A „mil” mértékegység az angol „inch” ezredrésze, vagyis 0,0254 mm.



2. ábra – Egy tartály belseje. Az általános korrózió a folyadékszint feletti részeket érintette

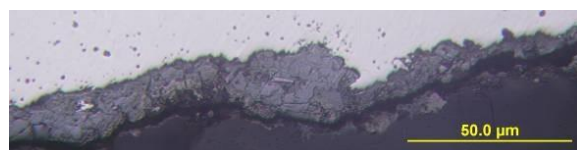


3. ábra- Egy tartály belső felületének részletei

### A HIDRAULIKUS NYOMÁSPRÓBA

Az állapotértékelésben fontos helyet kapott a tartály előző életében elvégzett víz közeggel végzett hidraulikus (tömörégi és szilárdsági) nyomáspróbák száma. Ezek azok az események ugyanis, amelyek során víz kerül a tartályba, és többnyire az ott marad is marad. A saját vizsgálataink és a MAROVŐSZ által szervezett látványos tartályrepsztestések, továbbá a hazai tartályvizsgálatok tapasztalatainak ismeretében – amelyek szerint a szilárdsági nyomáspróbák soha, sehol nem tártak

fel az üzembe helyezés után adekvát károsodást –, valamint számos, mértékadó szakember álláspontját ismerve ki kell jelenteni a következőket. A pégégáztartályok szilárdsági vizsgálata hidraulikus nyomáspróbával indokolatlan, sőt, ellenjavallt, ugyanis a tömörégi nyomáspróba után a vízzel végzett szilárdsági nyomáspróba az eredeti szakmai céljának elérésére érzéketlen, viszont a tartályba bevitt víz miatt belsőkorróziós hatás okozója.



4. ábra – Melegghengerlési reves (a felső képen) és víz okozta korróziótermék (az alsó képen) a tartálypalást belső felületén; a képek a tartálypalást hosszszelvényi csiszolatáról készültek a minta maratás nélküli, polírozott állapotában

### A PNEUMATIKUS NYOMÁSPRÓBA ÉS AZ AKUSZTIKUS EMISSZIÓS VIZSGÁLAT

A hidraulikus nyomáspróba helyett saját, veszélyes közeggel való gáz-nyomáspróba és az ugyancsak gáz-nyomáspróbának minősülő, a folyadék fölötti gázpárnával végzett, ún. kombinált nyomáspróba elvégzési lehetőségét és feltételeit a Nyomástartó berendezések műszaki-biztonsági szabályzata, V. fejezet 3.1.10.c–d és 3.2. szakasza határozza meg. Az akusztikus emissziós vizsgálatot a szabályzat csak, mint a gáz-nyomáspróba esetén alkalmazható lehetséges vagy ajánlott különleges ellenőrzési módszerek egyik példáját nevezi meg az V.3.2.3.h és a 3.2.5.c szakaszban, továbbá a szabályzat 2. melléklete 13.2. szakaszában. Ugyanígy a lehetséges módszerek egyikeként nevezi meg az AE-vizsgálatot a pégégáztartályok ellenőrzésére vonatkozó, MSZ EN 12817:2010 szabvány is. Ez legalább 10%-os próbanyomás-növelést ír elő a korábbi legnagyobb nyomáshoz képest, de a biztonsági előírás szerint a nyomás nem haladhatja meg a tartályra maximálisan megengedhető nyomás 110%-át.

A 3–5 m<sup>3</sup>-es pégégáztartályokra az engedélyezési nyomás a gyakorlat szerint 16 bar; a pneumatikus nyomáspróba nyomása tehát legfeljebb 17,6 bar lehet. A gyártóműi hidraulikus nyomáspróba nyomása viszont általában 20 bar. Mindebből az következik, hogy az időszakos felülvizsgálatok alkalmával a 20 barral már a gyártóműben megnyomott tartályokat az AE- vizsgálatához legalább 22 baron kellene gáz-nyomáspróbázni, de a biztonsági előírás miatt csak 17,6 baron lehet. Emiatt a

gáz-nyomáspróbával összekapcsolt AE-vizsgálat mint a pébé-gáztartályok időszakos ellenőrzési módszerének hibafeltáró képességét meg kell fontolni. A hibafeltáró képesség megfontolásához kívánatos lenne a tapasztalatok széleskörű összegzése és értékelése, különösen azért, mert születtek olyan javaslatok is, amelyek indokoltsága vitatható. Ennek részeként említhetők a saját tapasztalatok. A pébégáztartályok felszakítási vizsgálata közbeni alakváltozások nyúlásmérő bélyeges mérése, valamint a repedésképződési és repedésterjedési folyamatok akusztikus emissziós vizsgálata szerint még az olyan tartályokon is csak a felszakadási nyomást közvetlenül megelőző nyomásszakaszban keletkeztek érdemleges akusztikus jelek, amelyeken előzetesen nagyméretű és a falvastagság felét is elérő mélységű műhibákat hoztak létre. Ez nem meglepő, hiszen az AE alapelve, hogy a nem növekedő folytonossági hiányok nem adnak akusztikus jelet. Ráadásul a szóban forgó, előre preparált tartályok felszakítási vizsgálatánál (5. ábra) mért nyomások lényegesen meghaladták az üzemelő pébé-gáztartályok gáz-nyomáspróbái és hidraulikus nyomáspróbái során alkalmazott nyomásokat.

A bevezetőben említett tartály-felülvizsgálati program keretében elvégzett akusztikus emissziós vizsgálatokban a nyomás növelésekor a jelek intenzitása nagyon kicsi volt, és még a közvetlenül a felszakadás előtti utolsó szakaszban is csak enyhén növekedett a jelek darabszáma. A jelek amplitúdói is csak a repedésterjedési szakaszban váltak nagyobbakká.



5. ábra – Öt köbméteres pébégáztartály műhibája a felszakítóvizsgálat után

## FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM

1. MSZ EN 13554:2011 Roncsolásmentes vizsgálatok. Akusztikus emissziós vizsgálatok. Általános alapelvek

2. MSZ EN 12817:2010 LPG-berendezések és -tartozékok. Legfeljebb 13 m<sup>3</sup> űrtartalmú, cseppfolyósított szénhidrogéngázt (LPG-t) tároló tartályok ellenőrzése és újraminősítése
3. Schweizer PA: Corrosion resistance tables; Part C, ISO-POT. Marcel Dekker, Inc. NewYork – Basel, 2004. 1881. oldal
4. Tscheliesnig P: Periodical testing of LPG vessels (above- and underground) based on validated acoustic emission procedure within Central Europe. In: Kanji Ono (szerk.): Advances in Acoustic Emission – 2007; Proceedings of the Sixth International Conference on Acoustic Emission. The Acoustic Emission Working Group and Acoustic Emission Group, Encino, CA, USA, 217–222.
5. Tscheliesnig P, Schauritsch G: Inspection of LPG vessels with AE examination. Journal of Acoustic Emission, 18 (2000) 138–143.
6. Rauscher F: Laboratory Experiments for Assessing the Detectability of Specific Defects by Acoustic Emission Testing. Journal of Acoustic Emission, 26 (2008) 98–108.
7. Szűcs P, Kenyeres D, Nagy Zs: Összehasonlító mérések Defektophone és Sensophone akusztikus emissziós mérőkészülékkel. Anyagvizsgálók Lapja, 14 (2004:2) 53–56.
8. Kindlein M, Fodor O: Akusztikus aktivitás akusztikus emisszió vizsgálatoknál. Anyagvizsgálók Lapja, 10 (2010:1–2) 37–41. oldal
9. Pál Cs: Akusztikus emisszió, a hagyományos időszakos vizsgálatok tükrében. [www.avi-szak.hu/Aqv3/Eloadasok/2\\_09\\_palcsaba.pdf](http://www.avi-szak.hu/Aqv3/Eloadasok/2_09_palcsaba.pdf)
10. Szűcs P, Zilahi Z: Földdel fedett PB-gáztartályok akusztikus emissziós vizsgálata. Anyagvizsgálók Lapja, 6 (1996:4) 107–109.
11. Szűcs P: Az akusztikus emissziós integritásvizsgálat lehetősége a nyomástartó berendezések üzembe helyezésénél, időszakos ellenőrzésénél. Anyagvizsgálók Lapja, 12 (2002:1) 5–8.
12. Zolnay G: Az akusztikus emissziós vizsgálat kiértékelési problémái. Anyagvizsgálók Lapja, 5 (1995:2–3) 88–91.
13. Szélig K: Akusztikus emisszió az állapotvizsgálatban. Anyagvizsgálók Lapja, 6 (1996:1) 23–26.

## TÖRÉSMECHANIKA

## FRACTURE MECHANICS

BETON ÉS SZÁLERŐSÍTÉSŰ BETON HÚZÓ-HAJLÍTÓ SZILÁRDSÁGÁNAK MEGHATÁROZÁSA

NEMLINEÁRIS SZÁMÍTÁSOKHOZ

DETERMINATION OF THE FLEXURAL TENSILE STRENGTH OF CONCRETE AND FIBRE REINFORCED CONCRETE FOR NONLINEAR CALCULATIONS

JUHÁSZ KÁROLY PÉTER

**Kulcsszavak:** beton, szálerősítésű beton, húzó-hajlító szilárdság, törési energia

**Keywords:** concrete, fiber reinforced concrete, flexural tensile strength, fracture energy

### KIVONAT

A beton és szálerősítésű beton húzó-hajlító szilárdságának meghatározására a jelenlegi irányelvek a törőerőt veszik alapul. Ez az eredmény lineáris számításokhoz megfelelő, de amint figyelembe vesszük az anyag törési energiáját, a numerikusan visszaszámolt törőerő nagyobb lesz. A cikkemben olyan anyagmodelleket mutatok be, amelyek jól használhatóak nemlineáris számításokhoz.

### Abstract

The determination of concrete and reinforced concrete flexural tensile strength of the current guidelines are based on the ultimate strength. This result is suitable for linear calculations, but considering the fracture energy, the numerically calculated peak load will be bigger. I present in my article some material models that are appropriate for nonlinear calculations.

### 1. BEVEZETÉS

Beton- és vasbeton szerkezetek hajlításra való méretezésénél legtöbb esetben a beton húzó illetve húzó-hajlító szilárdságát és törési energiáját elhanyagolják. Ez az elhanyagolás részben annak köszönhető, hogy a beton nyomószilárdságának a húzószilárdsága csak mintegy tizede, így az elhanyagolása nem jelentős a végeredményt tekintve, illetve a törési energia figyelembe vétele bonyolult nemlineáris számítást igényelne. Ennek megfelelően a szabványok nem foglalkoznak a törési energia szabványosításával, ajánlásokat csak az irodalomban találhatunk. Szálerősítés alkalmazásával viszont ez a törési energia több százszorosára is nőhet, így érdemes figyelembe venni a számítás során.

Cikkemben azt vizsgálom, hogy középpontos gerenda hajlítási tesztből mért erő-lehajlás illetve erő-CMOD (crack mouth opening displacement – repedés megnyílás távolság) értékekből hogyan

lehet megfelelő anyagra jellemző paramétereket meghatározni, azon belül is a hajlító szilárdságot.

### 2. PROBLÉMAFELVETÉS

Húzásra és nyomásra különbözőképp viselkedő, rideg anyagok hajlítási tesztjeinél a maximális erő (törőerő) egyszerűen és egyértelműen kimérhető érték, így az irányelvek és szabványok lineáris anyagmodell feltételezésével ebből a törőerőből és hozzá tartozó nyomatékból számítják a szélső szálban ébredő feszültséget, azaz a húzó-hajlító szilárdságot [1-3]. Ez a közelítés rideg anyagoknál jól használható, de a beton kvázi-rideg anyag és a törés után rendelkezik némi képlékenységgel, amit törési energiának nevezünk. Amint ezt figyelembe vesszük a húzó-hajlító szilárdság lineáris úton való meghatározása nem ad pontos eredményt.

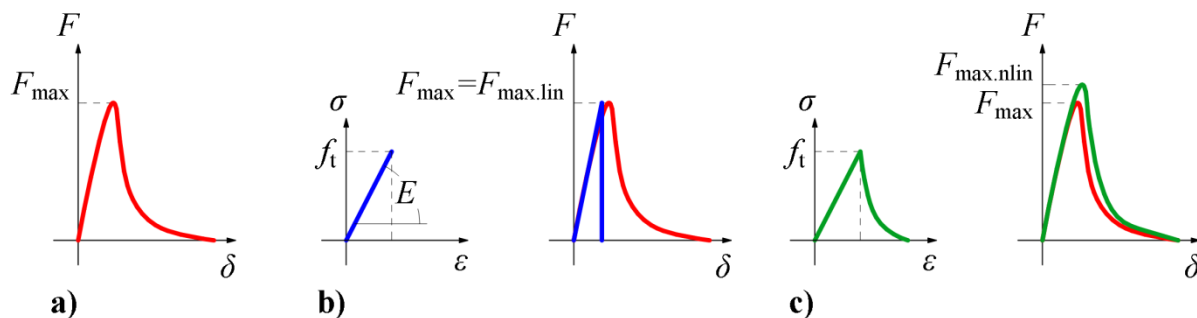
Vegyük egy gerenda hajlítási tesztjének erő-lehajlás diagramját (1.a. ábra). Ezt a diagramot modellezzük numerikusan, lineáris és nemlineáris anyagmodellel.

Lineáris, rideg anyag feltételezésével közvetlenül a törőerőből ( $F_{max}$ ) számítható a húzó-hajlító szilárdság ( $f_t$ ) valamint a rugalmassági modulus ( $E$ ) ismeretében  $\sigma$ - $\epsilon$  összefüggés. Ezekkel a anyagparaméterekkel visszaszámolt törőerő ( $F_{max,lin}$ ) pontosan megegyezik a kísérleti értékkel, törési energia elhanyagolásával (1.b. ábra).

Nemlineáris anyagmodellel a törési energiát is figyelembe tudjuk venni és a  $\sigma$ - $\epsilon$  diagramhoz egy  $\sigma$ - $w$  (feszültség-repedéstágasság) diagramot csatolhatunk. A repedéstágasságot egy karakterisztikus hossz segítségével ( $L_t$ ) átalakíthatjuk megnyúlássá. Az így kapott  $\sigma$ - $\epsilon$  diagrammal visszaszámolt törőerő ( $F_{max,nlin}$ ) azonban már nagyobb lesz, mint a kísérleti eredmény (1.c. ábra).

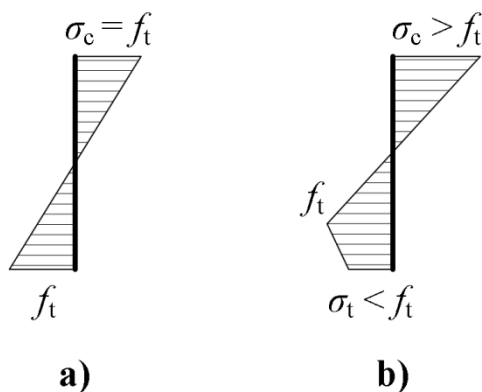
Ennek a növekedésnek az az oka, hogy a törőerőhöz tartozó szélső szál feszültség a  $\sigma$ - $\epsilon$  diagram eső ágán van (2. ábra).

Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék; Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Szilárdságtani Labor laborvezető, [juhasz@sztt.bme.hu](mailto:juhasz@sztt.bme.hu)



1. ábra: teszteredmény és numerikus modellezése

- a) gerenda hajlítási erő-lehajlás diagramja  
 b) lineáris anyagmodell és numerikus erő-lehajlás diagramja  
 c) nemlineáris anyagmodell és numerikus erő-lehajlás diagramja

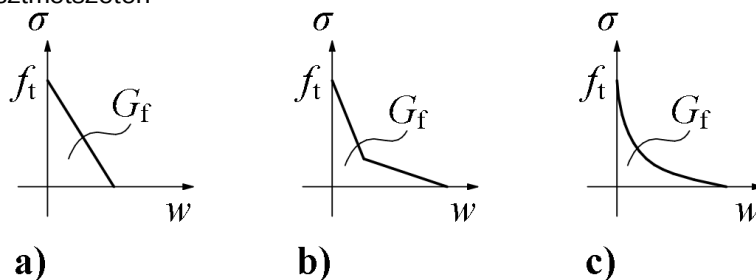


- a) lineáris anyagmodell b) nemlineáris anyagmodell

### 3. TÖRÉSI ENERGIÁK MEGHATÁROZÁSA

Beton és szálerősítésű beton törési energiájának meghatározására sokféle ajánlás létezik. Beton esetében Papanikolaou és Kappos [4] különböző nyomószilárdságú betonokhoz ajánl törési energia ( $G_f$ ) értékeket, amely gyakorlatilag a  $\sigma$ - $w$  diagram alatti terület nagysága. Maga a  $\sigma$ - $w$  diagram több féleképpen állatható elő, néhány ezek közül a 3. ábrán láthatóak.

2. ábra: a törőerőhöz tartozó feszültség eloszlás a keresztmetszeten



3. ábra: lineáris, bilineáris és exponenciális feszültség-repedésmegnyílás diagramok

Szálerősítésű betonnál a legelterjedtebb a 3 pontos, a beton bilineáris diagramjához hasonló  $\sigma$ - $\varepsilon$  diagram definiálása, amely  $\sigma$  és  $\varepsilon$  értékeire minden irányelv más-más meghatározást ad. Habár az előzőek alapján láttuk, hogy nemlineáris anyagmodell esetében a számított törőerő nagyságát az első ág befolyásolja, az irányelvek mégis a maximális erőhöz tartozó lineáris úton számított feszültséget használják a diagram megalkotásakor. Ebből kifolyóan a jelenlegi irányelvek szerint felállított anyagmodellekkel végzett számításoknál a törőerő (törőnyomaték) nagyobb lesz a valós értéknél.

### 4. AJÁNLOTT MODELLEK

A törési energia megfelelő figyelembe vételéhez kétféle anyagmodellt ajánlok.

Vegyünk egy középpontos, kéttámaszú gerenda hajlítási kísérletet, amelynél ismert a maximális középponti erő:  $F_{\max}$ . Ebből lineáris úton számítható a húzó-hajlító szilárdság:

$$f_{t, \text{lin}} = \frac{F_{\max} l}{4W} \quad (1)$$

ahol:

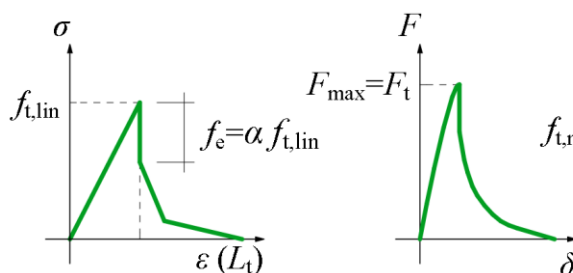
- $f_{t,lin}$ : lineáris úton számított húzó-hajlító szilárdság
- $l$ : gerenda támaszköze
- $W$ : keresztmetszeti modulus

Az **A** jelű anyagmodellnél a lineáris úton meghatározott húzó-hajlító szilárdságot ( $f_{t,lin}$ ) nem, csak a  $\sigma$ - $\varepsilon$  diagramot módosítjuk: a húzó-hajlító szilárdság elérése után egy függőleges eső szakaszt helyezünk el.

$$f_e = \alpha f_{t,lin} \quad (2)$$

ahol:

- $f_e$ : az eső szakasz hossza
- $\alpha$ : módosító tényező,  $\alpha < 1$



**a) A jelű anyagmodell**

4. ábra: A és B jelű anyagmodell  $\sigma$ - $\varepsilon$  diagramja és numerikus erő-lehajlás diagramjuk

Minkét modell közös tulajdonsága, hogy a kísérlet numerikus modellezésekor nem becsüli felül a törőerő értékét.

