

ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA

2011/I-II. lapszám

VII. Roncsolásmentes
Anyagvizsgáló
Konferencia és Kiállítás



Eger, 2011. április 12–14.

MAROVISZ



RMV HELYZETKÉP - NDT-REVIEW

CZINEGE Imre, CSIZMAZIA Ferencné, KOZMA István	1
Új lehetőségek a roncsolásmentes vizsgálati technikában New alternatives in non-destructive tests	

VIZSGÁLATTECHNIKA - TEST TECHNICS

BUZA Gábor	11
A roncsolásmentes anyagvizsgálat szerepe a kültéri bronz alkotások retusálásában The role of non-destructive tests in the restoration of open air statues	
AGÁRDY Gyula, LUBLÓY László	21
Roncsolásmentes hídvizsgálati módszerek Methods for non-destructive testing of bridges	
PÓR Gábor, DOBJÁN Tibor, DOSZPOD László	26
Akuszti emissziós vizsgálatok acélok szakítása alatt Acoustic emission study of tensile test on steels	

KÉSZÜLÉKEK, BERENDEZÉSEK

PÁL Csaba	31
Nyúlásmérések és az akusztikus emissziós mérések közötti összefüggés a tartályterhelés folyamatában Relation between strain gauge measuring and acoustic emission results loading tanks	

RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATTECHNIKA - NDT TECHNICS

BALASKÓ Márton, HORVÁTH László, HORVÁTH Ákos, KRISTON Ákos, NEMES Ákos	34
Tüzelőanyag cellák működés közbeni vizsgálata dinamikus neutron radiográfia alkalmazásával Study of fuel tank in service applying the dynamic neutron radiography	
RIESZ Ferenc, MAKAI János Péter, LUKÁCS István Endre	39
MAKYOH-Topográfia: Egy optikai módszer a felületi simaság ellenőrzésére MAKYOH Topography: An optical method for the testing of surface flatness	

ANYAGSZERKEZET-VIZSGÁLAT - INVESTIGATION OF STRUCTURE

LEHOCZKY Judit, FODOR Olivér	45
Gyakorlati tapasztalatok hegesztett kötések eljárás vizsgálatában Practical Experience in Study of Welded Joints	

MINŐSÉGELLENŐRZÉS - QUALITY ASSURANCE

FÜCSÖK Ferenc, HÁMORNIK Balázs	49
Acél hegesztett kötésekről készült radiográfiai filmek értékelésének körvizsgálata - Eredmények és tapasztalatok Results and experiences of round robin test of radiographs about steel welded joints	

HELYZETKÉP

SZÚCS Pál	59
Ipari anyagvizsgáló képesítés, tanúsítás és gyakorlati képzés Industrial materials testing qualification, certification and practical training	

BESZÁMOLÓK

SZALAY Károly	63
VII. Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Konferencia és Kiállítás, Egerben 7th NDT Conference and Exhibition in Eger	
TÓTH László	65
Könyvismertetés: V.T. Troshhenko, G.V. Cübanev, B.A. Grjaznov, Ju.Sz. Nalimov: Fémek kifáradása – A felület állapota és kölcsönhatásai Book review: V.T. Troshhenko, G.V. Cübanev, B.A. Grjaznov, Ju.Sz. Nalimov: Fatigue of metals - Surface condition and interactions	

ÚJ LEHETŐSÉGEK A RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATI TECHNIKÁBAN NEW ALTERNATIVES IN NON-DESTRUCTIVE TESTS

CZINEGE IMRE, CSIZMAZIA FERENCNÉ, KOZMA ISTVÁN

Kulcsszavak: Optikai digitális képalkotás, felületi hibák, számítógépes tomográfia

Keywords: x Optical digital images, surface defects, computer tomography

BEVEZETÉS

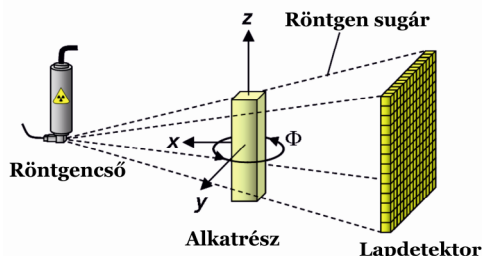
Az optikai digitális képalkotás és képelemzés a roncsolásmentes anyagvizsgálatban egyre gyakrabban alkalmazott technika. Segítségével a mikroszkópos és sztereo mikroszkópos felvételek, endoszkópos képek, repedésvizsgálatokkal kimutatott felületi hibák, felületi topológiai jellemzők, klasszikus ultrahangos és röntgen vizsgálati jelek értékelése automatikusan, szubjektív hibáktól mentesen megoldható.

Ebből a gazdag kínálatból két témakörre fókuszál a jelen publikáció: a három dimenziós képalkotást megvalósító ipari komputer tomográfiára (CT), valamint a felületi topológia térbeli ábrázolására és mérésére alkalmas fénymikroszkópra és konfokális lézer mikroszkópra. Mindkét eljárás közös jellemzője az, hogy valós térbeli képet ad,

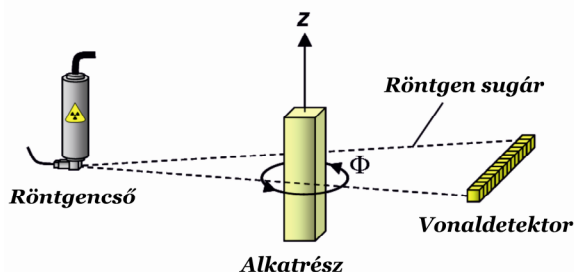
amely kép a korszerű vizualizáló és elemző szoftverekkel sokoldalúan jellemezhető.

AZ IPARI KOMPUTER TOMOGRÁF MŰKÖDÉSI ELVE

A komputer tomográf segítségével összetett külső és belső geometriák ellenőrizhetők nagy pontossággal, a síkbeli röntgen felvételeknél lényegesen gazdagabb információ nyerhető a belső hibákról és a felbontástól függően az anyag szerkezetéről is, mindezt gyorsan és roncsolásmentesen kapja kézhez az anyagvizsgáló szakember. A térfogati anyaghibákat (üregek, zárványok) a kiértékelő rendszer automatikusan detektálja. Ezek a hibák mind a 3D-s geometrián, mind a 2D-s metszeten vizualizálhatók. További előnye a technikának, hogy komplex, több anyagból és alkatrészből álló szerkezetek felépítése, esetleges hibái is ellenőrizhetők, az egyes alkatrészek és azok kapcsolata a szerkezetből kiemelten is megjeleníthető.



a.) Érzékelés lapdetektorral



b.) Érzékelés vonaldetektorral

1.a.) és b.) ábra. CT vizsgálat elrendezése

Az ipari CT az orvosi diagnosztikai eszköz-höz hasonlóan 2D-s röntgen felvétel sorozatot készít a vizsgálandó objektumról úgy, hogy a tárgyasztal és az azon felfekvő alkatrész egy kis szöggel sorozatosan elfordul. Ez addig ismétlődik, amíg az alkatrész teljesen körbe nem ér és ez idő alatt minden egyes szögelfordulás-kor egy röntgenkép készül. A munkadarab el-lentétes oldalán elhelyezett sík vagy vonal de-

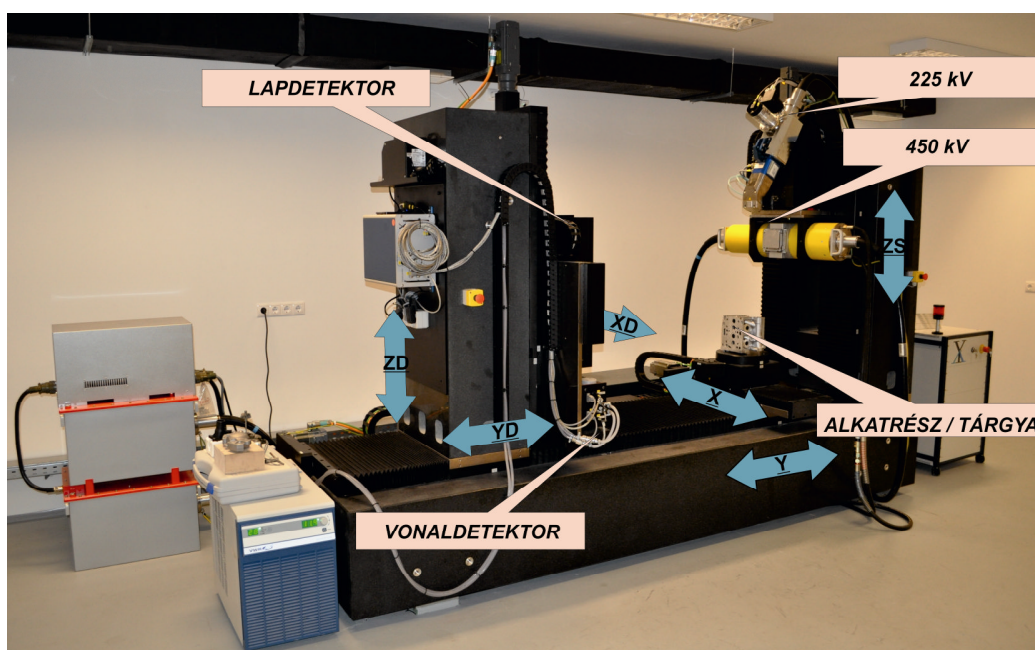
tektor érzékeli az intenzitás változást. Az 1. ábra a vizsgálati elrendezést mutatja. Az a.) ábra hasonlít a klasszikus röntgen technikához azzal a különbséggel, hogy nem egyetlen 2D-s átvilágítás készül az alkatrészből, hanem a tárgy minden egyes kis szögelfordulásakor egy röntgenképet tárol a készülék. A b.) ábrán vonaldetektor érzékeli az intenzitás különbségeket, ennél a vizsgálatnál a röntgensugár és a vonaldetektor együtt mozog függőlegesen, és közelítő-en milliméterenként készül egy szelet a forgó tárgyról. Emiatt a vizsgálat hosszadalmas, például egy hengerfej leképezése több óráig is eltarthat, ugyanakkor az így kapott kép élessége jobb, mint a síkdetektorral felvett képé. Mindkét

Dr. Czinege Imre, Csizmazia Ferencné dr,
Kozma István, Széchenyi István Egyetem
A VII. RAKK-on (2011, Eger) elhangzott előadás
nyomtatott változata

leképezési mód esetében a mért jelek feldolgozását és sokoldalú elemzését hatékony 3D szoftver segíti.

A Széchenyi István Egyetem Anyagismereti és Járműgyártási Tanszékén 2010 júniusa óta üzemel egy YXLON Y.CT Modular ipar CT berendezés. A gép különlegessége, hogy 2 röntgensugár csővel és két detektorral van felszerelve. A kisebb csőfeszültségű (225 kV) mikrofókuszú röntgencsővel akár a 7 µm-es, a nagyobb feszültségű csővel (450 kV) pedig 50 µm-es felbontás érhető el. Az átvilágítható fal-

vastagság acélok esetén 70 mm, alumínium ötvözeteknél 120 mm. A berendezés 7 manipulátorral működő portál rendszerével 800 x 1200-as kubatúrájú alkatrészek vizsgálhatóak. A gép vizsgálati lehetőségei széleskörűek, használható 3D geometriai rekonstrukcióra, inhomogenitás vizsgálatra (porozitás, zárványok, fogyási üregek), falvastagság és egyéb geometriai jellemzők mérésére, Ezen funkciók minőségbiztosítási és kutatási célokra egyaránt alkalmassá teszik.