## 5. VERIFIKÁCIÓ

A verifikáció során egy C20/25 szilárdsági osztályú betongerenda felezőpontos hajlítási erő-lehajlás diagramját modellezem numerikusan 4 féle anyagmodellel:

- **L1**: lineárisan meghatározott húzó-hajlító szilárdsággal ( $f_{t,lin}$ ) és törési energia nélkül ( $G_f = 0$ )
- **L2**: ugyanez irodalomban ajánlott törési energiával ( $G_f = G_{f,C20}$ )
- **A** anyagmodell
- **B** anyagmodell.

A kísérlet főbb adatai és eredményei:

- $b = 150$  mm (gerenda szélessége)
- $h = 125$  mm (gerenda magassága közepén a bemetszésnél)
- $F_{max} = 11\,878$  N (maximális erő)

Ebben az esetben a beton ridegen fog törni, az erő-elmozdulás diagramnál a maximális erő elérésekor hirtelen esni fog a görbe. Ez azt is jelenti, hogy a maximális erő és a törőerő megegyezik:  $F_{max} = F_t$  és nem vesszük figyelembe a  $\sigma$ - $\varepsilon$  diagram eső ágának hatását (4.a. ábra).

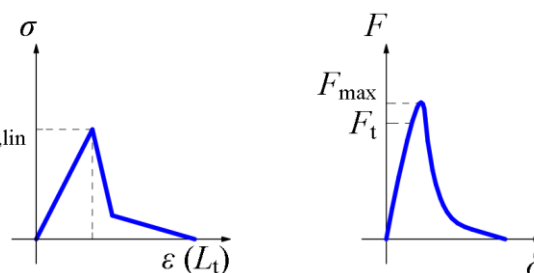
A **B** jelű anyagmodellnél a lineáris úton meghatározott húzó-hajlító szilárdságot csökkentjük:

$$f_{t,nlin} = \beta f_{t,lin} \quad (3)$$

ahol:

- $f_{t,nlin}$ : módosított húzó-hajlító szilárdság
- $\beta$ : módosító tényező,  $\beta < 1$

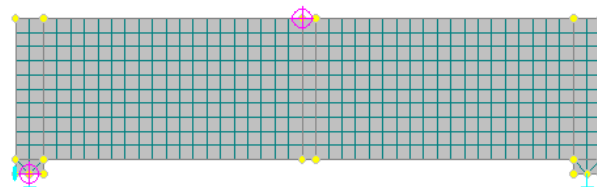
Ebben az esetben a maximális erő nagyobb lesz a törőerőnél:  $F_{max} > F_t$ , azaz a modell figyelembe veszi az eső ág törőerő növelő hatását is (4.b. ábra).



**b) B jelű anyagmodell**

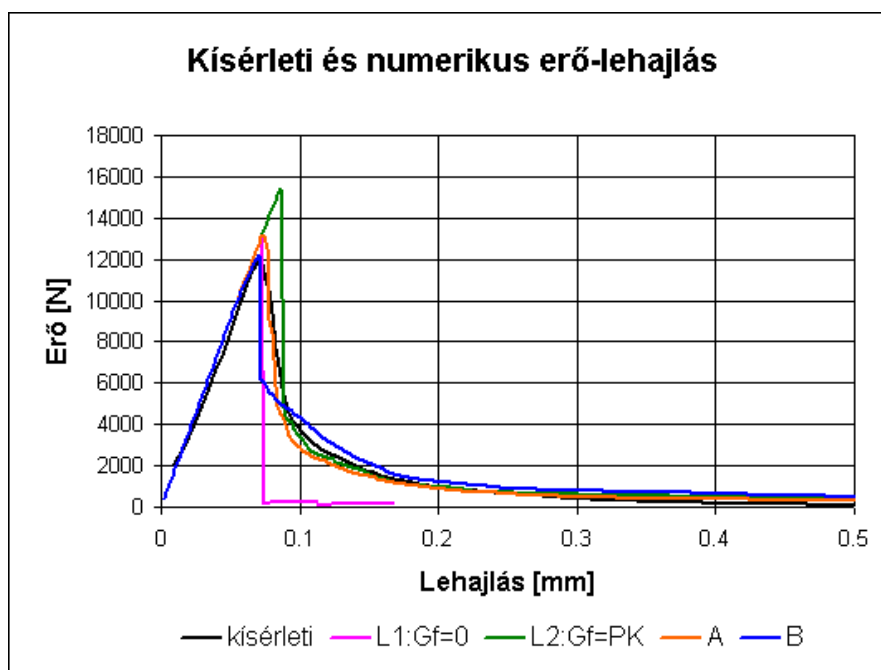
- $f_{t,lin} = 3,801$  MPa (lineáris úton meghatározott húzó-hajlító szilárdság)
- $G_{f,C20} = 4,87 \times 10^{-5}$  MN/m (törési energia Papanikolaou és Kappos ajánlása szerint)
- $\alpha = 0,3$
- $\beta = 0,7$

A numerikus modell az 5. ábrán látható, a számításokat ATENA végelem szoftverrel végeztem.



**5. ábra: numerikus modell**

A kísérleti értékek grafikus összehasonlítása az 6. ábrán, a maximális erők összehasonlítása pedig az 1. táblázatban látható.



**6. ábra:** kísérleti és numerikus értékek összehasonlítása

| $F_{\max}$ [N] |        |        |        |        |
|----------------|--------|--------|--------|--------|
| kísérleti      | L1     | L2     | A      | B      |
| 11 878         | 13 090 | 15 450 | 12 240 | 13 150 |
| 100%           | 110%   | 130%   | 103%   | 110%   |

**1. táblázat:** kísérleti és numerikus maximális erők összefoglalása

A verifikáció során igazoltam az új modellek előnyeit: az **A** és **B** jelű anyagmodell sokkal közelebb áll a kísérleti eredményhez, mint az irányelvekben ajánlott, maximális erőhöz tartozó szilárdság meghatározás. Törési energiát is figyelembe vevő számításoknál a törési energia vagy a húzó-hajlító szilárdság módosítása szükséges a pontos modellezés eléréséhez. Az  $\alpha$  és  $\beta$  paraméterek meghatározása függ a beton húzó-hajlító szilárdságától és a törési energiájától, meghatározásukra iterációs eljárást igényel.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az új, nemlineáris anyagmodellel dolgozó végelem programok már képesek kezelni a beton törési energiáját (Sbeta, Atena, Diana). A törési energia figyelembe vétele egy új szemléletet követel meg a tesztelési eljárásoknál is: nem feltétlen a maximális erőt kell alapul vennünk a húzó-hajlító szilárdság meghatározásához.

Cikkemben új anyagmodelleket ajánlok a húzó-hajlító szilárdság és a törési energia felvételére. Verifikáció során egy beton gerenda hajlítási teszteredményét ellenőrzöm numerikusan a bemutatott új anyagmodellek segítségével.

Ezekkel az új anyagmodellekkel pontosabban határozható meg a szálerősítésű beton anyagmodellek első, lineáris szakaszának hossza illetve a kezdeti eső ága is.

## IRODALOM

- [1] Vandewalle, L., et al. (2002) „RILEM TC 162-TDF : Test and design methods for steel fibre reinforced concrete”, Materials and Structures, Vol. 33, January-February 2000, pp 3-5
- [2] CNR-DT 204/2006 (2006), „Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures”, design recommendation, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Rome
- [3] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (2008), „Richtlinie Faserbeton, Ausgabe Juli 2008”
- [4] Papanikolaou, V.K. és Kappos, A.J. (2007) „Confinement-sensitive plasticity constitutive model for concrete in triaxial compression”, International Journal of Solids and Structures, 44(21), 7021-7048

## KISCIKLUSÚ FÁRASZTÁS

## LOW CYCLE FATIGUE

### A KISCIKLUSÚ TERMOMECHANIKAI FÁRADÁS FOLYAMATÁNAK ÉRTÉKELÉSE STUDY OF LOW CYCLE THERMOMECHANICAL FATIGUE PROCESS

FEKETE BALÁZS

**Kulcsszavak:** kisciklusú fáradás, termomechanika, anyagvizsgálat

**Keywords:** low cycle fatigue, thermomechanics, material testingbevezetés

### ABSTRACT

During the "High performance structural materials" research project we are going to deal with the properties and degradation of the structures of the materials which are applied in technology systems of nuclear power plant and which has an important role in the structural integrity of the devices which determine the safety of the power station. In this paper we have summarized the literature review and the theoretical background of this project.

### ABSZTRAKT

A Főiskolánkon folyó „Nagy teljesítőképességű szerkezeti anyagok kutatása” elnevezésű kutatási munka keretein belül erőműi acélok ciklikus hőmérséklet és mechanikai terhelések hatására bekövetkező károsodásával fogunk foglalkozni. Jelen közlemény célja a kutatómunkát megalapozó irodalomkutatási tevékenységet összefoglalni. Bemutatjuk kisciklusú termomechanikai fárasztóvizsgálat vizsgálati módszereit, a szükséges berendezéseket, a próbatestek változatait. A munka második fele betekintést ad a fáradási kísérletek kiértékelésének módszereiről, az alakváltozás amplitúdóra és az alakváltozási munkára épülő modellekről.

### BEVEZETÉS

A legtöbb gépészeti szerkezetünket úgy méretezzük, hogy annak anyagában a folyáshatár biztonsági tényezővel csökkentett értékénél nagyobb igénybevétel ne jöhessen létre. Ennek ellenére elkerülhetetlen olyan lokális feszültséggyűjtő helyek kialakulása, melyekben az előre nem ismert járulékos terhelések hatására bizonyos mértékű képlékeny alakváltozás lép fel. Ilyen helyek lehetnek például a hirtelen keresztmetszet változások, hegesztési varratok környezete, furatok, vagy a berendezés olyan részei, melyben bizonyos időtartamra olyan inhomogén hőmérsékletmező alakul ki, amely jelentős feszültséget okoz a szerkezet anyagában, és amellyel a méretezésnél nem számoltunk. Ha ezen kritikus helyeken a képlékeny alakváltozás csak egyszer jön létre, akkor annak mértékétől függően a feszültségmező átrendeződésével és ezen hely környezetében lévő magas feszültség gradiens leépülésével az anyag teherbíró képessége növekedhet a képlékeny keményedés által. Azonban ha ezek a méretezés során elhanyagolt folyáshatár feletti igénybevételek többször megismétlődnek az anyag mikroszerkezete a képlékeny alakváltozás hatására megváltozik, benne repedések keletkeznek és terjednek. Ez a folyamat végül a szerkezeti integritás megszűnéséhez, azaz töréshez vezet. A fent leírt jelenséget nevezi a szakirodalom kisciklusú fáradásnak.

| Jelölések              |                                  |                              |                               |
|------------------------|----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| $\Delta \varepsilon_p$ | képlékeny alakváltozás tartomány | $\Delta W^p$                 | képlékeny alakváltozási munka |
| $\Delta \varepsilon_e$ | rugalmas alakváltozás tartomány  | $a, \alpha, \beta, B_0, T_k$ | anyagállandók                 |
| $\Delta \sigma$        | feszültségtartomány              | $\nu$                        | vizsgálati frekvencia         |
| $E$                    | rugalmassági modulus             | $N_f$                        | tönkremeneteli ciklusszám     |
| $R_{p0.2/20}$          | 20 °C-on mért folyáshatár        | $m$                          | Keményedést kifejező szám     |
| $n$                    | ciklikus keményedési kitevő      |                              |                               |

A Főiskolánkon folyó „Nagy teljesítőképességű

Dunaújvárosi ECOTECH ZRT.-nél kutató-fejlesztő mérnök, valamint Dunaújvárosi Főiskolán fiatal kutatói munkakört tölt be

szerkezeti anyagok kutatása” elnevezésű kutatási munka keretein belül erőműi acélok ciklikus hőmérséklet és mechanikai terhelések hatására bekövetkező károsodásával fogunk foglalkozni.

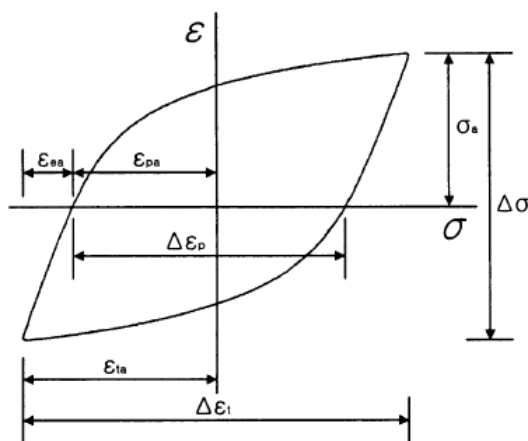
Jelen közlemény célja a kutatómunkát megalapozó irodalomkutatási tevékenység összefoglalása.

## A KIS ÉS NAGYCIKLUSÚ FÁRADÁS KÖZÖTTI HATÁRÁTMENETRŐL

Fontos megemlíteni, hogy a kisciklusú és a nagyciklusú fáradás tönkremeneteli ciklusszáma között általánosan nem húzódik éles határvonal és a kétféle károsodási mód valódi fizikai tartalmát nem az elnevezésükben kell keresni. Míg a nagyciklusú fáradás főként arányossági határon belüli feszültség szinten jelentkezik, addig kisciklusú fáradásról csak akkor beszélhetünk, ha az anyagban jelentős mértékű képlékeny alakváltozás is fellép. Coffin [6] cikkében bevezeti az átmeneti kifáradási élettartam ( $N_{tr}$ ) fogalmát. Ez alatt az adott anyagminőség fárasztóvizsgálata során mért azt a ciklusszámot érti, mely egyenlő mértékű rugalmas és képlékeny alakváltozás mellett okoz tönkremenetelt, tehát:

$$\Delta \varepsilon_p = \Delta \varepsilon_e.$$

A további elemzéshez be kell vezetnünk a hiszterézis hurok fogalmát, mely alatt a fárasztóvizsgálatok során rögzített nyúlás-feszültség görbéket értjük (1. ábra).



1. ábra – Hiszterézis görbe

Ezt a későbbiekben részletesen bemutatjuk. Adott vizsgálat esetén a kifáradási módra a hiszterézis hurok alakjából következtethetünk. Amennyiben a görbe széles és nagy területet foglal körül, ebben az esetben fennáll:

$$\Delta \varepsilon_p \gg \Delta \varepsilon_e,$$

ezért kisciklusú fáradásról van szó a jelentős képlékeny alakváltozás következtében. Ha görbe által határolt terület kicsi és a diagram alakja „karcsú”:

$$\Delta \varepsilon_p \ll \Delta \varepsilon_e,$$

ebben az esetben nagyciklusú fáradás lép fel, mivel az alakváltozás döntő mértékben rugalmas. A fenti két eset közül az első az átmeneti kifáradási élettartam alatti ciklusszám mellett, míg a második az átmeneti kifáradási élettartam feletti ciklusszám esetén okoz tönkremenetelt. Ezek alapján az adott anyag fáradási viselkedésére az anyagra vonatkozó ( $N_{tr}$ ) paraméterből következtethetünk. Általánosan kijelenthető, hogy kisebb folyáshatárú anyagok átmeneti kifáradási élettartama magasabb, mint a nagyobb szilárdsági tulajdonságokkal rendelkezőké. Ez könnyen belátható, mivel adott teljes alakváltozáshoz ( $\Delta \varepsilon$ ) alacsony folyáshatárú anyagnál magas képlékeny feszültség szint tartozik, mely a hiszterézis hurok területét növeli, ezáltal kis  $\Delta \varepsilon$  - és nagy ciklusszám – mellett fog teljesülni a  $\Delta \varepsilon_p = \Delta \varepsilon_e$  egyenlőség.

További fontos különbség figyelhető meg a kétféle kifáradási mód között. A kisciklusú fáradás során keletkező jelentős képlékeny alakváltozások miatt, már a kifáradás korai szakaszában – feszültség szinttől függően akár az első pár ciklusban – keletkeznek mikrorepedések, így a kisciklusú fáradás során a repedésterjedés dominál. A kis alakváltozás mellett végbemenő nagyciklusú fáradás esetén, ezzel ellentétben a kifáradási folyamat jelentős részében a repedések keletkezése megy végbe. A nagyciklusú fáradás során megfigyelhető alakváltozás-ciklusszám kapcsolatot a rugalmas alakváltozás esetén érvényes Basquin összefüggés írja le:

$$\Delta \varepsilon_e = \frac{\Delta \sigma}{E} = \frac{B}{E} N_f^{-\beta'}.$$

A kisciklusú fáradás leírásának egyik lehetséges módja a Coffin-Manson modell mely a képlékeny alakváltozás tartomány ( $\Delta \varepsilon_p$ ) és a törési ciklusszám ( $N_f$ ) között teremt kapcsolatot, és amellyel a későbbi fejezetekben részletesen foglalkozunk:

$$\Delta \varepsilon_p = C \cdot N_f^{-\alpha}.$$

Jelen fejezetben azért említjük mivel a teljes alakváltozás-ciklusszám kapcsolatának leírása a fentiek összege:

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_e + \Delta \varepsilon_p = \frac{B}{E} N_f^{-\beta'} + C \cdot N_f^{\alpha}.$$

## A KISCIKLUSÚ TERMOMECHANIKAI FÁRADÁS ELŐFORDULÁSA A GÉPÉSZETBEN

Az energiaipari, vegyipari nyomástartó edények és csővezetékek rendszerint jelentős nyomás és hőmérsékletváltozásnak vannak kitéve. Még a statikus üzeműnek tekintett készülékek igénybevételénél is.

tele is nagymértékben változik indításkor és leálláskor, fűtéskor és hűtéskor, meleg vagy hideg anyag betáplálásakor. Ezek a járulékos feszültségek sokszor jóval nagyobbak a tervezett üzemi feszültségeknél és gyakran okoznak kisciklusú fáradást [14]:

- Hideg vagy meleg közeg gyors betáplálása
- Indításkor, leálláskor fellépő nyomás és hőmérsékletváltozások okozta feszültség
- Rezgésből származó feszültségek
- Hirtelen szállókésekből származó járulékos feszültségek
- Kapcsolódó alkatrészek különböző hőtágulási együtthatói okozta feszültségek (pl. plattírozott nyomástartó edények, armatúrák)

## VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

### VIZSGÁLATTECHNIKAI KÉRDÉSEK

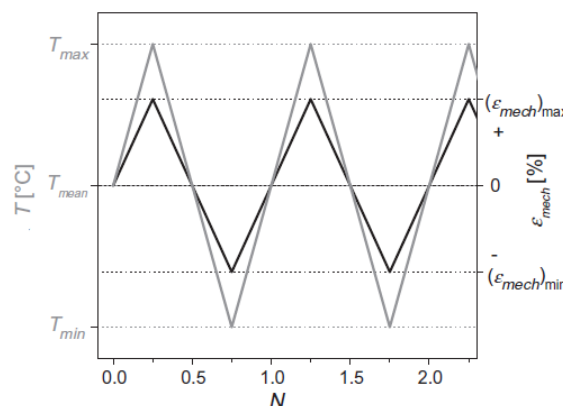
A szerkezeti anyag kisciklusú fáradása során a feszültség és az alakváltozás között a kapcsolat nem lineáris. El kell azt dönteni, hogy a vizsgálatok során melyiket tartjuk állandó értéken, vagyis a feszültség- vagy az alakváltozás amplitúdó legyen-e a konstans paraméter. Ha a folyamatot a feszültség-alakváltozás koordináta-rendszerben ábrázoljuk, az 1. ábrán látható hiszterézis görbét kapjuk. Amennyiben megvizsgáljuk az anyag makroszkopikus válaszát a fellépő terhelésekre megállapíthatjuk, hogy az alakváltozás először a Hooke-törvény szerinti rugalmas viselkedést mutat.