1.c) ábra. CT vizsgáló berendezés

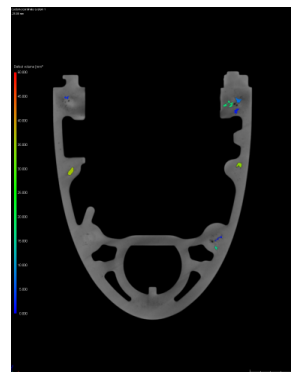
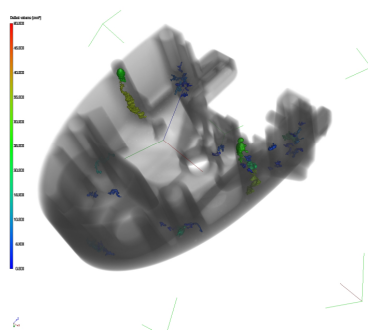
A CT-VIZSGÁLAT ALKALMAZÁSI TERÜLETEI, VIZSGÁLATI TAPASZTALATOK

Az elmúlt időszakban sokféle vizsgálati igényrel jelentkeztek a környező járműipari és egyéb alkatrész beszállító vállalkozások. Jelentős volt az érdeklődés alumínium ötvények belső hibáinak kimutatására és komplex szerkezetek elemzésére. A további példák az itt szerzett tapasztalatokat mutatják be.

ALUMÍNIUM ÖNTVÉNYEK VIZSGÁLATA

FÉKNYEREG KOMPLEX ELLENŐRZÉSE:

A 2. ábrán látható alkatrész térbeli felvétele jól mutatja a belső üregek elhelyezkedését, emellett az értékelő szoftver eltérő színekkel mutatja az automatikusan detektált hibák méretét (választható térfogati és hossz méret is). Egy tetszőleges metszeten is bemutatathatók a hibák, és azokról táblázatos adatok is kérhetők, ahol megjelenik a hiba helye és fő méretei. Mód van egyes pórusok mérésére és ábrázolására is.

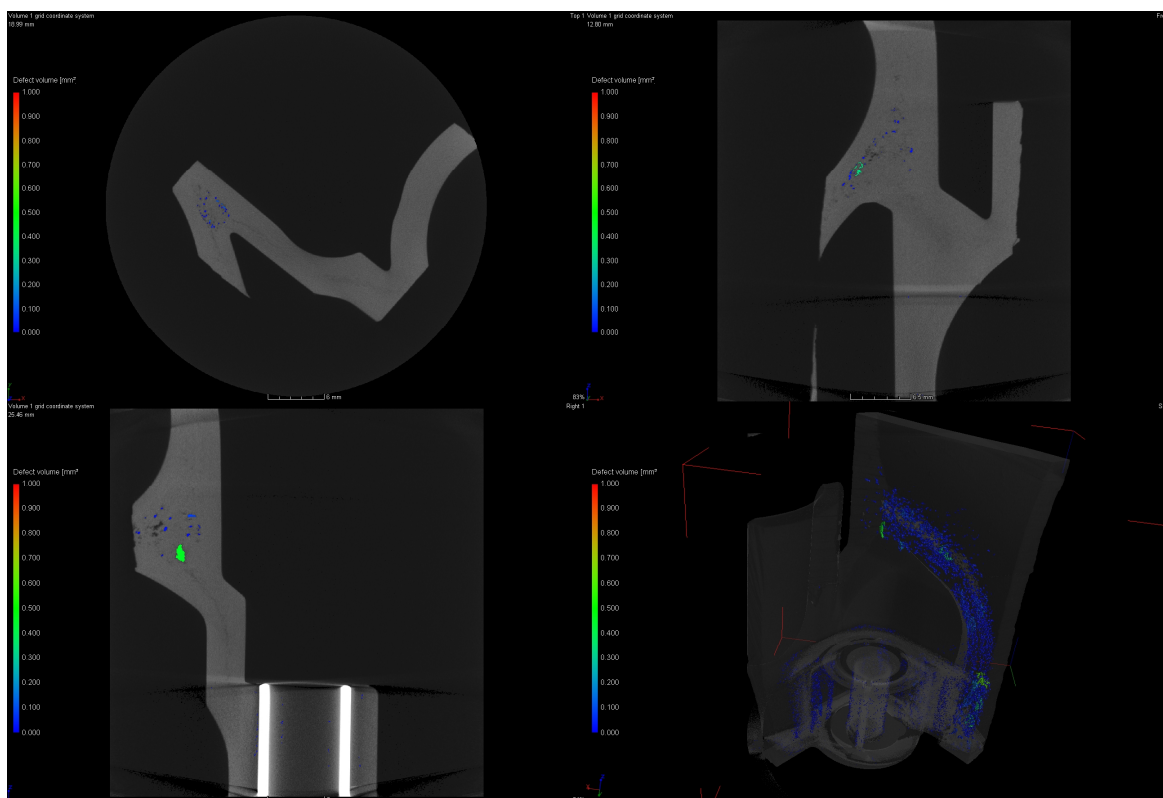


2. ábra. Féknyereg 3D-s és metszeti képe

VÍZPUMPA HÁZ VIZSGÁLATA

E vizsgálat beszállítói minőség-ellenőrzés céljából készült, ugyanis esetenként szivárgás volt

tapasztható a szerkezetben. A különböző metszetekről bemutatott képek jól illusztrálják az észlelt hibákat, amelyekből a szivárgás útjára lehetett következtetni.

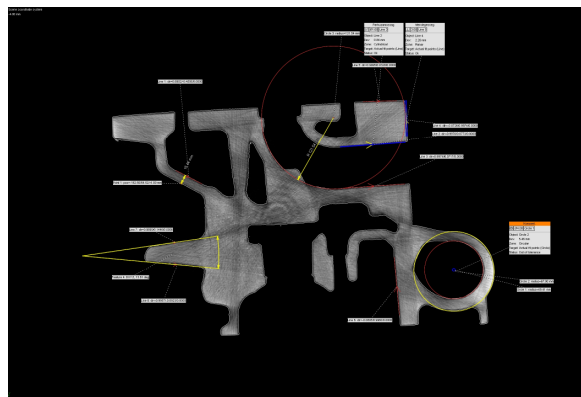
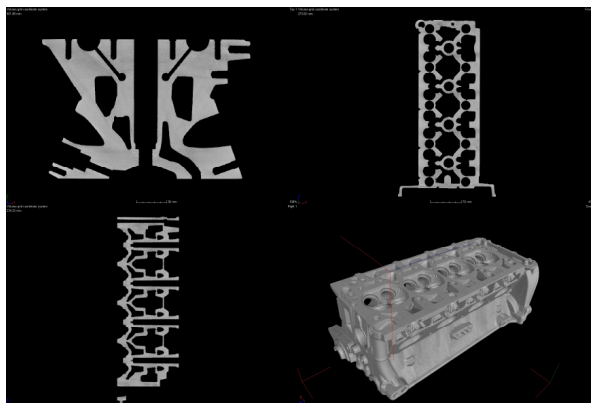


3. ábra. Vízpumpa Al öntvény felvételei

HENGERFEJ GEOMETRIAI MÉRLETEINEK ELLENŐRZÉSE

E vizsgálat célja a széria indításakor kötelező mesterdarab ellenőrzés volt. Korábban a vizsgálatot két részre bontva lehetett elvégezni, a külső geometriai méreteket a GOM digitális optikai

mérőrendszerrel végezte az Egyetem, a belső hibák detektálására pedig klasszikus röntgen felvételek készültek. A CT vizsgálat mindkét vizsgálat elvégzésére alkalmas azzal a többlettel, hogy így módon az öntvény belsejében lévő geometriai méretek is ellenőrizhetők, ahogy a 4. ábra jobb oldali képe mutatja.



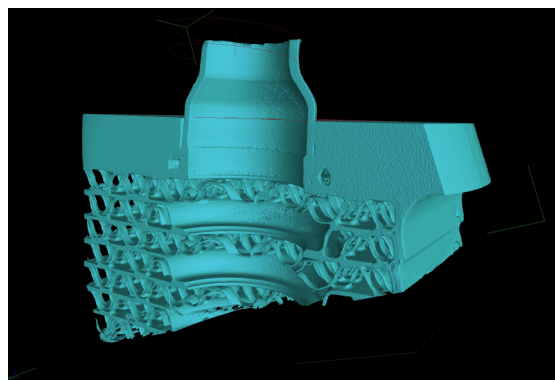
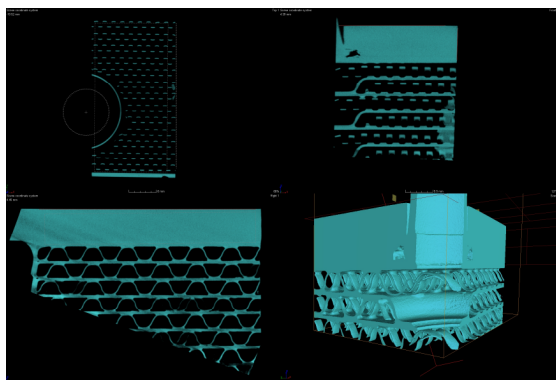
4. ábra. Hengerfej komplex vizsgálata

KOMPLEX SZERKEZETI EGYSÉGEK ELEMZÉSE

SZERELT ÉS FORRASZTOTT OLAJHŰTŐ VIZSGÁLATA

Az 5. ábrán látható olajhűtőt rétegenként szerelik össze, majd speciális forrasztási technológiával egyesítik. A vizsgálat célja az volt, hogy egy ilyen

komplex szerkezeti egységről egyáltalán milyen információk nyerhetők, lehet-e észlelni az esetleges forrasztási hibákat vagy geometriai eltéréseket? A vizsgálatok azt mutatták, hogy a térbeli geometrián sokoldalúan szemléltethetők az egyes részletek, és detektálhatók a kérdéses eltérések.

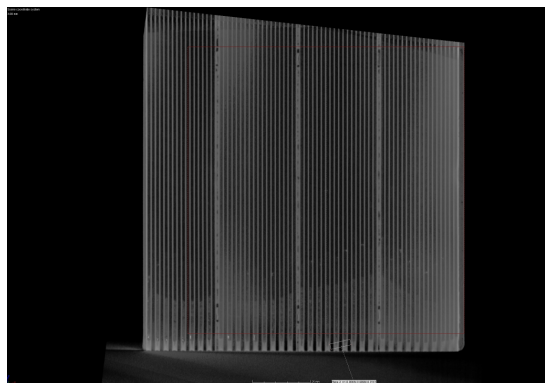
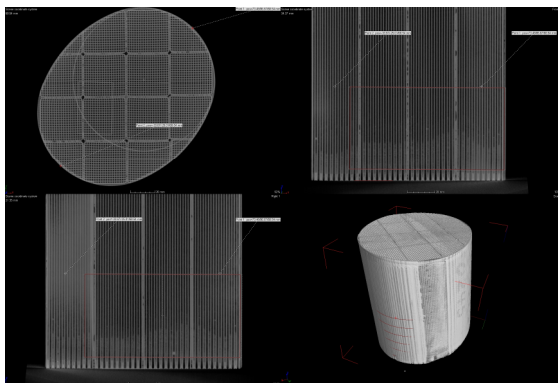


5. ábra. Olajhűtő szerkezeti részletei

KATALIZÁTOR VIZSGÁLATA

Ez a vizsgálat egy hosszabb ideig üzemelő katalizátor lerakódásainak, por szennyeződéseinek detektálására irányult. A megbízó szerint ezeket a változásokat eddig csak roncsolásos úton lehetett

vizsgálni, mert a hagyományos röntgen felvételek nem mutatták ki a változásokat. Az ábra tanúsága szerint a CT-felvételen kitűnően tanulmányozható a katalizátor szerkezete, és a metszeteken jól láthatók a keresett lerakódások.