A terhelőerőt tovább növelve megjelenik a képlékeny alakváltozás, melyet megszüntetve maradó nyúlást észlelünk. Amennyiben a próbatest eredeti méretét szeretnénk visszakapni nyomófeszültséget kell létrehozni a darabban. Ha ezt a terhelést tovább növeljük, a próbatest rövidül, az eredeti alak eléréséhez újra húzó igénybevétellel kell terhelnünk a darabot. Mint azt már említettük a kisciklusú fáradás során a feszültség és az alakváltozás között a kapcsolat erősen nemlineáris, nagy alakváltozások jönnek létre, ezért a feszültség állandó értéken tartása sok körülményt és bonyolult vizsgálattechnikát igényelne. A fentiek miatt a kisciklusú fáradás vizsgálatát állandó nyúlás amplitúdó mellett végzik. Ilyenkor az egyes ciklusokban, a feszültség értéke változik, - növekszik vagy csökken - annak megfelelően, hogy a vizsgálati anyag felkeményedik vagy lágyul az ismételt igénybevétel hatására. További fontos vizsgálattechnikai kérdés a hőmérséklet és a mechanikai terhelések kapcsolata. A szakirodalomban található legtöbb kutatás atomerőműi berendezések esetén állandó hőmérsékleten végzett fáradásra irányult (IF – Isothermal Fatigue). Ezekben a berendezésekben a indítások

és leállások, valamint az üzem közben fellépő hőmérsékletingadozások miatt, nem csak a belső nyomásból származó feszültségek, hanem a hőmérséklet-tranziensek következtében fellépő hőfeszültségek is jelentős szintet érhetnek el. A kisciklusú fárasztóvizsgálat során állandó hőmérsékleten végzett fárasztással ezeket figyelmen kívül hagyjuk. A valós üzemi körülményeket jobban közelítő termomechanikai fárasztóvizsgálatokkal lehetőség nyílik a mechanikai ciklusoktól független hőmérsékleti ciklusokat működtetni a próbatestre egyidejűleg, így a berendezés tényleges terhelése pontosabban modellezhető. Ez történhet a olyan ütemben, hogy a hőterhelés és a mechanikai terhelés „fázisban” van (IP- In Phase Test), vagy a hőmérséklet és a nyúlás amplitúdó a ciklus során ellentétes előjelű (OP – Out of Phase Test). A fenti három vizsgálati módra a továbbiakban alkalmazzuk az alábbi terminológiákat:

- Izotermikus fárasztóvizsgálat
- Szinkron termomechanikai fárasztóvizsgálat
- Aszinkron termomechanikai fárasztóvizsgálat

A hőmérséklet és a mechanikai nyúlás a ciklus-szám függvényében a 2. és 3. ábrákon látható.



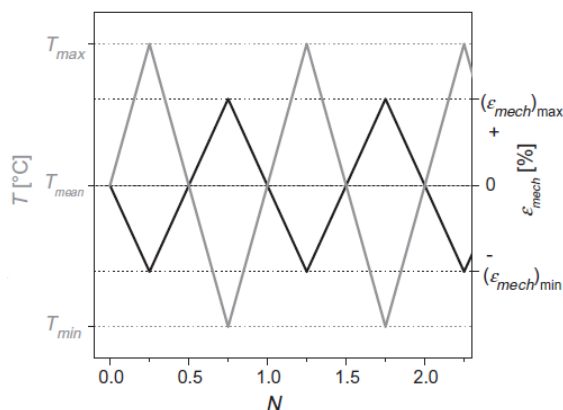
2. ábra – Szinkron termomechanikai fárasztóvizsgálat

A vizsgálati körülmények tárgyalásánál nem hagyhatjuk ki a vizsgálati frekvencia hatását sem. Lehofer [7] cikkében levezette, hogy a kisciklusú fáradás során az anyagi és a vizsgálati paraméterek hogyan befolyásolják a feszültség amplitúdót:

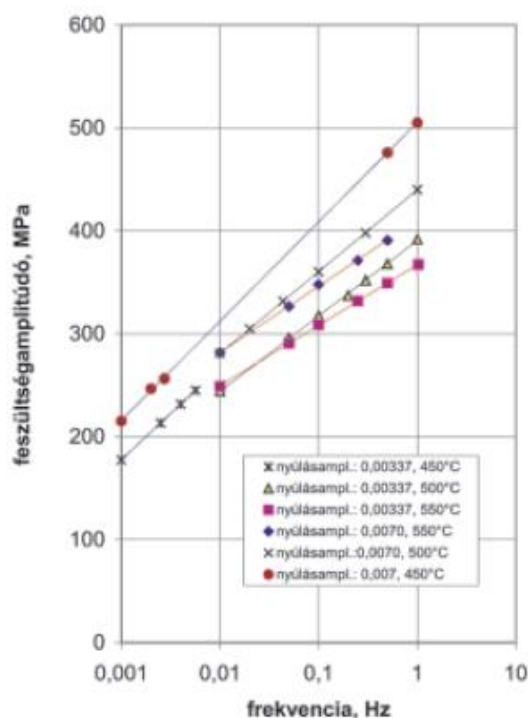
$$\sigma_A = \left\{ \left[ \frac{1}{a} \ln \left( 2 - \frac{T}{T_k} \right) \right]^{\frac{1}{n}} R_{p0.2/20} + \frac{R(T_k - T)}{B_0} \ln \frac{\dot{\epsilon}_{dT}}{\dot{\epsilon}_{dT}} \right\} \left( \frac{\epsilon_{ap/T}}{2,002} \right)^n$$

Mivel látható, hogy a képletben szerepel a nyúlássebesség is, ebből következik, hogy a feszültség amplitúdó az  $\epsilon(t)$  vezérlő függvény frekvenciájától függ. Ezzel belátható, hogy az  $\epsilon(t)$  frek-

venciájától függően a kisciklusú fárasztás más-más feszültség szinten zajlik, ezért végeredményben kijelenthetjük, hogy az adott  $\varepsilon(t)$  alakváltozással végbemenő fárasztás során a fémötvözet élettartama a vezérlő függvény frekvenciájától is függ. A feszültség amplitúdó frekvenciafüggésére az 4. ábrán láthatunk példát. A képlet alkalmazása akkor célszerű, ha a vizsgálatot magas frekvenciával kívánjuk elvégezni, azonban az eredményeket az alacsony alakváltozási sebességgel terhelt valós szerkezetre kívánjuk átszámítani.



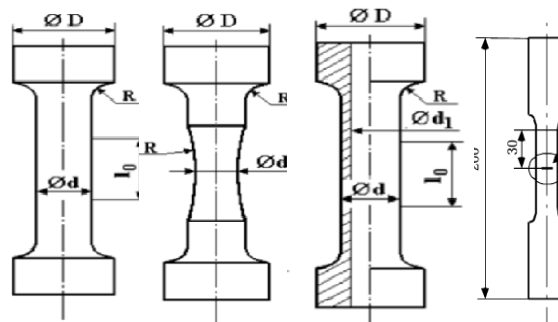
3. ábra – Aszinkron termomechanikai fárasztóvizsgálat



4. ábra – A feszültség amplitúdó a vizsgálati frekvencia függvényében [7]

## A KISCIKLUSÚ TERMIKUS FÁRADÁS VIZSGÁLATÁHOZ ALKALMAZOTT PRÓBATESTEK

A próbatestek alakjának kiválasztásánál meghatározó a vizsgáló berendezés pontossága valamint terhelhetősége, amely a próbatest méreteit alulról és felülről is korlátozzák. Mivel a kisciklusú fárasztás magas feszültség szinten zajlik, ezért jelentős erőhatások keletkeznek. Ezeket a próbatest tervezésénél úgy vesszük figyelembe, hogy megfelelő szilárdságú befogásról gondoskodunk, például menetes megfogás esetén a menet méretének és menetszámának helyes megválasztásával. Mivel a kisciklusú fáradás során a próbatesteket nyomásra is igénybe vesszük, gondoskodni kell a megfelelő megtámasztásról és a próbatest kihajlásának elkerüléséről. Ezt zömök próbatest kialakítással érhetjük el. A próbatestek alakja lehet hengeres vagy lapos, annak függvényében, hogy milyen szerkezetből munkáljuk ki. A hengeres próbák lehetnek tömörök, tóruszos kiképzésűek, valamint csőszerűek (5. ábra). A tóruszos próbatest előnye, hogy a képlékeny alakváltozás egy jól meghatározható helyre koncentrálódik. A csőszerű próbatest hőkapacitása kisebb, mint a tömör kialakításúé, ezért alkalmazása akkor célszerű, ha a termomechanikus fárasztás során magas frekvenciával működtetjük a hőterheléseket. Lapos próbatestet főként abban az esetben alkalmazunk, ha a vizsgálatot mesterséges hibával (bemetszéssel) rendelkező próbatesten kívánjuk elvégezni.



5. ábra – Hengeres, tóruszos, csőszerű és lapos próbatest

## VIZSGÁLÓ BERENDEZÉSEK

A kisciklusú fárasztóvizsgálatokhoz egy merev, nagy rugóállandójú szakítógéppel szükséges, amelyen a keresztfej elmozdulása reverzálható (megfordítható), és a húzó-nyomó igénybevételhez szükséges alternáló mozgás a próbatest hossz- illetve keresztirányú mérete szerint vezérelhető. Általában elektronikus vagy elektrohidraulikus mozgató berendezést alkalmaznak, mellyel a vezérlés könnyen megvalósítható. A nyúlásmérés illetve vezérlés történhet hossz és keresztirányú nyúlásmérők segítségével. Szobahőmérsékleten legtöbbször nyúlásmérő bélyegeket alkalmaznak.

Termomechanikus fárasztás során és növelt hőmérsékleten történő mérésekhez optikai elven működő érzékelők, vagy megfelelő hőálló anyagú tapintóval rendelkező elmozdulás mérőket használnak. Mivel jelen kutatásban erőműi acélok öregedésével foglalkozunk, ezért megemlítjük, hogy a próbatest előírt hőmérsékletre történő felfűtése a fárasztó berendezésen belül történhet konvektív úton klímakamrában, indukciós tekercsekkel, valamint a ellenállás fűtéssel (Joule-hő). A hőmérsékleti ciklusok maximális elérhető frekvenciája az előbbi felsorolás szerint növekszik. A próbatest keresztmetszete mentén a legegyszerűsebb hőmérséklet eloszlást a közvetlen próbatesten átvezetett árammal történő fűtés biztosítja. A hűtés történhet a befogópofákon keresztül vízhűtéssel, valamint közvetlenül a próbatestre fújt sűrített levegővel. Kutatási munkánkhoz Gleeble 3800 termomechanikus vizsgálóberendezést fogunk alkalmazni (6. ábra). Ennek fő jellemzője, hogy teljesen integrált, digitális, zárt szabályozó rendszerekkel rendelkezik, és különböző gyártási folyamatok valósidejű fizikai szimulációjára, fémek termomechanikus kezelésekre és anyagvizsgálatokra egyaránt alkalmas. A berendezés két fő része a termikus rendszer és a mechanikai rendszer, melyeket a főegység és az ahhoz csatlakoztatott, a szükséges vizsgálathoz célszerűen választott mobil átalakító egység együttese alkotja. A szimulátor vezérlését és szabályozását a vezérlő számítógép végzi. A vezérlés egy Windows-alapú szoftverben készített programok segítségével történik. A programok által lehetőség van számos vezérlési módra, így például az elmozdulás, az erő, az opcionálisan felszerelhető nyúlásmérő, a valódi és a mérnöki feszültség illetve alakváltozás, valamint a hőmérséklet alapján történő vezérlésre.



6. ábra – A Gleeble berendezés

## A VIZSGÁLATOK MENETE, DEFINÍCIÓK AZ ÉLETTARTAMRA VONATKOZÓAN

A kisciklusú fárasztóvizsgálat előkészítésénél az első lépés a próbatest befogása, majd a nyúlásmérő felhelyezése. A fárasztási paraméterek beállítása és a regisztráló berendezés élesítését

követően elindítható a fárasztóvizsgálat. A mérés során gondoskodni kell a megfelelő számú hiszterézis hurok rögzítéséről, mely kezdetben (10-20 ciklus) az összes, majd a folyamat előrehaladtával bizonyos ciklusszámokhoz tartozó görbe felvételét jelenti. Amennyiben repedések jelennek meg az állandó alakváltozás amplitúdó mellett ismét jelentősen változik a ciklusonként rögzített feszültségérték, így a hiszterézis görbe alakja is, emiatt ebben a szakaszban ismét indokolt az összes hurok rögzítése.

A tönkremeneteli kritérium meghatározásában nem egységes a szakirodalom. A legelterjedtebb és mérnöki szempontból a legmegalapozottabb a terjedőképes repedés megjelenése. Ennél a definíciónál nehéz megállapítani, hogy adott próbatest geometriához mekkora lehet a repedés mérete. Ezért több kritérium létezik, például tekinthetjük a kísérlet végének azt az időpillanatot, amikor a próbatest teljes keresztmetszetében kettéválik. A két eddig ismertetett kritériumot elemezve megállapíthatjuk, hogy azon gépészeti szerkezeink melyek biztonság szempontjából kritikusak utóbbi tönkremeneteli feltétellel nem vizsgálhatók. Az eddig ismertetett két élettartam kritériumon kívül az alábbiakat szokták még alkalmazni:

- a hiszterézis görbén a nyomó periódusban inflexiós pont megjelenése (két repedt próbatestrész felfekvése)
- a telítődési szakasz maximális erejéhez viszonyított feszültségese
- az előző ciklushoz képest meghatározott mértékű feszültségese
- a terhelőerőben történő meghatározott csökkenés

## AZ EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

Az anyag ciklikus viselkedésének kiértékelésére a kisciklusú fárasztóvizsgálatból az alábbi mérőszámok meghatározása szükséges:

- A teljes nyúlástartomány ( $\Delta\epsilon$ ), illetve ennek fele: a teljes nyúlásamplitúdó ( $\epsilon_a$ ).
- A tönkremeneteli kritériumhoz tartozó igénybevételi szám ( $N_f$ ).
- A képlékeny nyúlástartomány ( $\Delta\epsilon_p$ ), illetve ennek felét: a képlékeny nyúlás-amplitúdó ( $\epsilon_{ap}$ ).
- A rugalmas nyúlástartomány ( $\Delta\epsilon_e$ ), illetve ennek felét: a rugalmas nyúlás-amplitúdó ( $\epsilon_{e0}$ ).
- A feszültségváltozás tartománya ( $\Delta\sigma$ ), illetve ennek felét: a feszültségamplitúdó ( $\sigma_a$ ). A ciklikus keményedés vagy lágyulás miatt ez az érték folyamatosan változik a

ciklusszám függvényében, vagyis  $\Delta\sigma = 2\sigma_a = f(N)$ .

- Feszültségtartományt, illetve amplitúdót az élettartam 50 %-nál ( $\Delta\sigma_{50}$ , illetve  $\sigma_{a50}$ ).

## KÉPLÉKENY ALAKVÁLTOZÁS AMPLITÚDÓRA ÉPÜLŐ MODELLEK

A képlékeny alakváltozás amplitúdóra épülő modellek tekinthetők a klasszikus módszereknek. Ezek általános egyenlete:

$$\Phi(\varepsilon, \varepsilon^p, \sigma, \dots) = f(N_f, \alpha, \beta, \dots),$$

ahol  $\alpha, \beta$  anyagi állandók. A Manson-Coffin egyenlet még ma is a legismertebb összefüggés annak ellenére, hogy 1954-ben publikálták. Lineáris kapcsolatot ad a képlékeny alakváltozás amplitúdó és a tönkremeneteli ciklusszám között logaritmikus koordináta-rendszerben:

$$\Delta\varepsilon_p N_f^\alpha = C.$$

Az összefüggés jó közelítést bemetszés nélküli, hengeres próbatestek állandó amplitúdójú és frekvenciájú terhelésénél ad.

A növelt hőmérsékleten bekövetkező kúszás, oxidáció és korrózió okozta károsodás hatásának figyelembevételéhez módosították a Manson-Coffin-modellt, amely egy frekvenciát figyelembe vevő tényezőt tartalmaz:

$$\Delta\varepsilon_p (N_f \nu^{k-1})^\alpha = C.$$

A teljes alakváltozás tartomány és a tönkremeneteli ciklusszám kapcsolatára Morrow 1965-ben javasolt összefüggése:

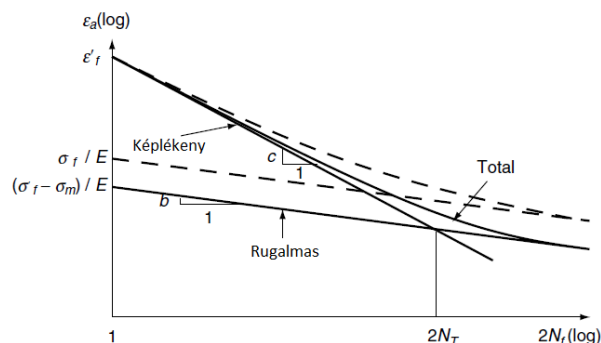
$$\varepsilon_a = \varepsilon_a^e + \varepsilon_a^p = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^\beta + \varepsilon_f' (2N_f)^\alpha,$$

melyet a szakirodalom nyúlás-alakváltozás egyenletnek nevez. Ez összegzetten ír le két különálló görbét, a rugalmas alakváltozás amplitúdó-ciklusszám, valamint a képlékeny alakváltozás amplitúdó-ciklusszám kapcsolatát. Az egyenlet első tagja a Basquin összefüggés, a második a fent ismertetett Manson-Coffin egyenlet.

A közép-feszültség ( $\sigma_m$ ) értéke kifaradási élettartamra jelentős hatással van ezért ennek a tényezőnek a figyelembe vételére számos összefüggés született. Ezek azon a megfigyelésen alapultak, hogy a húzóirányú közép-feszültség csökkenti, míg a nyomó közép-feszültség növeli a törésig elviselt ciklusszámot. A leggyakrabban alkalmazott összefüggések Morrow (1968) és Smith (1970) egyenlete. Morrow a közép-feszültség hatását az alakváltozás-élettartam egyenlet rugalmas tagjának módosításával vette figyelembe:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_a^e + \varepsilon_a^p = \frac{\sigma_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^\beta + \varepsilon_f' (2N_f)^\alpha.$$

Az egyenletet a 7. ábrán szemléltetve megállapítható, hogy a kifaradási élettartam pozitív közép-feszültség esetén csökken és egyben növeli az átmeneti fázis élettartamot.