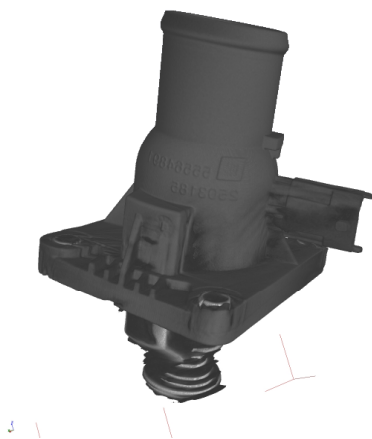


6. ábra. Katalizátorban felgyűlt por detektálása

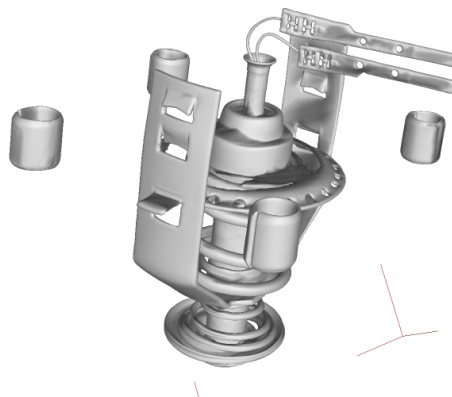
TERMOSZTÁT SZERKEZET FÁRASZTÁSA

A 7. ábrán látható termosztát a jármű motorra felszerelve esetenként hibás jelzéseket továbbított a vezérlés felé. A helytelenül működő egységek vizsgálata a termosztát érzékelő villamos kontaktusának megszakadását mutatta. A magas hőmérsékleten végzett ciklikus rázó vizsgálat közben a villamos érintkezés megszűnését lehetett detektálni, de a termosztát belsejében bekövetkezett vezeték szakadás helyét csak roncsolásos vizsgálattal lehetett megállapítani. A műszer beérkezése

után elvégzett CT-vizsgálattal a hagyományos gondolkodásmódtól teljesen eltérő, új lehetőségek tárultak fel azzal, hogy az összetett, különböző anyagú alkatrészekből álló szerkezet tökéletesen megjeleníthető volt térbeli ábrán, az egyes alkatrészek külön kiemelhetők és elemezhetők voltak. Ezáltal szerkezet fárasztás közben az egyes komponensek elhasználódása az idő függvényében kitűnően tanulmányozhatóvá válik, ha ugyanazt az egységet különböző igénybevételi számok után kiemelve vizsgáljuk, majd tovább fárasztjuk.



Termosztát fényképe



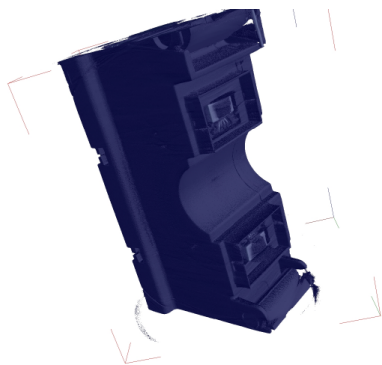
A villamos kötés

7. ábra. Termosztát belső szerkezetének vizsgálata

ÁRAMMÉRŐ SZONDA VIZSGÁLATA

Az árammérő szonda vizsgálati igénye hasonló volt a termosztátéhoz. Itt azt kellett megállapítani,

hogy a tekercs stabilizálása érdekében a tekercs és a ház közé beöntött műgyanta vastagsága, ezáltal a tekercs helyzete megfelelő-e? A 3D felvételek ezeket az eltéréseket jól kimutatták.

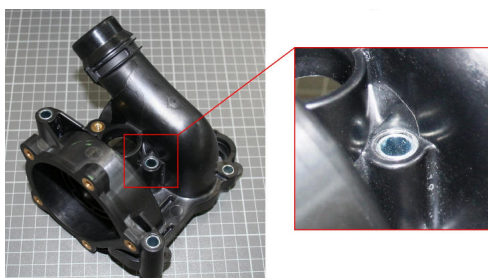


8. ábra. Árammérő szonda képe és a mérőtekerics kiemelése

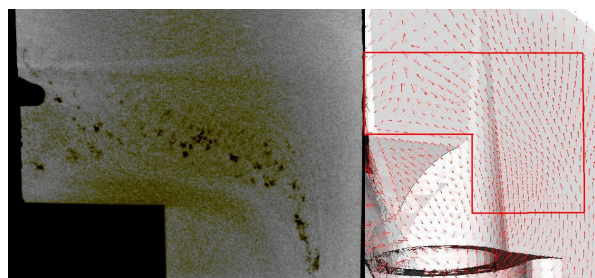
KOMPOZIT VÍZPUMPA HÁZ VIZSGÁLATA

Egyes szállítóktól származó vízpumpa házakon repedés jelent meg, a feladat az ok kiderítése volt. Hipotézisként kínálkozott, hogy az erősítő karbon szálak nem megfelelő eloszlása okozza a hibát. A probléma megoldását két irányból közelítettük:

Moldflow szimulációval elemeztük a szálak várható elrendeződését, CT-felvételekkel pedig a repedés környezetének vizsgálatára került sor. A CT vizsgálat kimutatta, hogy a repedés alatti térben a karbon szálak rendezetlenül helyezkednek el és a fröccsöntés során üregek keletkeztek. A hiba a meglövési pont változtatásával korrigálható.