7. ábra – Morrow közép-feszültség-korrektív modellje

Smith, Watson és Topper, a  $\sigma_{\max} \varepsilon_a$  paramétert javasolták a cikluson belüli fázis mértékének meghatározására, melyben a  $\sigma_{\max}$  a maximális húzó-feszültség a ciklus során. Abból a feltevésből indultak ki, hogy a  $\sigma_{a,rev} \varepsilon_{a,rev}$  amplitúdóra vonatkozó értékek zero közép-feszültséggel végzett kísérlet esetén megegyezik az SWT paraméternek nevezett  $\sigma_{\max} \varepsilon_a$  értékével, nullától eltérő közép-feszültséggel végzett kísérletre vonatkozóan. Ez a feltevés a következő matematikai formulában fogalmazható meg:

$$\sigma_{\max} \varepsilon_a = \sigma_{a,rev} \varepsilon_{a,rev} \quad \sigma_{\max} > 0$$

Ideálisan viselkedő, a kompatibilitási feltételeket teljesítő anyag esetén a maximális húzó-feszültség:

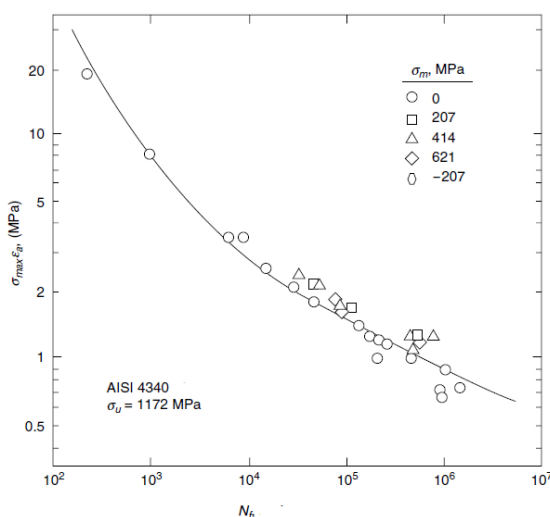
$$\sigma_{\max} = \sigma_a = \sigma_f (2N_f)^\beta.$$

Ezzel a teljes nyúlás-kifaradási ciklusszám összefüggését megszorozva kapjuk az SWT közép-feszültség korrekciós formulát:

$$\sigma_{\max} \varepsilon_a = \frac{(\sigma_f)^2}{E} (2N_f)^{2\beta} + \sigma_f \varepsilon_f' (2N_f)^{\beta+\alpha}.$$

A 8. ábrán példaként 40NiCrMo6 acél eltérő közép-feszültséggel végzett fázis vizsgálatának adatai láthatók. A diagramot elemezve megállapítható, hogy különböző közép-feszültségek esetén az SWT paraméterrel jól jellemezhető a kifaradás, az adatok szórása a rájuk illesztett görbéhez viszonyítva kis mértékű. A képlékeny alakváltozásra épülő modellekkel kapcsolatban fontos megemlíteni, hogy egyes kutatók szerint a Manson-Coffin összefüggés tekinthető a mikropéda terjedését

leíró empirikus összefüggésnek is, mivel a nagy képlékeny alakváltozások miatt a repedések megjelenése az első néhány ciklusban megfigyelhető. Ebben a felfogásban a kisciklusú fáradás folyamatában a mikrorepedések fejlődése a domináns folyamat és így a Tomkins-féle repedést terjedést leíró egyenletből a Manson-Coffin egyenlet levezethető (Murakami, Miller, 2004). További jellemzője ezeknek az elméleteknek, hogy a bennük szereplő mérőszámok vektor jellegűek és a valódi szerkezetre nehezen átvihetők. A képlékeny alakváltozási amplitúdó a valós berendezés fáradása során folyamatosan változik és az élettartam kimerülés vizsgálatahoz nem összegezhető. Ezek alapján célszerű fizikailag megalapozottabb és matematikailag egyszerűbben kezelhető kritérium keresése.



8. ábra – Az SWT közép feszültség-korrekciós modell

## KÉPLÉKENY ALAKVÁLTOZÁSI MUNKÁRA ÉPÜLŐ MODELLEK

Az előző pontban ismertetett modellekhez képest több előnnyel is rendelkeznek a képlékeny alakváltozási munkára épülő összefüggések. Az egyik ilyen előny, hogy a vezérelt változótól (alakváltozásra vagy feszültségre vezérelt vizsgálat) független a mérés eredménye, a másik, hogy a meghatározott mérőszám fizikailag megalapozottabb, mint a korábban bemutatottak.

Alkalmazásuknak hosszú ideig határt szabott, hogy a gépészeti berendezések kritikus helyein nehéz volt meghatározni a bevitt képlékeny alakváltozási munka mennyiségét. A numerikus módszerek és a számítástechnika fejlődésével az energia alapú méretezés e korlátja megszűnt. Az energia kritériumok alapelve: a próbatest károsodására fordított energia arányos az anyagban lejátszódó károsodási folyamattal. A vizsgálatok során a ciklusonként letárolt nyúlás és feszültség értékekből (hiszterézis görbe) (1. ábra), meghatá-

rozható az egy ciklusban befektetett munka mennyisége. Ez a görbe által közrezárt terület, ezeket összegezve kiszámolható a törésig befektetett munka nagysága.

A kisciklusú fárasztás során bevitt képlékeny alakváltozási munka meghatározására is több összefüggés ismert. Ostergren a következő összefüggést javasolta az egy ciklusban felhalmozott energia számítására:

$$\Delta W^p = \frac{1-n}{1+n} \Delta \sigma \Delta \varepsilon.$$

Ez a munkát a tönkremeneteli ciklusszámmal megszorozva, az anyag tönkremenetelét okozó fajlagos képlékeny alakváltozási munka meghatározható. Feltner (1980) az egy ciklusban felhalmozott képlékeny alakváltozási munkát a hiszterézis görbe alatti terület leírásával határozta meg:

$$\Delta W^p = \frac{4\sigma_a \varepsilon_p}{(1+m)},$$

ahol a számlálóban a képlékeny feszültség –és alakváltozás amplitúdó szerepel a nevezőben az  $m$  a keményedést kifejező szám.

Az eddig ismertetett energia alapú kritériumok nem veszik figyelembe, hogy a fárasztás milyen közép feszültséggel, és mekkora hőmérsékleten történik. Gocmez és társai (2009) komplex kritériumot dolgoztak ki szinkron és aszinkron termomechanikus fárasztóvizsgálatok kiértékelésére. A modell az egy ciklusban felhalmozott képlékeny alakváltozási munkán alapul, a feszültség-szintet és a hőmérsékletet figyelembe vevő paraméterekkel:

$$N_f = A \left( \frac{\Delta W^p}{W_u^p} \cdot SCF + ADI_T \right)^c.$$

Az összefüggésben a  $\Delta W^p$  az egy ciklusban felhalmozott képlékeny alakváltozási munka:

$$\Delta W^p = \int_{\text{ciklus}} \sigma \cdot d\varepsilon,$$

a  $W_u^p$  a monoton szakító kísérlettel meghatározott alakváltozási munka, törésnél.

Az SCF paraméter a feszültség korrekciós tényező:

$$SCF = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ult}} - m \cdot \sigma_{\text{mean}}},$$

ahol a  $\sigma_{\max}$  a maximális feszültség a hiszterézis görbében,  $\sigma_{\text{ult}}$  a szakítószilárdság,  $\sigma_{\text{mean}}$  a közép feszültség. Az  $ADI_T$  a hőmérséklettől függő károsodást kifejező szám, míg  $A$  és  $c$  anyagi

állandó, valamint kitevő a modellben, melyeket regresszió analízisből kaphatunk meg. A szerzők az általuk javasolt modellt belsőégésű motorok hengerfejében alkalmazott gömbgrafitos öntöttvasak széles skáláján alkalmazták, mely eredményeket összehasonlították a klasszikus károsodási modellekkel és melyből megállapítható, hogy az összefüggés jó közelítéssel írja le a magas hőmérsékleten végzett termomechanikai fáradás élettartam függését. A kifáradási szívósság ( $\Delta W^p$ ) által számolt értéke nem hordozza magában azt a tulajdonságot, hogy a ciklusonként elnyelt alakváltozási munka értéke a kisciklusú fáradás során változik. A változás oka, hogy a próbatest különböző élettartamához, különböző metallográfiai folyamatok köthetők, melyek különböző képlékeny alakváltozás amplitúdó mellett eltérő alakváltozási munka igényel bírnak [4]. Példaként említenék, hogy az alacsonyabb alakváltozás amplitúdó esetén a diszlokációs folyamatok és a mikrorepedések keletkezésének energiaigénye magasabb. És mivel ezen folyamatok az élettartam bizonyos szakaszaiban jól elkülöníthetően mennek végbe, így a fárasztás alakváltozás amplitúdója és ezen keresztül a törésig elviselt ciklusszám is befolyásolja a teljes alakváltozási munka értékét. Ennek jelenségnek a figyelembevételére bevezették a fáradási szívósság együtthatót ( $B$ ) és a fáradási szívósság kitevőt ( $b$ ), melyek a következő

kapcsolatban állnak a teljes fárasztóvizsgálat során bevitt képlékeny alakváltozási amplitúdóval:

$$W_f = B(N_f)^b.$$

Mivel a korszerű anyagvizsgáló berendezéseken lehetőség van a hiszterézis görbék tárolására, ezért felmerül az a kérdés, hogy a reprezentatív hiszterézis görbék segítségével meghatározott képlékeny alakváltozási munka értéke hogyan viszonyul az összes görbe által számolt munka nagyságához. Ennek felderítésére Nagy és társai (2004) végeztek kutatásokat acél próbatestek eltérő teljes alakváltozás amplitúdójú fárasztóvizsgálatával. Munkájuk során arra az eredményre jutottak, hogy a reprezentáns hiszterézis görbék és az összes görbe felhasználásával meghatározott képlékeny alakváltozási munka mindegyik alakváltozás amplitúdó esetén 5%-os szignifikancia szinten azonos.

Az energia alapú kritériumok esetén fontos megemlíteni, hogy kisciklusú fárasztás során bevitt képlékeny alakváltozási munka csak egy része okozza az anyag mikroszerkezetének, diszlokációs szerkezetének megváltozását (károsodását), a munka másik része a fárasztás során hővé alakul az anyagon belül. Amennyiben a hővé alakult munkát levonjuk a képlékeny alakváltozási munkából, a károsodást okozó munkát kapjuk, mely megalapozott méretezési adat lehet [13].

1. táblázat – Klasszikus kifáradási élettartam modellek

| Modell                              | $\Phi$                                      | $f$                                                                                      |
|-------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Manson-Coffin                       | $\Delta \varepsilon_p$                      | $N_f^{-\alpha} C$                                                                        |
| Teljes nyúlás-kifáradási ciklusszám | $\Delta \varepsilon_{mech}$                 | $\frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^\beta + \varepsilon_f' (2N_f)^\alpha$                         |
| SWT                                 | $\sigma_{max}, \Delta \varepsilon_{mech}$   | $\frac{(\sigma_f)^2}{E} (2N_f)^{2\beta} + \sigma_f \varepsilon_f' (2N_f)^{\beta+\alpha}$ |
| Morrow                              | $\sigma_{kozep}, \Delta \varepsilon_{mech}$ | $\frac{\sigma_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^\beta + \varepsilon_f' (2N_f)^\alpha$              |
| Módosított Manson-Coffin            | $\Delta \varepsilon_p$                      | $(N_f \nu^{k-1})^{-\alpha} C$                                                            |

## ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen közlemény megkísérelte összefoglalni a kisciklusú termomechanikai fárasztóvizsgálat vizsgálati módszereit, a szükséges berendezéseket, a próbatestek változatait. A munka második fele betekintést ad a fáradási kísérletek kiértékelé-

sének módszereiről, az alakváltozás amplitúdóra és az alakváltozási munkára épülő modellekről.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk elkészítését a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0027 számú projekt támogatta. A

projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## IRODALOM

- [1.] B.B. Kerecsi, A.G. Kotousov, J.W.H. Price: Experimental apparatus for thermal shock fatigue investigations. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 77 (2000) 425-434
- [2.] C. Petersen, D. Rodrian: Thermo-mechanical fatigue behavior of reduced activation ferrite/martensite stainless steels. *International Journal of Fatigue* 30 (2008) 339-344
- [3.] J. Kwon, S. Woo, Y. Lee, J. Park, Youn-won Park: Effects of thermal aging on the low cycle fatigue behavior of austenitic-ferritic duplex cast stainless steel. *Nuclear Engineering and Design* 206 (2001) 35-44
- [4.] J.A. Abdalla, R.A. Hawileh, F. Oudah, K. Abdelrahman: Energy-based prediction of low-cycle fatigue life of BS 460B and BS B500B steel bars. *Materials and Design* 30 (2009) 4405-4413
- [5.] Jae-do Kwon, Seung-wan Woo, Yong-son Lee, Joong-cheul Park, Youn-won Park: Effects of thermal aging on the low cycle fatigue behavior of austenitic-ferritic duplex cast stainless steel. *Nuclear Engineering and Design* 206 (2001) 35-44
- [6.] L. F. Coffin: Fatigue at high temperature – Prediction and interpretation. *Proc. Instn. Mech. Engrs.* 1974 Vol. 188 9/74
- [7.] Lehofer Kornél: Az alakváltozással vezérelt kisciklusú fáradás törvényszerűségei, *Anyagvizsgálók Lapja*, 2004/3. [www.anyagvizsgaloklapja.hu](http://www.anyagvizsgaloklapja.hu), p.: 79 -86
- [8.] M. Grosse, M. Niffenegger, D. Kalkhof: Monitoring of low-cycle fatigue degradation in X6CrNiTi18-10 austenitic steel. *Journal of Nuclear Materials* 296 (2001) 305-311
- [9.] M.D. Callaghan, S.R. Humphries, M. Law, M. Ho, P. Bendeich, H. Li, W.Y. Yeung: Energy-based approach for the evaluation of low cycle fatigue behaviour of 2.25Cr-1Mo steel at elevated temperature. *Materials Science and Engineering A* 527 (2010) 5619-5623
- [10.] M.V. Borodii, M.P. Adamchuk: Life assessment for metallic materials with the use of the strain criterion for low cycle fatigue. *International Journal of Fatigue* 31 (2009) 1579-1587
- [11.] Mageshwaran Ramesh Hans J. Leber, Markus Diener Ralph Spolenak: Conducting thermo-mechanical fatigue test in air at light water reactor relevant temperature intervals. *Journal of Nuclear Materials* 415 (2011) 23-30
- [12.] N. Haddar, A. Köster, Y. Kchaou, L. Remy: Thermal-mechanical and isothermal fatigue of 304L stainless steel under middle range temperature. *C. R. Mecanique* 340 (2012) 444-452
- [13.] Nagy Gyula: A kisciklusú fárasztás kutatásának újabb eredményei a Miskolci Egyetemen, *Anyagvizsgálók Lapja*, 2004/3. [www.anyagvizsgaloklapja.hu](http://www.anyagvizsgaloklapja.hu), p.: 75 -78
- [14.] Nagy Gyula: Anyagok károsodása és vizsgálata különböző üzemi körülmények között, Kisciklusú fárasztás, Miskolci Egyetem, TEM-PUS S\_JEP\_11271 projekt támogatásával, Miskolc, 1999
- [15.] NWM Bishop, Dr F Sherratt: Finite Element Based Fatigue Calculations. NAFEMS, 2000
- [16.] S.L. Mannan, M. Valsan: High-temperature low cycle fatigue, creep-fatigue and thermo-mechanical fatigue of steels and their welds. *International Journal of Mechanical Sciences* 48 (2006) 160-175
- [17.] Szekeres A, Pramila A, Heat and Moisture in Solids: Dynamical Sorption with Microcracks, EUROMECH 436 Nonlinear Waves in Microstructured Solids, May 29 – June 1, 2002, Tallinn, Estonia
- [18.] T. Bíró, J. Csizmadia: Recent technique for thermal-fatigue simulation of heat-resistant steels. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 56/2 (2012) 105-110
- [19.] Taner Gocmez, Ali Awarke, Stefan Pischinger: A new low cycle fatigue criterion for isothermal and out-of-phase thermomechanical loading. *International Journal of Fatigue* 32 (2010) 769-779
- [20.] Tóth L, Rózsahegy P: Kisciklusú fárasztóvizsgálatok eredményei és energetikai értékelése. Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közalapítvány Logisztikai és Gyártástechnikai Intézet
- [21.] Trampus Péter: A reaktortartály biztonságának elemzése. *Fizikai Szemle* 2008/9 287-292
- [22.] V. Maurel, L. Rémy, F. Dahmen, N. Haddar: An engineering model for low cycle fatigue life based on a partition of energy and micro-crack growth. *International Journal of Fatigue* 31 (2009) 952-961
- [23.] Y. Murakami, K.J. Miller: What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process. *International Journal of Fatigue* 27 (2005) 991-1005
- [24.] Yung-Li Lee Jwo PanRichard B. Hathaway Mark E: Fatigue Testing and Analysis (Theory and Practice), Barkey 2005, Elsevier Inc.
- [25.] Yusuke Kudo, Kouichi Kikuchi, Masakatsu Saito: Thermal fatigue crack propagation behaviour of F82H ferritic steel. *Journal of Nuclear Materials* 307-311 (2002) 471-474

## VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

## TESTING METHODS

### KISÉRLETI ELRENDEZÉS MAGNETOKALORIKUS ANYA-GOK VIZSGÁLATÁRA DESIGN OF A TEST STAND FOR INVESTIGATIONS OF MATERIALS EXHIBITING THE MAGNETOCALORIC EFFECT

AGATA CZERNUSZEWICZ\*, JERZY KALETA, MICHAŁ KRÓLEWICZ, DANIEL LEWANDOWSKI, MICHAŁ LIBERDA

**Kulcsszavak:** *külső hatásra tulajdonságváltozást mutató anyagok, mágneses hűtés, mágneses fagyasztás, gadolinium*

**Keywords:** *smart materials, magnetic cooling, magnetic refrigeration, gadolinium*

### Abstract

Magnetic cooling is a new way to decrease temperature which is based on the magnetocaloric effect. Although this phenomenon was discovered in the 19th century, no commercial device utilizing a magnetocaloric material as a refrigerant has appeared thus far. This paper shows a design of a laboratory test stand for investigations of the magnetocaloric effect in the materials with a near-room transition temperature. The work also contains the results of investigations of temperature and entropy changes in gadolinium. This material will be the first refrigerant to be used in the designed laboratory test stand.

### ÖSSZEGZÉS

A mágneses hűtés, amely a magnetokalorikus hatáson alapszik, egy új módszer a hőmérséklet csökkentésére. Annak ellenére, hogy ezt a jelenséget a 19. században fedezték fel, nincs olyan kereskedelmi berendezés a magnetokalorikus anyagokat, mint hűtést. A publikáció egy olyan laboratóriumi berendezést tervezését mutatja be, amely alkalmas a szoba hőmérsékletéhez közeli átmenti hőmérsékletű magnetokalorikus hatást mutató anyagok tanulmányozására. Ez munka foglalkozik a gadolinium hőmérséklet és entrópia változásának vizsgálati eredményeivel. A gadolinium lesz az anyag, amit elsőként fognak megvizsgálni az új készülékkel.

### 1. INTRODUCTION

The technological development within the last years has caused substantial damage to the environment. At present, along with the progress of civilization the ecological consciousness in the general public is increasing, which leads to the growing interest in eco-friendly technologies. That is why there is a tendency to eliminate all the environmentally hazardous substances and to

increase the efficiency of devices. One of the areas where special attention should be paid to ecological aspects is refrigerating engineering. The widely used refrigerators significantly contribute to the greenhouse effect because of the utilized cooling agents. Moreover, the efficiency of these devices is insufficient. In recent years, a dynamic development of numerous modern technologies of temperature decreasing has been observed. Magnetic cooling based on the so-called magnetocaloric effect is one of these technologies. Materials which exhibit the magnetocaloric effect belong to a wider material group known as the magnetic SMART materials. This term applies to various materials that change their properties under the influence of external stimuli.

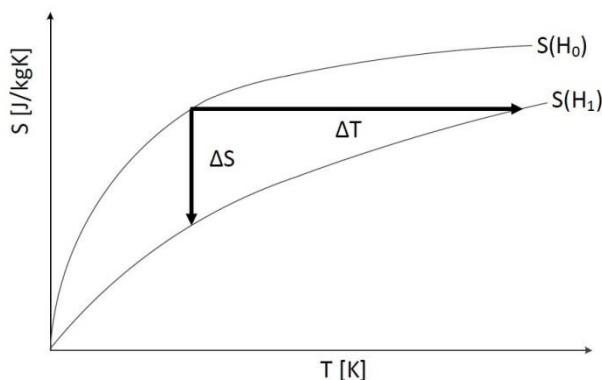
The magnetocaloric effect was first mentioned in literature in 1881. This was the year when E. Warburg noticed that an iron sample placed in a magnetic field changes its temperature [1]. When the sample was placed inside the magnetic field, its temperature increased. When the same specimen was removed from the field, its temperature decreased. The temperature changes were very fast, happening in a split second. The magnetocaloric effect was first used in cryogenics to liquefy hydrogen and helium. This phenomenon made it possible to achieve temperatures below 1 K for the first time. Partially thanks to this achievement W. Giauque received the Nobel Prize for Chemistry in 1949. The possibility of using the magnetocaloric effect in room temperature refrigerators first appeared in 1976 when G. V. Brown built the first device of such type. The device aroused great interest because it did not utilize hydrochlorofluorocarbons (HCFCs) and was therefore environmentally friendly because it did not deplete the ozone layer. The cooling material used by G. V. Brown was gadolinium in the form of thin plates. A superconducting magnet cooled by liquid helium acted as the magnetic field generator. The magnet produced a magnetic field of 7 T. The first magnetic cooler achieved a temperature difference of 47 K [2].

The magnetocaloric effect is a thermodynamic phenomenon which consists in a change of

<sup>1</sup>Institute of Materials Science and Applied Mechanics, Wrocław University of Technology; Wrocław, Poland,

\*Corresponding author: agata.czernuszevicz@pwr.wroc.pl

a material temperature under the influence of a cyclically variable magnetic field. When a magnetocaloric material enters the magnetic field it becomes magnetized. During this process magnetic dipoles arrange themselves parallel to the field direction while the entropy of the body diminishes. The magnetization process is connected with a rise in the temperature of a specimen. The moment the magnetic field is removed, the demagnetization of the material occurs and the magnetic dipoles lose their ordered state. During this change the entropy of the body increases whereas its temperature decreases. The material temperature change  $\Delta T$  in the adiabatic process and the entropy change  $\Delta S$  for the isothermal transformation are both considered to be the measures of the magnetocaloric effect (fig. 1). The  $\Delta S$  and  $\Delta T$  values are not equal. The magnetocaloric effect depends on the ambient temperature as well as on the change in the magnetic induction. The effect reaches its maximum value in the temperature of the ferromagnetic-paramagnetic phase transition, also known as the Curie temperature ( $T_c$ ), which is specific for each material.



**Fig. 1** Magnetocaloric effect as a change in temperature  $\Delta T$  and in entropy  $\Delta S$

Simultaneously with the development of magnetic refrigerator designs, the progress in the investigations of magnetocaloric materials can be noticed. The suitable refrigerant should be characterized by a significant change in its temperature and entropy. As mentioned before, gadolinium was the first material used in a room temperature magnetic refrigerator. This element is still the most commonly used magnetocaloric material, which can be confirmed by the large number of cooling system prototypes which utilize this metal as a refrigerant. Gadolinium is an attractive option for magnetic refrigeration thanks to its Curie temperature  $T_c$ , which is 294 K, and owing to its relatively large change in temperature and entropy. Nevertheless, laboratory tests led to the fabrication of new materials which exhibit even larger magnetocaloric effect than gadolinium. In 1997 Pecharsky

and Gschneider announced the discovery of a material which exhibits a giant magnetocaloric effect. This material, the  $Gd_5(Si_2Ge_2)$  alloy [3], is characterized by  $\Delta S$  values which are two times larger than in the case of pure gadolinium whereas  $\Delta T$  rises by about 30% [3]. The increase in the magnetocaloric effect is caused due to the fact that in the  $Gd_5(Si_2Ge_2)$  alloy the magnetic transformation occurs along with the reconstruction of the crystal lattice. The material exhibits the first-order phase transition whereas gadolinium is subject to the second-order transition. In the following years several other alloys showing the giant magnetocaloric effect were discovered. These alloys are also subject to the first-order phase transition. An example might be the materials from the  $MnAs_{1-x}Sb_x$  [4],  $MnFe(P_{1-x}As_x)$  [5] or  $La(Fe_xSi_{1-x})_{13}$  [6] group.

This paper proposes a concept of the laboratory test stand for magnetocaloric effect investigations which is currently under construction. This stand is aimed at the investigations of materials in various forms, with a near-room ( $\sim 294$  K) transition temperature.

## 2. STRUCTURE OF MAGNETIC REFRIGERATORS

Even though the first magnetic refrigerator was built over 30 years ago, the basic elements of such devices still remain the same. The cooling systems which operate based on the magnetocaloric effect comprise the following elements: a magnetic bed filled with a magnetocaloric material, a magnetic field source, a transport system for the refrigerating medium, hot and cold heat exchangers and a control system.

On the basis of the overview of prototype refrigerators based on the magnetocaloric effect [7] it can be noticed that the utilized magnetocaloric material appears in several forms such as powders, granules or sheets. The heat transfer medium is usually water with anticorrosive agents. This is because water offers good thermal capacity, eco-friendly characteristics and wide availability. The use of anticorrosive additives is necessary because gadolinium (as mentioned earlier – the most widely used magnetocaloric material) reacts with water. A refrigerating medium in a gaseous form is selected much less often.

Magnetic refrigerators require strong magnetic fields because it leads to the increase in the magnetocaloric effect (growth of  $\Delta S$  and  $\Delta T$  proportional to the growth of magnetic field). However, it is also important for the mass and volume of the field generator to remain as low as possible. Values of the magnetic field induced in prototype magnetic refrigerators typically range from 0.8 T to 2.4 T [7].

In order to produce a magnetic field, three types of magnets are used: electromagnets, superconducting magnets and permanent magnets. Currently, the permanent magnets are used most often, however, all the mentioned magnet types have their limitations. Superconducting magnets can generate strong magnetic fields but their main drawback is the necessity for an additional cooling system, essential for these materials to work. The cost of such system is high, which renders the solution uneconomical in the case of household appliances. Electromagnets, similarly to the superconducting magnets, generate strong magnetic fields, but also significant losses. These magnets

consume a lot of energy and generate a substantial amount of heat. Permanent magnets do not require an external power source or a cooling system, but their main disadvantage are the limitations in generated magnetic fields (maximum of 2 T).

### 3. DESIGN OF THE TEST STAND

The designed system for magnetocaloric effect investigations has a modular structure. The modular structure helps to change the system configuration during tests. Fig. 2 shows a 3D scheme and a schematic diagram of the test stand.

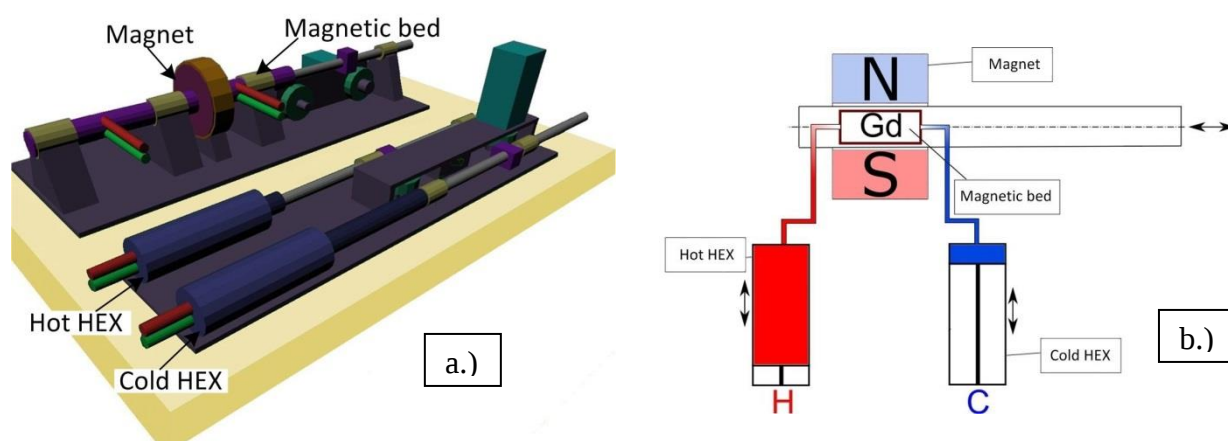


Fig. 2 3D scheme (a) and schematic diagram (b) of the test stand

The magnetic bed has a cylindrical shape. Its diameter measures 25.4 mm while the length is 25 mm. It will be made of a material which provides thermal insulation of a magnetocaloric material from the ambient conditions. In order to cyclically magnetize and demagnetize the material, the magnetic bed will reciprocate relative to a magnetic field concentrator. Gadolinium will be used to fill the bed. The material was purchased in the form of ingots. Fig. 3 shows pictures of gadolinium made using a Scanning Electron Microscope (SEM). In the pictures one can see numerous pores which may have a negative influence on the thermal conductivity of the material. In order to eliminate the pores and because of the large ingot dimensions (leading to the extended time of heat transfer between the magnetocaloric material and the cooling medium) it was necessary to process the material. The purchased material was divided into small particles which would be then utilized in the designed cooling system. The particles measure from 2 to 5 mm (fig. 4).

The presence of the magnetocaloric effect in the purchased material was confirmed using direct and indirect measuring method. The direct method

consists in a measurement of the material temperature changes in the real time whereas the indirect method helps to investigate the changes in temperature and entropy of the material with the use of measurements of magnetization and thermal capacity. For direct measurements of the magnetocaloric effect a thermovision camera was used.

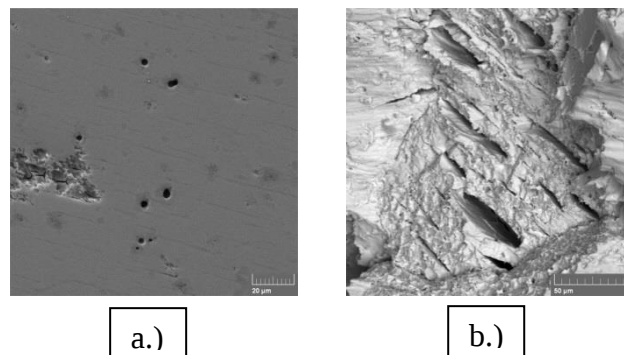


Fig. 3 SEM pictures of the purchased gadolinium ingot (a) and of the metallographic specimen (b)

The measurements were carried out in 0.5 T and 1 T magnetic flux density. Fig. 5 shows pictures from the thermovision camera in which the gadolinium specimen is inside (a) and outside (b)

the magnetic field of 0.5 T. The directly measured change in the temperature of gadolinium amounted to 2 K for 0.5 T and 3 K for 1 T magnetic field.



Fig. 4 Gadolinium particles

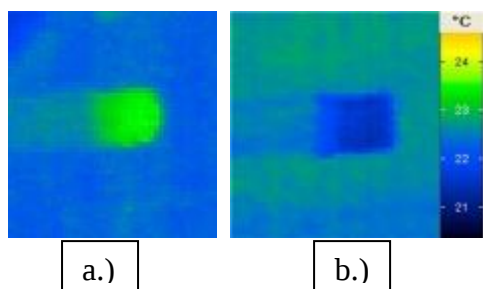


Fig. 5 Pictures from the thermovision camera showing a gadolinium sample entering (a) and leaving (b) a magnetic field

Indirect determination of the magnetocaloric effect was conducted using thermal capacity measurements. The results of these investigations are much more accurate than the measurements with the thermovision camera. The indirect measurements were carried out without the magnetic field and applying 1 T magnetic flux density. Fig. 6 shows a diagram of the thermal capacity of gadolinium depending on the preset temperature. Basing on these data, the changes in temperature (fig. 7 a) and entropy (fig. 7 b) of the material were defined for the magnetic field of 1 T [8]. The maximum obtained temperature difference amounted to 2.5 K while the entropy change was around 4 J/kgK.

To generate the necessary magnetic field, the designed test stand will use a cylindrical Halbach array [9]. This array is a special arrangement of permanent magnets which leads to the concentration of magnetic field inside the cylindrical gap. The Halbach array selected for the constructed system will generate a magnetic field of 1 T.

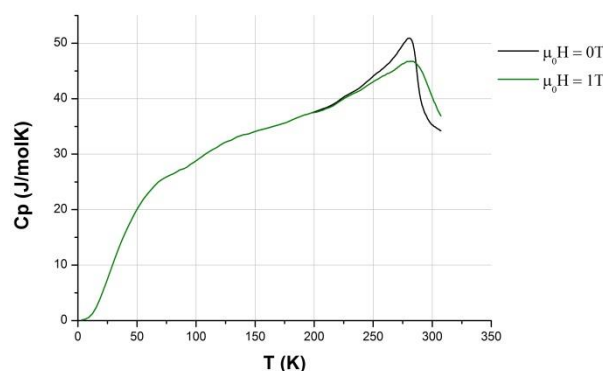


Fig. 6 Relationship between the thermal capacity of gadolinium and its temperature in 0 T and 1 T magnetic field (measurements conducted in the International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures in Wrocław)

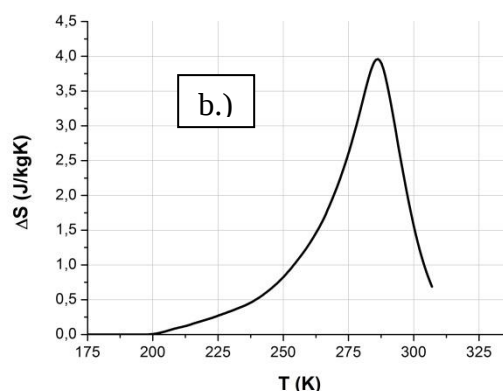
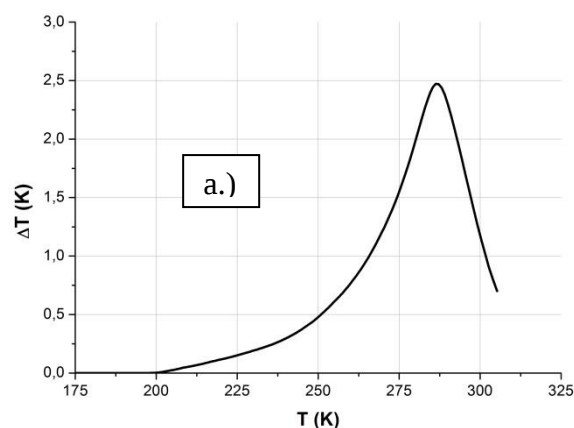


Fig. 7 Changes in the temperature (a) and entropy (b) of gadolinium for 1 T magnetic flux density, depending on the ambient temperature

The medium which recovers and provides the heat to the magnetocaloric material can be used in a liquid or gaseous form. The designed laboratory test stand will use the liquid refrigerating medium. The fluid will be transported within the system consisting of pistons connected to the magnetic bed by flexible pipes. The pistons will not only act

as the fluid transportation systems, but also as the hot heat exchanger (hot HEX) and cold heat exchanger (cold HEX).

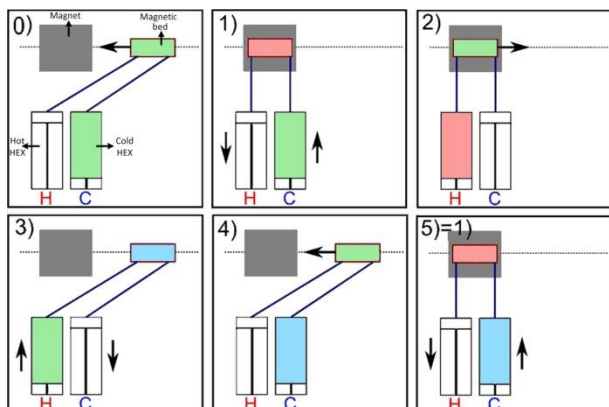


Fig. 8 Working cycle of the test stand

The test stand is designed to work in the AMR (Active Magnetic Regenerator) cycle. In such a cycle the magnetocaloric material not only works as the refrigerant, but also as the regenerator. The AMR cooling cycle consists of 4 stages [10] (fig. 8):

(0) initial state of the system,

(1) adiabatic magnetization of the magnetocaloric material resulting in a rise of the magnetic bed temperature,

(2) constant magnetic field process in which the magnetic bed is cooled by the refrigerating medium flowing from the cold HEX; this medium recovers the heat from the bed and transfers it to the hot HEX,

(3) adiabatic demagnetization of the magnetocaloric material which causes the magnetic bed to cool down,

(4) zero magnetic field process in which the cooling medium is pumped from the hot HEX, provides heat to the bed while the cooled medium from the bed is transported to the cold HEX, thus decreasing its temperature,

(5=1) repetition of the whole cycle.

In fig. 8 the colours of the heat exchangers and magnetic bed illustrate the way in which temperatures change in the system. The green colour denotes an initial temperature, the blue colour indicates a temperature drop ( $\Delta T < 0$ ) and the red colour denotes a rise in temperature ( $\Delta T > 0$ ).

#### 4. SUMMARY

This paper presents the laboratory test stand for magnetocaloric effect investigations which is currently under construction. Initially the stand will

use gadolinium as the refrigerant but it will also provide the opportunity to examine the temperature changes in other magnetocaloric materials, regardless of their form. There are also plans to prepare a numerical model of the system in the near future.

#### ACKNOWLEDGMENTS

The research was done partially under the project: Seventh Framework Programme of the European Community (2007-2013), GREEN KITCHEN-Energy efficiency, optimised resources use and process innovation of home appliances and their domestic integration N° 251600 "Marie Curie Action: IAPP".

#### LITERATURE

- [1] Warburg E., "Magnetische Untersuchungen. I. Über einige Wirkungen der Coërcitivkraft", Ann. Phys. 13 (1881), 141–164.
- [2] Brown G. V., Magnetic heat pumping near room temperature", J. Appl. Phys. 47 (1976), 3673 – 3680.
- [3] Pecharsky V. K., Gschneidner Jr K. A., "Giant magnetocaloric effect in  $Gd_5(Si_2Ge_2)$ ", Phys. Rev. Lett. 78 (23) (1997), 4494–4498.
- [4] Wada H., Tanabe Y., "Giant magnetocaloric effect of  $MnAs_{1-x}Sb_x$ ", Appl. Phys. Lett. 79 (2001), 3302–3304.
- [5] Tegus O., Brück E., Zhang L., Dagula, Buschow K. H. J., de Boer F. R., "Magnetic-phase transitions and magnetocaloric effect", Physica B 319 (2002), 174–192.
- [6] Fujita A., Fujieda S., Hasegawa Y., Fukamichi K., "Itinerant electron metamagnetic transition and large magnetocaloric effects in  $La(Fe_xSi_{1-x})_{13}$  compounds and their hydrides", Phys. Rev. B 67 (2003), 1–12.
- [7] Yu B., Liu M., Egolf P. W., Kitanovski A., "A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010", Int. J. Refrig., 33 (2010), 1029–1060.
- [8] Tishin A. M., Spichkin Y. I., "Magnetocaloric effect and its applications", IOP Publishing, Bristol (2003).
- [9] Lee M. G., Lee S. Q., Gweon D. G., "Analysis of Halbach magnet array and its application to linear motor", Mechatronics 14 (2008), 115–118.
- [10] Yu B.F., Gao Q., Zhang B., Meng X.Z., Chen Z., "Review on research of room temperature magnetic refrigeration", Int. J. Refrig. 26 (2003), 622–636.

## MÉRFÖLDKÖVEK

## MILESTONE

### A MAROVISZ DÍJ ÁTADÁSA KAPCSÁN

RITTINGER JÁNOS

**Kulcsszavak:** roncsolásmentes vizsgálatok, MAROVISZ Díj, történeti áttekintés

#### **BEVEZETÉS.**

Nagy megtisztelés ért a VIII. Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Konferencia és Kiállítás alkalmával, a Díj Bizottság javaslatára a Szövetség elnöksége, MAROVISZ Díj kitüntetésben részesített. A kitüntetést a legkedvesebb szakmai kitüntetések közé sorolom. A díj, valószínűen azt a több évtizedes törekvésemet ismerte el, amelyet a roncsolásmentes anyagvizsgálók és a hegesztőszakemberek közötti interaktív kapcsolat létrehozása érdekében fejtettem, fejtek ki. A kitüntetést tisztelettel köszönöm a MAROVISZ elnökségének és a roncsolásmentes anyagvizsgáló társadalomnak.

#### **BEMUTATKOZÁS.**

Okleveles gépészmérnök, hegesztő szakmérnök vagyok. A hegesztő szakmérnöki diplomamunkámat, a Nehézipari Műszaki Egyetem (ma Miskolci Egyetem) doktori dolgozatként fogadta el. Később Eur-Ing, Európai Hegesztő Mérnök (EWE), Nemzetközi Hegesztő Mérnök (IWE) címet és VT 3, PT 3, MT 3, RT 3 tanúsított roncsolásmentes anyagvizsgáló fokozatot szereztem.