Vízpumpa fényképe és a repedés



A repedés környezetében megjelenő fogyási üregek és a szimulált kép

9. ábra. Vízpumpa repedés analízise

A CT ÉS HAGYOMÁNYOS RÖNTGEN TECHNIKA ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Mindkét eljárásnak megvannak az előnyei és hátrányai, a vizsgálati cél dönti el, hogy mikor

melyiket célszerű alkalmazni. Az alábbi táblázat mutatja az összehasonlítást:

CT röntgen berendezés

- Teljes 3D képalkotás
- Hiba méret és koordináta
- CAD modell alkotás
- Bármilyen külső v. belső méret megmérhető
- A berendezés ára magas
- A felvétel ideje több óra is lehet
- Csak laboratóriumi vizsgálatra alkalmas

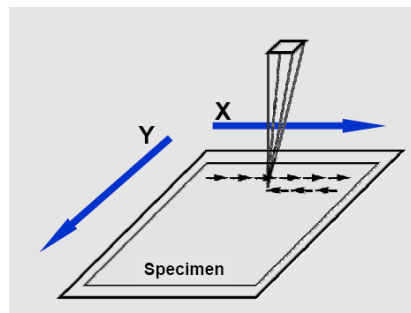
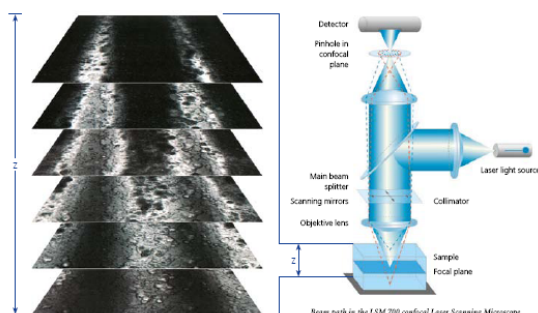
Hagyományos ipari röntgen

- Egy vetítési irányból 2D kép
- Hiba méretek vetületben láthatók
- Csak vetített kép látható
- Méretek korlátozottan láthatók, becslhetők
- A berendezés ára elfogadható
- Gyors felvétel készítés
- Helyszíni vizsgálat terjedelmes szerkezeteken lehetséges

FELÜLET TOPOLOGIAI VIZSGÁLATOK FÉNYMIKROSKÓPPAL ÉS KONFOKÁLIS LÉZER MIKROSKÓPPAL

Optikai mikroszkópos vizsgálatoknál közismert az, hogy egy görbült felületnek egyszerre csak egyes részletei élesek, de a fókusztávolság változtatásával más rétegek is élessé tehetők. Ha tehát a mikroszkóp célszerűen választott lépés távolsággal változtatja a lencse és az objektum közötti távolságot, és az így felvett éles részleteket térbeli képpé egyesíti, akkor olyan felvétel kompozíció jön létre, amelyhez z-irányú méretek rendelkeznek. Ezáltal a hagyományos optikai mikroszkóp az

értékelő szoftver segítségével valós térbeli képet ad a felületről, amelyből nagyon sok információ nyerhető. A magassági eltéréseket a szintvonalakhoz rendelt színekkel lehet megjeleníteni, tetszőleges metszetről profilogram vehető fel, amellyel karcok szélessége és mélysége mérhető meg, és a felület kollektív tulajdonságai, például az átlagos érdesség vagy az érdesség magasság is meghatározható. Ugyanezek a mérési lehetőségek adódnak a konfokális lézer mikroszkóp alkalmazásával is, de az előbbinél lényegesen nagyobb felbontásban. A leképezés elvét a 10. ábra mutatja.



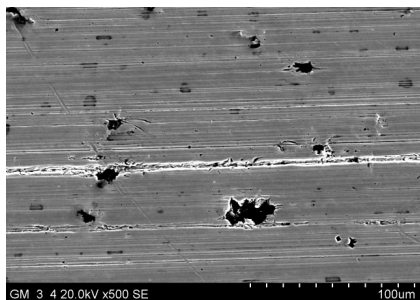
10. ábra. Topológiai felvétel készítésének elve konfokális lézer mikroszkóppal és a felület pásztázásának megoldása.

A bal oldali kép a különböző élességű felvétel sorozatot mutatja, amelyet a képen látható „z” távolság felosztásával állít elő a mikroszkóp. A berajzolt sugármenetek jelzik a különböző fókusztávolságokat. A jobb oldali kép azt mutatja, hogyan pásztázza le a lézersugár a látómezőt. Megjegyzendő, hogy a mikroszkóp asztal x-y irányú mozgásával egy felületről több látómező is felvehető automatikusan, ezek a mozaik képek, amelyekből a szoftver egységes képet hoz létre. A topológiai mérésekre alkalmas mikroszkópok a pásztázó elektronmikroszkóp hasznos kiegészítői lehetnek azzal az előnyös tulajdonságukkal, hogy a szkennelés képek gazdag információ tartalmát a z-irányú mérési lehetőséggel egészítik ki. A továbbiakban a mérési lehetőségek összehasonlítását mutatjuk be.

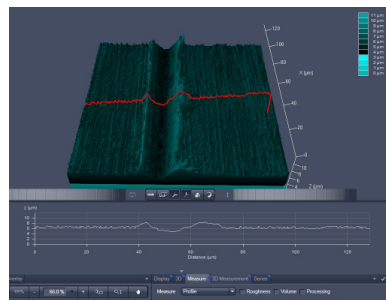
A 11. ábrán látható képek gömbgrafitos öntöttvasból készült főtengety löketcsapjának szuperfiniselt felületét mutatják. A pásztázó elektronmikro-

szkópos képen jól látható egy éles karc, de annak mélységéről nem ad információt a felvétel. A lézer mikroszkópos felvételen jól látható a térbeli képen kijelölt metszősík, az alsó képen pedig a profil magasság változása.