Műszaki szakértő (01-9452), a 247/2011. (XI. 25) Kormányrendelet alapján, az atomenergia alkalmazás körében eljáró független műszaki szakértő (01-64822) vagyok.

#### **MUNKAHELYEIM:**

Vasipari Kutató Intézet Hegesztési Osztály (tudományos munkatárs, végül az Osztály vezetője), az MVM Anyagvizsgáló és Állapotellenőrző Laboratórium igazgatója, ma szakértő, több kapcsolódó területen.

Tagja vagyok: az OMBKE Vaskohászati Szakosztályának, az Energia Tudományos Egyesületnek. Mindkét egyesületi tagságot munkahelyem várta el tőlem. A Gépipari Tudományos Egyesület Hegesztési Szakosztályának titkára, elnöke, jelenleg tiszteletbeli elnöke vagyok. Egy-egy cikluson keresztül az Egyesület főtitkára, illetve elnöke voltam. Szakértőként a Magyar Mérnöki Kamarai tagsággal rendelkezem. Több évtizede a Nemzetközi Hegesztési Intézet IX, X, XI bizottságainak magyar delegátusa, az American Welding Society,

a Magyar Anyagvizsgáló Egyesületének is tagja vagyok.

Több szakmai elismerésben részesültem, kutatási jelentéseim, publikációi közül több nívódíjban részesült. A műszaki nagyjaink nevét viselő kitüntetés birtokosa vagyok, ezek közül számomra a legértékesebb, szeretve tisztelt professzorom, Prof. Zorkóczy Béla nevét viselő emlékérem, akinek az egyetem befejezését követően több éven át munkatársa lehettem. Az Óbudai Egyetem Tiszteletbeli polgára vagyok. **Ebbe a sorba került a MAROVISZ Díj.**

#### **KAPCSOLATOM A RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLATTAL**

A '60-as évek közepén a hegesztett szerkezetek gyártása és üzemeltetése során bekövetkezett súlyos meghibásodások nyomán jelentő mértékben megváltoztak a hegesztett szerkezetek anyagai, a szerkezetek tervezésére, anyagmegválasztására és gyártására vonatkozó szabványok. Ezt sajnos nem követte a roncsolásmentes vizsgálati szabványok változása és kiegészítése új vizsgálati módszerekre vonatkozó előírások megjelenése.

A GTE Hegesztési Szakosztály együttműködést kezdeményezett az Anyagvizsgáló Szakosztály, Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Szakbizottságával a hiányosságok felszámolására. A kezdeményező, később javaslattevők Dr. Gállik István, Dr. Rittinger János. voltak. A kezdeményezést felkarolta és támogatta Prof. Dr. Konkoly Tibor és egyetértésre talált Kondoray Egon MSZH kohászati főosztály vezetőjénél akihez a szakterület tartozott. A szakbizottság tagjai a kezdeményezők mellett, Balassay Imre, Dobrova László, Dr. Főzi Gyula, Hegedűs Sándor, Dr. Karsai István, Dr. Tarr József, Tarnai György, illetve Dr. Brenner András és Fehérvári Attila voltak. A konstruktív együttműködés eredménye a koncepció kialakítása és elfogadása, a szabvány javaslatok kidolgozása, szakmai vitája és 9 új szabvány megjelenése lett. A szabványok 1993-ig voltak hatályosak, majd visszavonásra kerültek. Helyüket az EN szabványok foglalták el. Elfogultság nélkül állítható, hogy a visszavont szabványok még ma is korszerűbbek, mint a ma érvényes EN (EN-ISO) szabványok.

Kapcsolatom a roncsolásmentes anyagvizsgálattal az MVM Anyagvizsgáló és Állapotellenőrző

A VIII. RAKK-on elhangzott előadás írásbeli változata

Laboratóriumban teljesedett ki. 1998-ban a laboratórium az ország legnagyobb létszámú kitűnő, jól képzett munkatársakból álló, laboratóriuma volt. A laboratóriumot kitűnő elődöktől, Becker Istvántól, Dr. Süle Jánostól vettem át. 1988-1989 között világbanki kölcsönből jelentős eszközfejlesztés hajtottunk végre. A laboratórium munkatársaival 10 műszaki irányelvet és ehhez kapcsolódóan 24 módszertani útmutatót dolgoztunk ki.

## PÉLDÁK A FONTOSABBNAK TARTOTT EREDMÉNYEKBŐL:

Szétválasztottuk a szerkezetek átvételéhez kapcsolódó vizsgálati módszereket, az üzemelő berendezések időszakos ellenőrzésétől. Jelentős meggyőző munkára volt szükség ahhoz, hogy ez működőképes legyen.

Nemzetközi elismerést váltott ki a bandázsgyűrűk (min. 1000 MPa folyáshatárú ausztenites acél) roncsolásmentes vizsgálatának módszertani fejlesztése. Kritikus hibaméret meghatározása törésmechanikai módszerrel, etalonok létrehozása (BE1-BE4), a gyűrűfeszültség és a Herz feszültség szétválasztása. Vizsgáló automata kifejlesztése és prototípusának elkészítése. 1993-ban nemzetközi workshop, a laboratórium rendezésében [GSW (D), C3F (F)] szakemberek részvételével.

Számítógéppel támogatott oktatóprogram roncsolásmentes vizsgálók számára. A program újszerűségét jellemzi, hogy megvásárolta a Krautkrämer cég és az RTD laboratórium. A programot térítésmentesen megkapta a BME, az NME (ma ME) a roncsolásmentes anyagvizsgálat oktatásának támogatására. A programot a Nemzetközi Hegesztési Intézet (IIW) 1996. évi, Budapesten rendezett közgyűlése alkalmával tartott szoftver workshop-on is bemutattuk.

A roncsolásmentes anyagvizsgáló képzés a '80 évek végén átkerült a GTE-ből az ISZTI-be. A képzés színvonala tragikusan csökkent. A laboratórium átvette a képzést. Ehhez kitűnő infrastruktúra állt rendelkezésre. Sok segítséget kaptunk a Krautkrämer szerviztől, amely a laboratórium területén működött a KE-TECH Kft. megalakulásáig. Vallottam, hogy „aki oktat maga is tanul”.

Jelentősen fejlődtek a nemzetközi kapcsolataink. Részt vettünk a Skoda Művek által szervezett atomerőműi komponensek ultrahangos körvizsgálatában. Paksi Atomerőmű-Labor közös csapata 2. helyezést ért el. Erről a Skoda Művek munkatársai, Milánóban, élettartam menedzselés témakörben tartott nemzetközi konferencián számoltak be. Részt vettünk, az MPA Stuttgart által tervezett TINCA program keretében szervezett ultrahangos körvizsgálatok programjában. A hazai résztvevők (összesen 24 fő) között az első 5 helyen a labora-

tórium munkatársai végeztek (a hazai program eredményét Fücsök Ferenc értékelte ki).

A laboratórium munkatársai által írt cikkek felhasználásával a Gép című folyóirat két célszámát a laboratórium jelentette meg, 1995 és 1997-ben.

A laboratórium kezdeményezésére és költségére a következő kiadványok jelentek meg: Akusztikus emissziós vizsgálat (Szerkesztette: Pellionisz Péter), máig egyetlen magyarul írt szakkönyv a témakörben. Az akusztikus emissziós vizsgálat ipari elterjesztésében a laboratórium sikereket ért el, Rezgésmérés (Szerzők: Magács Dezső, Szűcs Pál), Színkép atlasz (Szerző: Dr. Kéthelyi József)

## A LABORATÓRIUM ÁTALAKÚLÁSA ÉS HANYATLÁSA

1988-ig a laboratórium kirendeltséget működtet 24 fővel a Paksi Atomerőmű szereléséhez, a már üzembe helyezett blokkok időszakos ellenőrzéséhez kapcsolódó anyagvizsgálatok elvégzéséhez. A 4. blokk üzembe helyezését követően a kirendeltség megszűnt, 3 fő kivételével a munkatársak az atomerőmű, alakulóban lévő Anyagvizsgáló Osztályhoz kerültek áthelyezésre. 1989-2001 között a laboratórium szerződés keretében végzi az üzemelő blokkok időszakos vizsgálatait.

1977-ben az ERŐKAR, a laboratóriummal eladásra kerül. Az új tulajdonos a szolgáltató üzletágakat megszünteti, a laboratórium tovább működését 5 évben határozza meg. 2001-ben a laboratórium létszámát jelentősen csökkenti. Később, a még ott lévő munkatársakat a gyártó üzembe helyezik át, rutin vizsgálatok elvégzéséhez. Ezzel a laboratórium megszűnt.

A laboratórium munkatársai részben magánvállalkozók lettek, vagy közösen céget alapítottak. A oktatás Szűcs Pál vezetésével létrehozta az ORSZAK Bt-t, amely ma a roncsolásmentes anyagvizsgálók képzésében meghatározó szerepet játszik. A POWERTEST Kft és a R:U:M Testing Kft kitűnően működő anyagvizsgáló intézmények.

## KAPCSOLATOK A RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLÓ RENDEZVÉNYEKKEL

Rendszeres előadója voltam, vagyok a rendezvényeknek.

A fénykép hátoldalán olvasható: Jánosnak, jó barátsággal emlékül Réty Pál). Dr. Réty Pál készült a IX. szemináriumra, de sajnos már nem élhette meg. A IX. Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Szemináriumot több probléma miatt kudarc fenyegette. A kudarc elkerülésére a laboratórium Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Osztálya közel teljes létszámban részt vett, orális és poszter előadásokat tartottak munkatársaim.

## NÉHÁNY ESEMÉNY



1. fotó A VIII. Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Szeminárium (Gyula) megnyitása

- Reaktortartály komplex roncsolásmentes vizsgálata
- Belső felületek szemrevételezése képrögzítéssel
- Erőműi főberendezések komplex hibaanalizáló roncsolásmentes anyagvizsgálatai
- Hangelnyelési tényező mérése és alkalmazása erőműi főberendezések vizsgálatkor

- Lehetőség univerzális ultrahangos anyagvizsgáló berendezések számítógépesítéséhez
- Bandázsgyűrűk automata ultrahangos vizsgálata

## MEGEMLÉKEZÉS

A roncsolásmentes anyagvizsgáló szabványok új generációjának kidolgozását kezdeményező Dr. Gállik Istvánra, akit tiszteltem, tudása számomra példaértékű volt és mindig barátsággal emlékszem vissza Ő rá. Sok visszaemlékezés és méltatás maradt el, amit feltétlenül pótolni kellene. Engedtesse meg, hogy e helyen néhány mondat erejéig felidézzem Őt.

Édesapja Gállik István dr.h.c. államtitkár, akinek munkásságát többek között az Anyagvizsgálók Közlönyének XVIII. Évfolyam, 1940. 4. száma méltatta, az Egyesület tiszteletbeli taggá választása alkalmával. Meghatározó személy volt a hazai hídépítés anyagvizsgálataiban. Amikor a Műegyetem jogot szerzett a tiszteletbeli doktori cím adományozására, a kitüntetett négy személy közül, Ő volt az egyik. Egyetlen Budapesti történelmi híd, a Szabadság híd (korábban Ferenc József híd) budai oldalának egyik pilléren olvasható neve. 1915-ben a Lánchíd lánctagjainak cseréjére, Ő vezetésével került sor.

Gállik István nevét vette fel a Csepel Művek Anyagvizsgáló Laboratóriumának roncsolásmentes anyagvizsgáló laboratóriuma. Ebből az alkalomból fia, Dr. Gállik István ajándékként egy réz rúdból esztergált, három kockából álló levélnehezéket kapott. A levélnehezéken olvasható „Dr. Gállik Istvánnak a Csepel Művek Anyagvizsgáló Laboratóriumának Gállik brigádja”.



2. fotó A X. Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Szeminárium megnyitása Egerben, a Flóra Szállóban



**3. fotó** A szemináriumon résztvevők az Európai Roncsolásmentes Anyagvizsgálók Szövetségének képviselői Prof. Dr. Konkoly Tibor meghívására



**4. fotó** Az MHTÉ felkarolja a roncsolásmentes anyagvizsgálók minősítését és a minősítés tanúsítását. Erről ad tájékoztatást a szemináriumon, Dr. Szabó Béla, az MHTÉ igazgatója



**5. fotó** Reményünket fejezzük ki, hogy a jövőt illetően, a roncsolásmentes anyagvizsgálók minősítése, tanúsítása, a rendszeres továbbképzésük jó „kezekbe” került



**6. fotó** Az Anyagvizsgáló és Állapotellenőrző Laboratórium munkatársainak asztaltársasága a X., egyben utolsó GTE Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Szemináriumon

A további szemináriumok szervezését a MAROVISZ vette át.

## **MEGEMLÉKEZÉS**

A roncsolásmentes anyagvizsgáló szabványok új generációjának kidolgozását kezdeményező Dr. Gállik Istvánra, akit tisztelem, tudása számomra példaértékű volt és mindig barátsággal emlékszem vissza Ő rá. Sok visszaemlékezés és méltatás maradt el, amit feltétlenül pótolni kellene. Engedtesse meg, hogy e helyen néhány mondat erejéig felidézzem Őt.

Édesapja Gállik István dr.h.c. államtitkár, akinek munkásságát többek között az Anyagvizsgálók Közlönyének XVIII. Évfolyam, 1940. 4. száma méltatta, az Egyesület tiszteletbeli taggá választása alkalmával. Meghatározó személy volt a hazai hídépítés anyagvizsgálataiban. Amikor a Műegyetem jogot szerzett a tiszteletbeli doktori cím adományozására, a kitüntetett négy személy közül, Ő volt az egyik. Egyetlen Budapesti történelmi híd, a Szabadság híd (korábban Ferenc József híd) budai oldalának egyik pilléren olvasható neve. 1915-ben a Lánchíd lánctagjainak cseréjére, Ő vezetésével került sor.

Gállik István nevét vette fel a Csepel Művek Anyagvizsgáló Laboratóriumának roncsolásmentes anyagvizsgáló laboratóriuma. Ebből az alkalomból fia, Dr. Gállik István ajándékként egy réz rúdból esztergált, három kockából álló levélnehezéket kapott. A levélnehezéken olvasható „Dr. Gállik Istvánnak a Csepel Művek Anyagvizsgáló Laboratóriumának Gállik brigádja”.

## **ZÁRSZÓ**

A visszaemlékezés messze nem teljes. Szakmai pályafutásomat a hegesztés és az anyagvizsgálat töltötte be. Később e két szakterületen szerzett ismereteimre épült az üzemelő hegesztett szerkezetek élettartam menedzselése, maradó élettartamának meghatározása és kockázatelemzése.

Mindenkor törekedtem a hegesztés és a roncsolásmentes anyagvizsgálat közötti interaktív kapcsolat kiépítésére, működésének segítésére és fejlesztésére.

Köszönöm a számomra értékes MAROVISZ Díj-at, a MAROVISZ elnökségének, tagságának, a roncsolásmentes anyagvizsgáló társadalom elismerésének.

## MÉRFÖLDKÖVEK

## MILESTONE

187 ÉVE SZÜLETETT HENRY CLIFTON SORBY, A SORBIT NÉVADÓJA  
187 YEARS AGO HENRY CLIFTON SORBY WAS BORN,  
THE „SORBITE” IS NAMED AFTER HIM

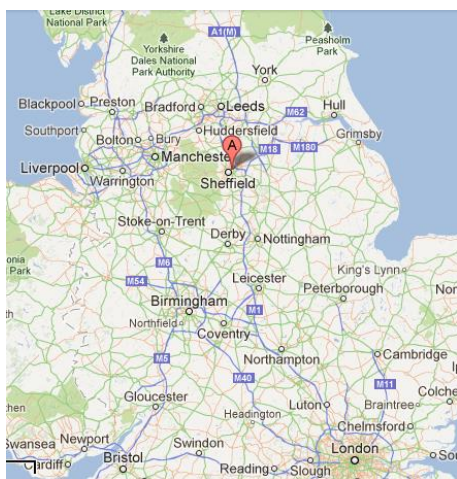
DÁVID ESZTER, ERDEI TIMOTEI ISTVÁN

**Kulcsszavak:** metallográfia, SORBY, sorbit, életrajz, történelem

**Keywords:** metallography, SORBY, sorbite, CV, history

### HENRY CLIFTON SORBY

A metallográfia és ezen belül e mikroszkópos vizsgálatok megalapozójának egyik legnagyobb alakja Henry Clifton SORBY 1826. május 10.-én született a Londontól kb. 270 km-re északra található Sheffield (1. ábra) melletti Attercliffe-Woodbourne-ban (2. ábra) egy vagyonos középosztálybeli család egyetlen gyermekeként. Édesapja szerszám- és evőeszköz-készítő mester volt, a „John Sorby & Sons” vállalat társtulajdonosa. A szülők abban reménykedtek, hogy fiuk folytatja a családi hagyományokat, de Sorby ezt soha nem tette.

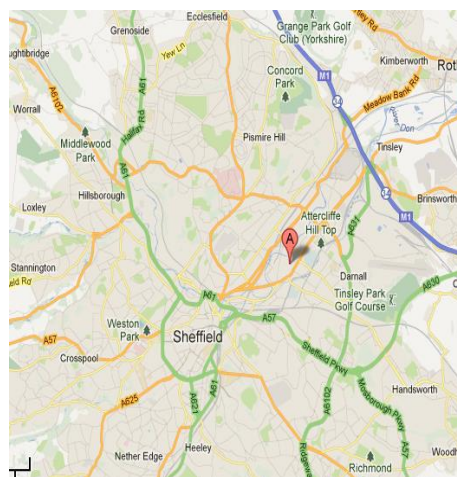


1. ábra Henry Clifton SORBY szülőhelye Sheffield közelében

Ehelyett 15 évesen úgy döntött, hogy természettudós lesz. A Sheffield Collegiate School befejezését követően magánúton folytatta tanulmányait egy magántanár segítségével. Habár családja megengedhette volna magának, hogy fiukat egyetemre küldjék, nem tudták, mert nem voltak még olyan egyetemi kurzusok, melyek kizárólag a természettudományokkal foglalkoztak volna. Gondoljuk csak meg, a világ első, műszaki jellegű képzése 1735-ben indult meg Selmecbányán, amelynek követője az 1745-ben Braunschweigben (Németország) alapított „Collegium Carolinum” volt, majd

egyetemi hallgató, Debreceni Egyetem Műszaki Kar, TDK dolgozat (2012), Konzulens Tóth László egyetemi tanár

Párizsban 1794-ben megnyitott École Polytechnique volt. Ez utóbbiban igen nagy szerepe volt az 1753. május 13.-án született kiváló tudósnek, Lazare CARNOT-nak, akinek nevét a matematika, áramlástan és termodinamika egyaránt őrzi.



2. ábra. Henry Clifton SORBY szülőhelye Attercliffe-Woodbourne-ban,

Sorby édesapja 1847-ben meghalt, de Sorby szép életjáradékot kapott, ami szükségtelessé tette, hogy meagélhetéséről más módon gondoskodjék. Ahelyett azonban, hogy egy ifjú úriember divatos életét élte volna, azonnal egy tudományos laboratórium és műhely megalapításába kezdett, méghozzá saját otthonában (Broomfield, Beech Hill Road, Broomhill – Jelenleg ezen a helyen található a Royal Hallamshire Hospital) Életének elkövetkező 61 évét ennek a laboratóriumnak szentelte. 1908-ban, 82 éves korában bekövetkezett halála előtti utolsó napokig dolgozott. Ezen anyagi függetlenség nagy hatással volt munkásságára. Felettesektől és anyagi terhektől mentesen egész életét tudományos céljainak szentelhette, még akkor is, amikor időnként költségesnek és terméketlennek mutatkoztak erőfeszítései. Vélhetően Sorby (3. ábra) volt a legnagyobb tudományos amatőr egy olyan korban, amikor a tudomány a szakemberek kiváltságává kezdett válni.



3. ábra. Henry Clifton Sorby (1826.05.10.- 1908. 03.9.)

Alapvetően a mikroszkópiához (fénymikroszkóp) kötődő munkássága a következő témakörökre terjedt ki:

- Kőzettani, geológiai kutatásai
- Metallurgiai (döntően abból a motivációból kiindulva, hogy Sheffield igen nagy szerepet játszott az ipari forradalomhoz kötődő nyersvasgyártás termelésében és fejlesztésben) kutatásai,
- Tengerbiológiai kutatásai.
- Egyéb mikroszkópiai kutatásai.

### KÖZETTANI, GEOLÓGIAI KUTATÁSAI

Sorby tudományos kutatásainak fő területe a geológia, és ezen belül a kőzettan volt. Az egyik legkiemelkedőbb ok, amiért neve a köztudatban nem forrt össze véglegesen a geológiával, hogy Sorby olyan speciális szakterületen dolgozott, amelynek megértése problémákba ütközött az átlagember számára. 1849-ben a geológia egyik teljesen új területének kialakulásában úttörő szerepet játszott – ez volt a **mikroszkopikus petrográfia (ásványok mikroszkopikus vizsgálata)**. Ennek lényeges az, hogy a kőzetek rendkívül vékony rétegeit vizsgálta mikroszkóp segítségével. Kézzel kőzetszeleteket morzsolt majdnem porrá, a hihetetlenül vékony, tízed mm nagyságrendű vastagságig, majd ezt követően normál és polarizált fényben megvizsgálta őket. Ezt a technikát nem Sorby találta fel, de ő volt az, aki felismerte gyakorlati jelentőségét geológiai

vizsgálatai során és a természettudomány elismert ágává fejlesztette ezt a technikát.

Ahogy évekkel később Sorby mondta:

*„Akkoriban mindenki kinevetett engem. Saussure-t idézve a hegységeket nem mikroszkóppal kellene vizsgálni, és emiatt minden lehetséges módon kinevették foglalkozásomat. Szerencsére ügyet sem vettem rájuk.”*

Sorby rámutatott bírálójának arra, hogy egyetlen ismert csillagászt sem korlátoznak csak azon megfigyelésekre, melyeket pusztán szemmel tudnak végezni. Miért kellene tehát a geológusokat amiatt lekorlátozni és elítélni, mert nincs szükségszerű kapcsolat egy vizsgált tárgy mérete és azoknak az adatok és következtetések értéke között, amelyeket abból meg lehet állapítani. A kőzetek ilyen módon való vizsgálatával Sorby felfedezett egy nagyszerű dolgot a keletkezésükkel kapcsolatban. 1853-ban alkalmazta mikroszkópi technikáit egy addig sokáig vitatott jelenség a **„slaty cleavage”** (palalemezek hasadási vonalakat képeznek elhelyezkedésük eredeti irányától függetlenül) kutatására. Több geológus is foglalkozott már ezzel a problémával, de Sorby volt az, aki meggyőzően tudta bizonyítani a jelenség valódi okát, a mechanikai hatást, a belső erők okozta alakváltozást, feltűrést. Munkájának kezdetén a Geological Survey főigazgatója mellékesen megjegyezte, hogy felesleges ezt a témát vizsgálni, hiszen már megoldották a problémát. Sorby szerencsére ismét figyelmen kívül hagyta a megjegyzést és folytatta kutatómunkáját, majd pedig bebizonyította, hogy a főigazgató tévedett! 1857-ben, alig 31 évesen megválasztották a Royal Society tagjává a **„slaty cleavage”**-dzel kapcsolatos munkája elismeréseként. 1858-ban írta első publikációját a témában "On the Microscopical Structure of Crystals" (Quart. Journ. Geol. Soc.) címmel (4. ábra).

### METALLURGIAI, FÉMTANI KUTATÁSAI

Sorby egész életében a természettudományok „úttörője” volt. Ha sikerült megoldani valamely problémát, nem elégedett meg vele, és keresett egy másik érdekesítő témát, másokra hagyva a tanulmány részletes kidolgozását, amelyet elkezdett. A kőzetek mikroszkópi tanulmányozása vezette el a kristályok apró, folyadékkal telt üregeinek vizsgálatához és hogy ily módon nyomon követhető a kőzetek évmilliók alatti formálódása. Ezt az utat folytatva jutott el a meteoritokhoz és a meteorikus vas tanulmányozásához, majd pedig a modern

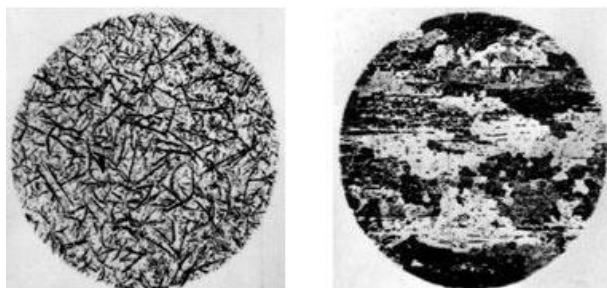
gyári vas és acél mikroszkópi vizsgálatához, ami egy nagyon is odaillő munka volt Sheffieldben, mely a XIX. században világszer-  
te elismert volt kiváló minőségű acélgyártásáról. Egy másik addig ismeretlen tudományágat alapított meg 1863-ban: a **fém-mikroszkópi-  
át**, ami a mai modern kohászat elengedhetel-  
en része. A nagyon sokszor idézett mikroszkó-  
pos felvételeit az 5. ábrán láthatjuk.



ON THE MICROSCOPICAL STRUCTURE  
OF CRYSTALS: INDICATING THE  
ORIGIN OF MINERALS AND ROCKS



**4. ábra.** H.C.Sorby első könyve: On the Microscopical Structure of Crystals: Indicating the Origin of Minerals and Rocks



**5. ábra.** Maratott öntöttvas és vaspáncél mikroszkópi képe

Sorby élete végéhez közeledve jogos elé-  
gedettséggel nyilatkozott így:

„Régen, ha egy vasúti szerencsét-  
lenség történt és azt javasoltam,  
hogy a vasúti részvénytársaság vá-  
gasson ki egy sin darabot, hogy  
megvizsgálhassam mikroszkóppal,  
mindig úgy néztek rám, mint egy  
őrültre, akinek inkább sürgős or-  
vosi segítségre van szüksége, nem  
pedig mikroszkópra. De ennek már  
vége...”

Sorby a spektrumanalízissel kezdett kísérle-  
tezni 1864-ben. Ötvözte a spektrométert és a  
mikroszkópot, így mikroszkópi vizsgálatai a  
fémkohászat területén elvezették egy új eszköz  
felfedezéséhez: a *spektroszkóphoz*. Ezen

munka vezetett el egy új tudományág kifejlödé-  
séhez: a *mikro-spektroszkópiához*,  
amelyben tehát a lokális sajátosságok minőségi  
és mennyiségi megállapítására nyílt lehetőség.

Feltehetően Sorby nevéből is eredeztethető  
az acélok tipikus szövetszerkezetének a neve,  
a „sorbit” is. Nem zárható ki, hogy az elneve-  
zés Albert Sauveur belga (később amerikai)  
metallurgushoz köthető, aki Leuvenben 1863.  
06.21.-én született és 1939. 01.26.-án hunyt el.  
Érdekességként említhető meg, hogy az  
Anyagvizsgálók Nemzetközi Konferenciáján  
Koppenhágában (1909. szeptember 7-11),  
Henri Le Chatelier már a sorbit, troostit és  
osmondit elnevezésű szöveteket, mint elneve-  
zéseket törölni javasolja a vas-karbon rendszer  
szövetei kapcsán.

## TENGERBIOLÓGIAI KUTATÁSAI

1878-ban Sorby vett magának egy jachtot, a  
Glimpse-et (6. ábra).



**6. ábra.** Henry Clifton Sorby a Glimpse fedélzetén

Egyébként a hajó neve összhangban van  
Sorby életének fő tevékenységével, hiszen a  
„glimpse” pillantást jelent, azaz közvetlenül a  
mikroszkópizálási folyamathoz kötődik. Vélhe-  
tően, szeretett édesanyja halála után szeretne  
volna lefoglalni magát valamivel. Az talán a  
korábbi tevékenységekből is nyilvánvaló, hogy  
Sorby nem szórakoztató utazgatásokra hasz-  
nálna újdonsült hajóját. Nem hazudtolta meg

magát már a vásárláskor sem: tanulmányt készített a hajóépítés módszereiről és a vitorlázatról, majd pedig előadást tartott a témában. A Glimpse nagy jacht volt, ötfős legénységgel és egy úszó laboratóriumnak megfelelően volt felszerelve. Sorby az elkövetkező húsz évben minden nyarat a hajón töltött, Anglia keleti partján oda-vissza hajózva, miközben geológiával, botanikával, meteorológiával, archeológiával és nem utolsósorban tengerbiológiával foglalkozott. Kifejlesztette saját különleges technikáit az aktuális tengeri állatok és növények mintáinak előkészítésére, kifejezetten azért, hogy torzítás nélkül kivethetők legyenek egy ellenzón. Nagyon sok ezek közül a lapkák közül még mindig megtekinthető a Sheffield City Museum-ban. Sorby tanulmányozta a Temze torkolatában élő organizmusokat is, valamint vízmintákat gyűjtött és vizsgált a Royal Commission on the Drainage of London számára. Ezek közül látható néhány a 7. ábrán.



**7. ábra.** Henry Clifton Sorby tengerbiológiai kutatásai során készített lenyomatai.  
(Megtekinthető: The University Of Sheffield, Department of Animal and Plant Sciences)

## EGYÉB, A MIKROSKÓPIÁHOZ KÖTHETŐ KUTATÁSAI

Sorby ezzel a technikával felfedezett egy olyan eszközt is, amivel a hajsálerek vizsgálhatóak, még akkor is, ha azok az emberi szem számára láthatatlanok, ami nyilvánvaló bizonyítékokat szolgáltatott a törvényszéki orvoslás számára. Sorby azonban nemcsak itt alkalmazta spektroszkópját, hanem tudományos kutatásainak minden területén, ahol a színek bármilyen szerepet is játszottak. Többek között vizsgálta a levelek pigmentjeit, gombákat, madártojásokat, emberi haját, faipari anyagokat, az eget, rovarokat, növényeket, algákat és féldrágaköveket. Publikációiban ismertette

kutatási eredményeit és minden alkalmat megragadott, hogy demonstrálja az érdeklődőknek a mikroszkóp használatát. Az érdeklődők egyike volt John Ruskin, aki akkor már hosszú barátságra tekintett vissza Sorbyval és verseket írt a spektroszkóp által látott szépségekről. Sorby még azt is hitte, hogy felfedezett egy új kémiai elemet a *spektrumanalízis* segítségével, amit ő Jargonium névvel illetett. A további vizsgálatok azonban bebizonyították, Sorby legnagyobb bánatára, hogy tévedett.

Sorby széles érdeklődési körét gazdagította építészettel, archeológiával, régi templomokkal, középkori művészettel, egyiptomi hieroglifákkal, kéziratokkal és szórakozásképpen vízfestékekkel festgetett.

1875-77-ig a Microscopical Society elnökévé választják. Sorby elnöksége alatt egyik alkalommal így nyilatkozott:

*„Egész eddigi életemet vagy tudományos kutatásoknak szenteltem vagy az erre való készülésre”*

## ORSZÁGOS ELISMERÉS

Sorby munkáját élete során komoly nemzeti és nemzetközi elismerés övezte, habár soha nem várt munkájáért semmilyen elismerést. Körülbelül 250 publikációja látott napvilágot. Többek között három arany medállal jutalmazták: 1869-ben Wollaston Medállal a Geological Society-től, 1872-ben Arany Medállal a Dutch Society of Sciences-től és 1874-ben a Royal Society szintén Arany Medállal fejezte ki megbecsülését. Sorbyt több alkalommal is elnöknek választotta a Royal Microscopical Society, a Mineralogical Society, a Geological Society és a British Association geológiai szervezete. Sorbyn kívül kevés olyan tudóssal, polihisztorral találkozunk a történelem során, aki ilyen hírnevet szerzett ennyire szerteágazó tudományterületeken.

## SORBY ÉS SHEFFIELD

Sorby soha nem nősült meg és egész életét Sheffieldben élte le, annak ellenére, hogy nemegyszer hívták Londonba, ahol közelebbi kapcsolatba kerülhetett volna a kor legújabb tudományos eredményeivel. 20 évesen csatlakozott a Sheffield Literary and Philosophical Society-hez és az elkövetkező 60 évben mindig aktív tagja maradt. Hét alkalommal választotta meg a Society az elnökévé és kezdeti kutatásait gyakran mutatta be a „Lit. & Phil.”-nek, mielőtt publikálta volna bármely országos tudományos szaklapban. Sorby rendszeresen szervezett „találkozókat” – a társasági és tudományos estek ezen egyesülését zenével,

beszélgetésekkel, csipegetnivalóval tarkítottak, valamint tudományos bemutatókkal, rövid előadásokkal és a mikroszkópi technikák, illetve más tudományos eszközök bemutatásával fűszerezték. Sorby volt a „Yorkshire Naturalists” Union első elnöke is, ami a természettörténeti társaságok megyei szövetsége volt és 1879-ben nagyban közreműködött a British Association Sheffieldben megrendezett találkozójában. Mark Firth-fel karöltve komoly erőfeszítéseket tettek a Sheffield-i felsőoktatás fejlesztéséért. Firth halálát követően 1882-ben Sorby lett a Firth College elnöke, mialatt folytatta munkáját egy egyetem megalapításáért a városban. A Firth College-ből alakult meg a későbbi University of Sheffield. Végül is 1905-ben alapították meg az egyetemet, amire végrendeletében Sorby jelentős összeget hagyott egy geológia tanári állás megalapítása céljából. Itt található a róla elnevezett Sorby Centre for Electron Microscopy and Microanalysis. Sorby megalapított egy társaságot is, hogy támogassák a kezdeti kutatásokat, éppúgy, ahogyan ő is, a vizsgálatainak szentelhette az életét.

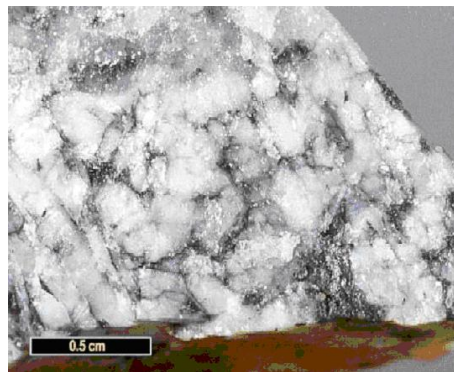
Élete utolsó 5 évében ágynyugalomra kényszerítette több baleset is, ennek ellenére rendíthetetlenül folytatta munkáját, befejezte és publikálta fontos felfedezéseit. 1908-ban, 82 éves korában hunyt el, az Eccleshall temetőben helyezték végső nyugalomra. Sírja a 8- ábrán látható.



**8. ábra.** Henry Clifton Sorby síremléke Sheffieldben, az Eccleshall temetőben.

Sorby halálát követően, 1918-ban a kiváló tudós előtt tisztelegve megalapították a Sorby Natural History-t, valamint a Sorby Scientific Society-t. Sorby-ról nevezték el a 9. ábrán látható kőzetet is. A Holdon nevét a „Dorsa Sorby” (egy 80 km hosszúságú gyűrődési gerinc) a kőzettani kutatásaihoz kötődően (slaty cleavage).

Sorby életéről, munkásságáról, eredményeiről bővebb információkhoz lehet jutni az Irodalomjegyzékben és a Képek jegyzékében található források felhasználásával.



**9. ábra.** Henry Clifton Sorby-ról elnevezett SORBYITE kőzet  $\text{Pb}_{19}(\text{Sb}, \text{As})_{20}\text{S}_{49}$

## IRODALOMJEGYZÉK:

- [1.] Valerie Clinging: Henry Clifton Sorby - Sheffield's Greatest Scientist, [www.sorby.org.uk/hcsorby.shtml](http://www.sorby.org.uk/hcsorby.shtml) 2012. 02.20. 15:53
- [2.] Journal of the Royal Microscopical Society, Volume 28, Issue 4, pages 431–435, August 1908, [www.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2818.1908.tb04877.x/abstract](http://www.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2818.1908.tb04877.x/abstract) 2012.03.05.20:51
- [3.] The University of Sheffield, Department of Animal and Plant Sciences [www.shef.ac.uk/aps/about/sorby](http://www.shef.ac.uk/aps/about/sorby) 2012.03.02.23:52
- [4.] W. H. Wilcockson: The Geological Work of Henry Clifton Sorby; (Presidential Address, 17th November, 1945)
- [5.] "Sorby, Henry Clifton." Complete Dictionary of Scientific Biography. 2008. Encyclopedia.com. 5 Mar. 2012 <<http://www.encyclopedia.com>>.
- [6.] PAUL HANCOCK and BRIAN J. SKINNER. "Sorby, Henry Clifton." The Oxford Companion to the Earth. 2000. Encyclopedia.com. 5 Mar. 2012 <<http://www.encyclopedia.com>>.
- [7.] <http://www.rotherhamweb.co.uk/genealogy/sorby.htm>
- [8.] The Guardian, Education Guardian, Thursday 8 February 2007 23.51 GMT Article History <http://www.guardian.co.uk/education/2007/feb/08/highereducation.comment>

## KÉPEK JEGYZÉKE

- [9.] <http://www.shef.ac.uk/materials/research/centres/sorby/background>
- [10.] <http://www.shef.ac.uk/aps/about/sorby>
- [11.] [www.sorby.org.uk/hcsorby.shtml](http://www.sorby.org.uk/hcsorby.shtml)
- [12.] <http://www.yorksgesoc.org.uk/Sorby.jpg>
- [13.] [http://www.timeshighereducation.co.uk/Picture/web/p/1/j/odds\\_and\\_quads\\_070711.jpg](http://www.timeshighereducation.co.uk/Picture/web/p/1/j/odds_and_quads_070711.jpg)
- [14.] <http://familytreemaker.genealogy.com/users/s/o/r/Timothy-M-Sorby/PHOTO/0023photo.jpg>

## MÉRFÖLDKÖVEK

## MILESTONE

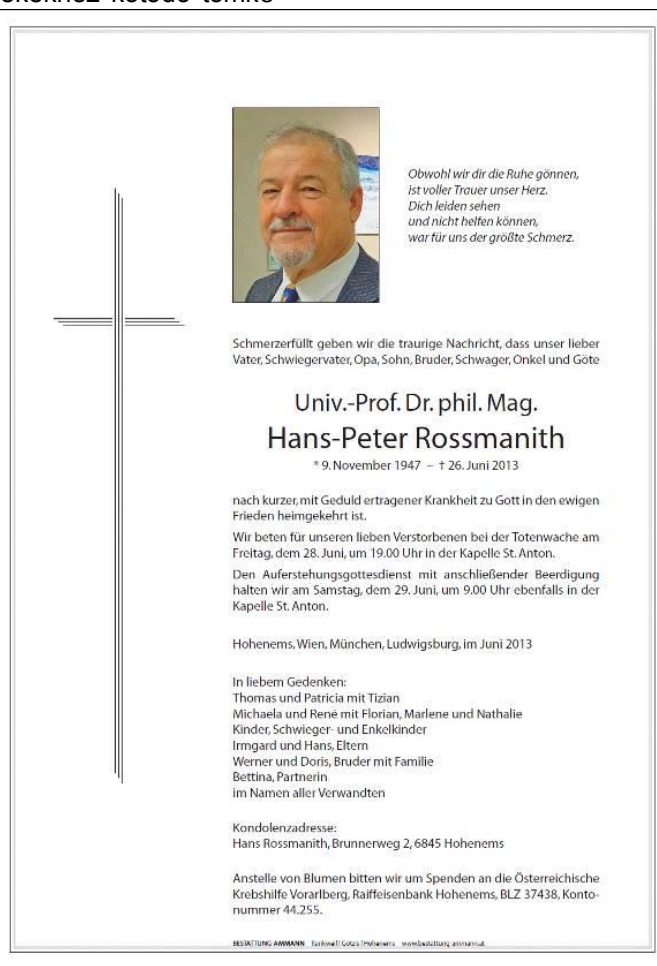
### HANS-PETER ROSSMANITH (1947-2013)