A 12. ábra a hipereutektikus alumínium-szilícium ötvözetből készült motorblokkok felületét mutatja megmunkált állapotban. A felület kezelési technológia lényege az, hogy hónolás után a primer szilícium kristályok körül elhelyezkedő lágyabb eutektikumot mechanikus vagy vegyi kezeléssel mélyítik, ezáltal a futófelületet a nagy keménységű primer szilícium kristallitok alkotják. A bal oldali kép a pásztázó elektronmikroszkópos felvételt mutatja, ahol a Si kristallitok jól azonosíthatók, és síkbeli méreteik is meghatározhatók. A jobb oldali kép ugyanezen felület EDS elemzéssel felvett képét mutatja, ahol szintén jól kiemelkednek a Si kristallitok.

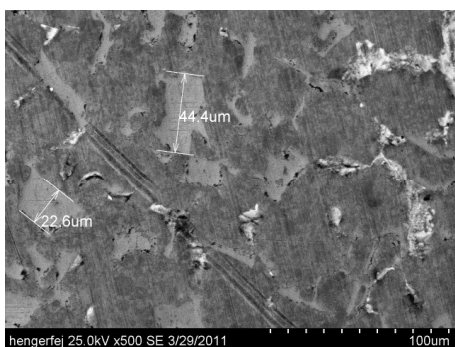


a.) Pásztázó elektronmikroszkóp

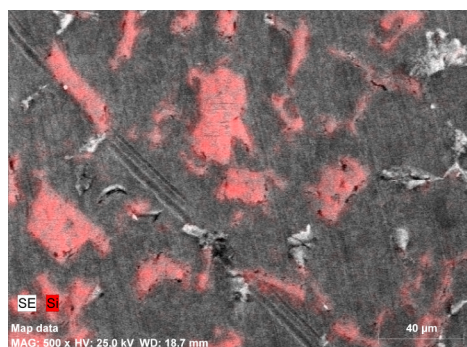


b.) Konfokális lézer mikroszkóppal felvett profilgörbe

11. ábra. Szuperfiniselt felület képei



a.) Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel

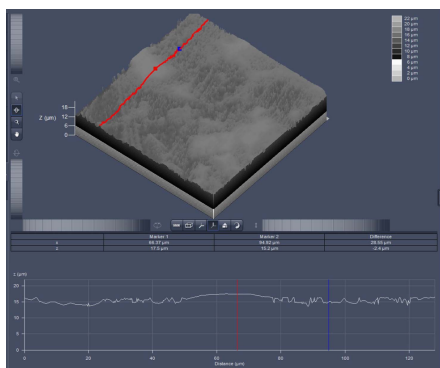


b.) EDS elemzés: Si kristallitok

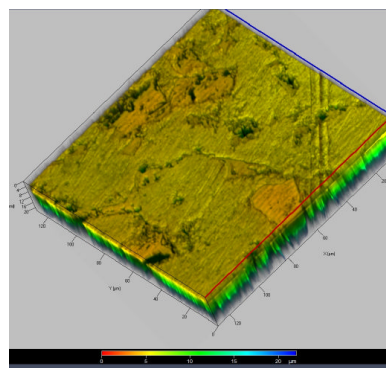
12. ábra. Alumínium blokk futófelületének képe

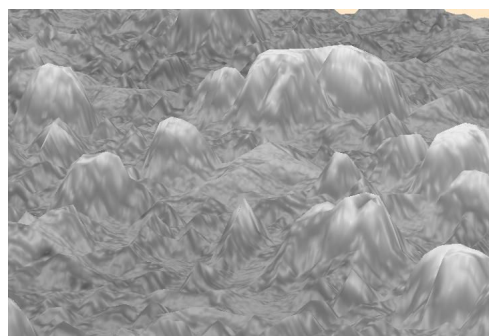
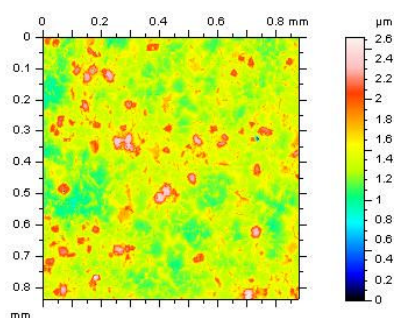
A 13. ábra ugyanennek a felületnek egy másik részletét mutatja konfokális lézer mikroszkópos felvételen. A szilícium kristalliton áthaladó metszősík definiál egy felületi profilgörbét, amelyen tetszőleges pontok jelölhetők ki a magasság irányú méretek jellemzésére. A piros jelölő vonal a Si-kristallit platóját, a kék jelölő vonal az eutektikum mélypontját jelöli. A kettő közötti magasságkülönbség $2,4\ \mu\text{m}$, amely reális érték.

Összehasonlításként megvizsgáltuk a felületet Talisurf CL200 típusú profilmérővel is. A színezett topológiai képet és a letapogatott térbeli alakzatot a 14. ábra mutatja. Látható, hogy a tús letapogatás miatt a felület kissé más képet mutat, mint a konfokális mikroszkópos felvételen, de jellegük hasonló, és a z irányú méretkülönbség is $2,5\ \mu\text{m}$ körüli értékre adódik.