Az alábbi gyászjelentést kaptam egy 2013. június 27.-én 18:49-kor kelt e-mail mellékleteként Thomas ROSSMANITH és Michaela KÖLTZ aláírással. Olvasván a parte szövegét hírtelen a világ legkülönbözőbb földrajzi helyein átélt közös eseményekhez, közös emlékekhez kötődő tömkelege zúdult agyamba. Egy kiváló, a legjobb értelemben vett igazi „világfit” veszítetett a törésekkel foglalkozó szakembergárda Rossmanith professzor távozásával. Az emlékeimből, a tevékenységéből csupán néhány elemet kiemelve adózom személye, nagysága, jelentősége előtt. Életének tevékenységéhez a fizikai keretet a születés (1947. november 9.) és a halál (2013. június 26.) között eltelt 23.971 nap, és az ehhez kötődő mintegy 2.1 milliárd szívdobbanás adta. A Bécsi Műszaki Egyetem professzoraként ismerhettem meg a rendkívül agilis, mindig mozgásban levő remek hangulatú embert valamikor az 1980-as évek végén, vagy az 1990-es évek legelején. Ismeretségünk „kerítőhálója” az akkor már jó ideje Bécsben dolgozó, a volt miskolci diák, az 1956-os események miatt először Svájcba távozó Varga Tamás professzor volt. Ő 1978-1999 vezette a Bécsi egyetem berkein belül a Tetmajer Lajos (Ludwig von Tetmajer) által alapított Technische Versuchs- und Forschungsanstalt GmbH-t. Varga Tamás professzor - az akkor még – Budapesti Műszaki Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékének (BME –MTT) rendszeres látogatója, előadója volt. E tanszék kiváló munkatársain keresztül vehettem részt Bécsben a Varga professzor által rendszeresen megszervezett konferenciák egyikén az 1980-as évek végén,

amelynek szinte állandó meghívott vendége volt George IRWIN professzor – a „törésmechanika atyja” - is, akihez szakmai, baráti kapcsolatok fűzték Hans-Peter Rossmanith professzort. A hosszú –és idővel személyes barátsággá fejlődött kapcsolatunkból engedjék meg, hogy kiemeljek

néhány, számomra és talán a múltat megőrző, a jövő számára lényeges motívumot. Az elsők egyike a néha Varga Tamás professzorhoz és George IRWIN-hez kötődik, amelynek H. P. Rossmanith és G. Irwin kapcsolatát talán leghűebben a következő – Irwin halálhírének kapcsán kapott levél idézete tükrözi: „He did on Friday, October 7 – 1998 – at 6.30 p.m. a very peaceful death while sleeping on his sofa! Actually Silvia (H.P. Rossmanith felesége) was there too and my son Thomas. I could not make it for another visit, so at least 50% of my family was there when he died” Ugyanabban a levélben vetíti előre G. Irwin 100. születésnapjára szervezendő rendez-

vényének vízióját: „I hope to organise an exhibition about fracture mechanics on the occasion of his 100th birthday.... I have been collecting personal items and professional items for this exhibition a long time ago. In a way I feel responsible for keeping the memory of George in the community” A konferencia megrendezésre került Bécsben, 2007. március 1-2.-án „Karl Weighard and George R. Irwin Centenary Conference (WICC) címmel, ahol jómagam is előadást tarthattam „Fracture Mechanics and Material Testing – A Brief History” címmel.



Obwohl wir dir die Ruhe gönnen,  
ist voller Trauer unser Herz.  
Dich leiden sehen  
und nicht beten können,  
war für uns der größte Schmerz.

Schmerz erfüllt geben wir die traurige Nachricht, dass unser lieber  
Vater, Schwiegervater, Opa, Sohn, Bruder, Schwager, Onkel und Göte

Univ.-Prof. Dr. phil. Mag.  
Hans-Peter Rossmanith  
\* 9. November 1947 – † 26. Juni 2013

nach kurzer, mit Geduld ertragener Krankheit zu Gott in den ewigen  
Frieden heimgekehrt ist.

Wir beten für unseren lieben Verstorbenen bei der Totenwache am  
Freitag, dem 28. Juni, um 19.00 Uhr in der Kapelle St. Anton.

Den Auferstehungsgottesdienst mit anschließender Beerdigung  
halten wir am Samstag, dem 29. Juni, um 9.00 Uhr ebenfalls in der  
Kapelle St. Anton.

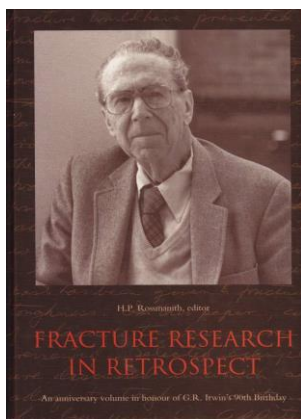
Hohenems, Wien, München, Ludwigsburg, im Juni 2013

In liebigem Gedenken:  
Thomas und Patricia mit Tizian  
Michaela und René mit Florian, Marlene und Nathalie  
Kinder, Schwieger- und Enkelkinder  
Irmgard und Hans, Eltern  
Werner und Doris, Bruder mit Familie  
Bettina, Partnerin  
im Namen aller Verwandten

Kondolenzadresse:  
Hans Rossmanith, Brunnerweg 2, 6845 Hohenems

Anstelle von Blumen bitten wir um Spenden an die Österreichische  
Krebshilfe Vorarlberg, Raiffeisenbank Hohenems, BLZ 37438, Konto-  
nummer 44.255.

BESETZUNG: ANWANDT - Fortschritt - Götter - Fortschritt - Fortschritt



George Irwin és H.P. Rossmanith bensőséges kapcsolatának egy másik bizonyítéka az Irwin 90. születésnapjára megjelentetett „**Fracture Research in Retrospect**” könyv, amelynek szerkesztője Rossmanith professzor volt.

Bécs közelsége miatt Jómagam is számos projekten keresztül kapcsolódtam Rossmanith Professzor tevékenységéhez. Ezek egyike volt az a konferenciasorozat, amelyet „Teaching and Education in Fracture Mechanics and Fatigue” címmel rendeztünk az 1990-es évek elején két alkalommal. Az első Bécsben, a másodikat pedig Miskolctapolcán. Hallgatóimnak kiváló előadást tartott a törésmechanikáról a Miskolci Egyetemen.

Ugyancsak sok szálon kötődött tevékenységünk a „Teaching and Education in Structural Integrity in Hungary” című Tempus projekt keretében, amelynek során született az oktatásban közvetlenül hasznosítható mellékelt két dokumentum is. Ezek mindegyike megtalálható a Magyar Elektronikus Könyvtár gyűjteményében is<sup>1,2</sup>. E közös munkák másik eredménye Rossmanith professzornak az Anyagvizsgálók Lapjában megjelent két magyar nyelvű cikke, amelynek mindegyike újabb adalékkal szolgált a törésmechanikai diszciplína történetének megismeréséhez<sup>3,4</sup>.

Rossmanith Professzor indította útjára a műszakiak, a biztosítótársaságok és jogászok közös gondolkodásának igényét a „termékfelelősség” témakörében. Ennek egyik megnyilvánulása volt az általa mintegy két évtizeden keresztül szervezett „Structural Failures, Product Liability and Technical Insurance – STP” nemzetközi konferenciasorozat, amelyből 1993 novemberében nőtt ki az „International Society Technology, Law and Insurance - ISTLI”. Az egyesület tiszteletbeli elnöke G. Irwin, ügyvezető elnöki feladatit H. P. Rossmanith professzor látja el. Ennek kincstárnoka, majd az egyesület 1996-tól megindult folyóiratának (Technology, Law and Insurance) szerkesztőbizottságának tagja lehettem.

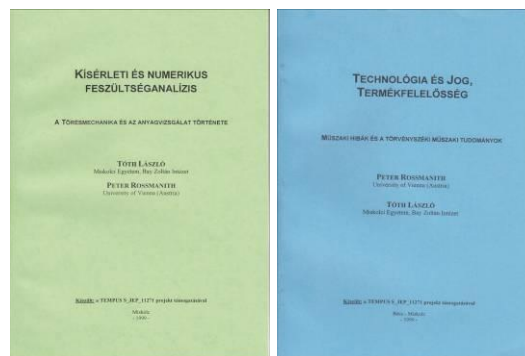
<sup>1</sup> <http://mek.oszk.hu/01100/01191>

<sup>2</sup> <http://mek.oszk.hu/01100/01184>

<sup>3</sup> H.P. Rossmanith: Josef A. Kies és a feszültségintenzitási tényező a törésmechanikában (1999/3)

<sup>4</sup> H.P. Rossmanith: Törésmechanika és anyagvizsgálat: A XX. század elfelejtett úttörői, I rész és II. rész (2001/4)

Hazánk már 1994 januárjában kapcsolódott a szervezethez a Gépipari Tudományos Egyesület



nevében **Dr. Rittinger János** és **Dr. Borbás Lajos** írja a lá a megállapodást Budapesten H. P. Rossmanith Professzorral a GTE székházában. Az ISTI létrejötte alapozta meg a kockázatalapú szemlélet alkalmazását a mindennapi élet legkülönbözőbb területén, így az iparban is. Hazánk korai csatlakozása és aktív részvétele az ISTLI tevékenységében eredményezte azt, hogy európai, de különösen közép-európai viszonylatban Magyarországon meglehetősen korán meghonosodott, általánossá vált a kockázatalapú szemlélet alkalmazása.



Rossmanith professzor főszerkesztője volt két nemzetközi folyóiratnak. Ezek címlapjai a következők:



Kiváló, nemzetközi szinten ismert és elismert szakmai tevékenységét nehéz lenne túlbecsülni. A „caustikák módszerére” alapozott dinamikus törésmechanikai vizsgálatokhoz kötődő laboratóriuma a világon meghatározó jelentőségű volt. A közetek töréséhez kötődő szakmai tudását a világ bányászata a mindennapi életében használta. Ehhez számos utazása kötődött a világ legkülönbözőbb tájainak érintésével. Anekdotaszerűen hangzik, de egyben - általam is tapasztalt - tény is: Rossmanith professzor többnyire a British Airway járatait vette igénybe utazásihoz. A cég szabadjegyet adott azon utasainak, akik évenként 160.000 km-t repültek a járataikon. Rossmanith professzornak évi min. egy, de inkább két szabadjegy volt évenként aktív korában.

Mint egyén, mind személy kiváló ember volt! Otthoni szakmai könyvtára egyedülálló gyűjteménye a törésmechanika tudományterületének. Remekül főzött, szerette a remek konyhát, ételeket, és nem csupán fogyasztani, de elkészíteni is! Egyik kedven foglalatossága volt a „receptkönyv” készítése. Később, nyugdíjazását követően festett is. Ezek közül kettőt kiemelve az egyik valamilyen módon kötődik az énekezéshez, a másik pedig azon kistelepülés jellegéhez, ahol szívesen töltötte idejét.



**Tisztelt H. P. Rossmanith Professzor Úr, Kedves Péter!** Tudomásul kell vennünk az élet megfordíthatatlan általános törvényszerűségét, így búcsúznunk kell Tőled is! Teszem ezt mindazon magyar szakemberek, barátok nevében, akik megismerhettek Téged, akikkel kapcsolatban voltál, akiknek társaságod kellem volt, akikkel Te is jól érezted magad, találkozáskor bárhol is a világban!

**Tóth László**  
*egyetemi tanár*

## BESZÁMOLÓK

## ACCOUNTS

### VIII. RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLÓ KONFERENCIA ÉS KIÁLLÍTÁS, EGERBEN

131 résztvevővel (ebből 21 külföldi) március 20. és 22. között a MAROVISZ immár nyolcadik alkalommal rendezte meg a Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Konferenciát és Kiállítást, folytatva ezzel az 1999-ben elindított és azóta hagyományyá érett szakmai találkozók sorozatát. A rendezvényt ezúttal is Egerben rendeztük, a korábban megszokott konferencia helyszínén, a Hotel Flórában.



....a Hotel Flórában

A rendezvényen - a hagyományoknak megfelelően – részt vettek a MAROVISZ-szal szoros kapcsolatot ápoló külföldi szövetségek képviselői.

A konferencia megnyitó szekciójában került sor a MAROVISZ Díj átadására. A kuratórium a Díjat 2013-ban Dr. Rittinger Jánosnak, a Gépipari Tudományos Egyesület Hegesztési Szakosztály tiszteletbeli elnökének adományozta.

Dr. Rittinger János a Vasipari Kutató Intézetben, az ERŐKAR Rt. állapotellenőrzési igazgatójaként, és az anyagvizsgáló és állapotellenőrző laboratórium vezetőjeként szerzett tapasztalatait széles körben kamatoztatta. Pályafutását gazdag szakirodalmi munkásság jellemzi: 10 könyvrészlet, 130 közlemény, ebből 24 idegen nyelven, publikációi közül 7 részesült irodalmi díjban. Számos nemzetközi és hazai szakmai szervezet tagja és annak vezetőségi közreműködője.

Dr. Rittinger János összetett szakmai tevékenységének részét képezte a roncsolásmentes anyagvizsgálat módszereinek eredményes átültetése az ipari gyakorlatba. Napi tevékenysége volt a műhelyben készült turbinaalkatrészek vizsgálata éppúgy, mint az energetikai berendezések üzem közbeni vizsgálata. Mindkét terület igényelte a

roncsolásmentes vizsgálati módszerek ismeretét, alkalmazását.

A Díjat, méltató, értékelő szavak kíséretében Prof. Dr. Tóth László a kuratórium elnöke adta át.



Prof. Dr. Tóth Lászlónak a MAROVISZ Díj Kuratórium elnökének laudációja

Az előadások általában a konferencia kiemelt témaköreiben hangzottak el:

- Képzés, minősítés, jártasság
- Felületi eltérések, új megoldások
- Ultrahangos vizsgálati módszerek
- Radiográfia
- Örvényáramos vizsgálati megoldások
- Akusztikus emisszió
- Komplex létesítmények vizsgálatai
- Különleges roncsolásmentes vizsgálati módszerek

Elsősorban a külföldiek előadásai, nemzetközi kitekintést is biztosítottak.

Nagy sikert aratott Siklér Ferenc előadása a Higgs bozon felfedezéséről, annak ellenére, hogy ez a téma kívül esik a szokványos anyagvizsgálatokon.

Voltak érdekes előadások az ipari roncsolásmentes vizsgálatokhoz kapcsolódó szakterületekről is:

- a Rutherford visszaszórás és „karrierje” a mikroelektronikában,
- nagyérzékenységű érintésmentes optikai módszer az emberi csontok roncsolásmentes vizsgálatához.
- a radioaktív anyagok fizikai védelme stb.

A járműipari roncsolásmentes vizsgálatokkal, a járműipar roncsolásmentes vizsgálati igényeivel foglalkozó előadások kapcsán kijelenthetjük, hogy az egyre inkább meghatározó jelentőségű hazai járműipar (nem csak az autógyárak!) jelentős mennyiségű és igényes színvonalú roncsolásmentes vizsgálatokkal látja már most el az anyagvizsgálókat. Várjuk ezen a területen a további fejlődést!!

A kívánatosnál kevesebb előadás foglalkozott műszaki diagnosztikával, állapotvizsgálatokkal, komplex vizsgálatokkal és az üzemeltetési biztonságot javító beépített vizsgáló és jelző rendszerek-

kel („folyamatos műszaki diagnosztika”). A konferencia mottója, AZ ANYAGVIZSGÁLAT NEM CÉL, HANEM ESZKÖZ, a vizsgálatok komplexitása esetén érvényesül igazán.

A konferencia feszes programját jó hangulatú baráti vacsora (a Hotel Flórában) és bankett (a Vörös Ökör pincében) oldotta, színesítette.

Ezúton is megköszönjük mindenkinek a megtisztelő részvételt, a Tematikai Bizottságnak a magas színvonalú szakmai programot és minden közreműködő munkáját.



.....a Vörös Ökör pincében

Szalay Károly  
MAROVISZ irodavezető

## BESZÁMOLÓK

## ACCOUNTS

### AZ ANYAGTUDOMÁNY INTEGRÁLÓ FÓRUMA

Az Országos Anyagtudományi Konferenciát dr. Verő Balázs és dr. Zsámbók Dénes hívta életre az egykori Kohászati Anyagvizsgáló Napok utódjaként. Az első ízben 1997 októberében megrendezett esemény mára már az anyagtudomány, az anyagvizsgálat és az anyaginformatika területén dolgozó szakemberek kétévenként megrendezésre kerülő integráló konferenciasorozatává vált.

A kiállítással összekötött, több kurrens szekcióból álló előadássorozat az ipar és a versenyképes technológiák helyzetfelmérését, a várható fejlődési irányok körvonalazását, valamint a résztvevők K+F eredményeinek közzétételét hivatott segíteni a fémekkel és ötvözetekkel, félvezetőkkel, kerámiákkal és szilikáttal, polimerekkel és kompozitokkal foglalkozó szakemberek és kutatócsoportok számára.

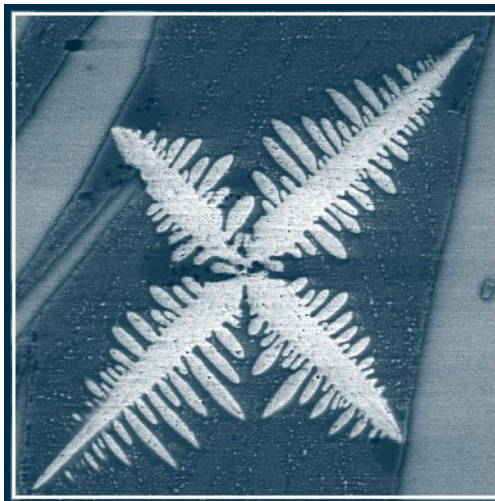
A konferencia témakörei

- Klasszikus anyagok és technológiák
- Speciális anyagok és technológiák
- Korszerű anyagkutatási- és vizsgálati módszerek
- Modellézés és anyaginformatika
- Innovatív termékek és technológiák

Kiállítási standjainkon bemutatkozási, illetve megjelenési lehetőséget kívánunk adni azon cégek számára, amelyek anyagvizsgálattal, anyaginformatikával, laboreszközök és -berendezések gyártásával és forgalmazásával, a témához kapcsolódó folyóiratok, szakkönyvek szerkesztésével és kiadásával foglalkoznak. Célunk, hogy a résztvevők az anyagtudomány minden területét átfogó információhoz jussanak a magyarországi lehetőségekről, kiállítóink pedig bemutathassák termékeiket és tevékenységüket leendő partnereiknek.

Az idén októberben kilencedik alkalommal megrendezésre kerülő konferencián plenáris előadást tart **dr. Bársony István**, az MTA TTK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet igazgatója és **dr. Major Zoltán**, a linzi Johannes Kepler Universitát professzora. Elfogadta felkérésünket a rendezvény hétfő délutáni kerekasztal-beszélgetésének moderálására **dr. Trampus Péter**, a MAROVISZ elnöke is. A kerekasztal-beszélgetés témája: a paksi atomerőmű üzemidő hosszabbításának anyagtudományi vonatkozásai.

Az őszi, balatonkenesei konferenciára minden érdeklődőt szeretettel várunk. A rendezvény programja és további információk a [www.oatk.hu](http://www.oatk.hu) honlapon megtalálhatók.



Kónya Ildikó  
titkár