13. ábra. Topológiai felvétel és profilgörbe konfokális lézer mikroszkóppal felvéve

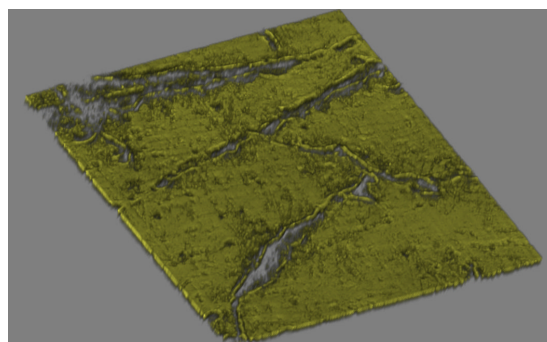
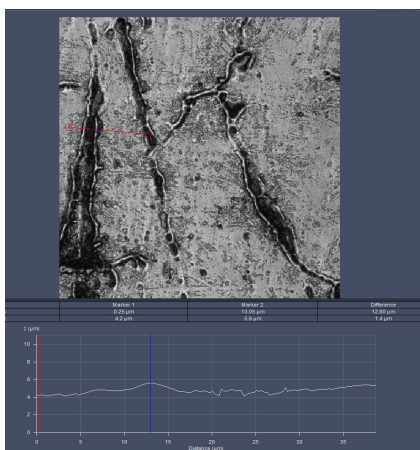




14. ábra. Tűs letapogatású felvétel (lépésköz 0,5 μm)

A bemutatott felvételek egymást megerősítik a topológiai rajzolat és a mért magasságkülönbségek tekintetében. A konfokális lézer mikroszkóp legnagyobb előnye a letapogatással szemben az, hogy lényegesen gyorsabban eredményt ad, és a felületet valósághoz közelebbi módon képezi le, ugyanis a tű geometriájából adódó torzulások nem jelentkeznek.

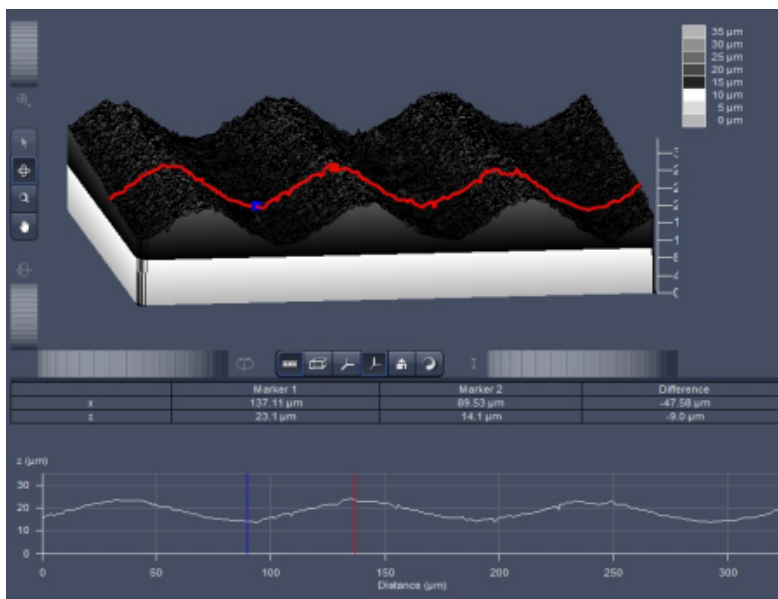
Egy másik érdekes felvétel sort mutat a 15. ábra, amely öntöttvas blokk lézerrel kezelt futófelületéről készült. A grafit lemez legmélyebb pontja és a lemez peremén lévő enyhe dudor magassága közötti különbség 1,4 μm , ez a mérés korábban semmilyen mikroszkópos technikával nem volt elvégezhető. Ugyanezen ábra jobb oldali képe a felület 3D ábrázolását mutatja.



15. ábra. Lézerrel kezelt öntöttvas hengerfelület

A mért értékek hitelességét érdességi etalonon végzett ellenőrzéssel valósítottuk meg. Az $R_z=9$ μm -es etalon csúcsmagassága a méréskor ugyanerre az értékre adódott. Mindezek a vizsgálatok igazolják, hogy a konfokális lézer mikroszkópos felvételek jól kiegészítik a pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokat.

Az összehasonlításból látható, hogy mindkét technikának vannak előnyei és hátrányai, az alkalmazási feladat dönti el, mikor melyiket célszerű alkalmazni.



16. ábra. Érdességi etalon mérése

A hagyományos és topológiai mikroszkópia összehasonlítása

Hagyományos mikroszkóp és pásztázó elektronmikroszkóp

- Hagományos mikroszkóp és pásztázó elektronmikroszkóp
- Az optikai mikroszkóp csak sík felületről ad éles képet
- A SEM felvételek mélységélessége jobb
- Csak 2D mérések végezhetők
- Az optikai mikroszkóp relatíve olcsó, a SEM azonos árban van
- Egyszerűbb felvétel készítés és dokumentálás

Konfokális mikroszkóp (lézer- és fénymikroszkóp)

- Konfokális mikroszkóp (lézer- és fénymikroszkóp)
- Gömbült vagy térbeli alakzatokról éles képet ad
- A mélységélesség 3D ábrázolásban tökéletes
- Z irányú mérések végezhetők
- A konfokális lézer- vagy fénymikroszkópok ára magas
- A leképezés és értékelés bonyolult

ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott példák egyértelműen igazolják, hogy az ipari komputer tomográf a hagyományos radiográfiát messze meghaladó információkat szolgáltat az alkatrészek geometriai méreteiről, belső hibáiról, illetve magáról az elkészült szerkezetéről. Ezzel a roncsolásmentes vizsgálatok hatékonyságát jelentősen növeli. A mikroszkópos felület topológiai vizsgálatok a roncsolásmentes eljárásoknak egy új alkalmazását nyitja meg azzal, hogy számszerű eredményeket szolgáltat a felület térbeli méreteiről, a felületi képződményekről, valamint a kollektív felület topológiai mérőszámokról.

FELHASZNÁLT IRODALOM:

- [1] Effenberge, I.: Computed Tomography for Quality Inspection in Rapid Manufacturing, Yxilon belső publikáció
- [2] Julien Noel, J.: Advantages of CT in 3D Scanning of Industrial Part, North Star Imaging Inc – 3D Scanning Magazine, 2008 december
- [3] Kasperl, S., Hiller, S.J.: Artefaktkorrekturen beim dimensionellen Messen mit Röntgen-Computertomographie – Technische Messen, 2009/9
- [4] ZEISS AG: AxioVision User's Guide
- [5] www.wikipedia.de
- [6] <http://ctsim.org/>

A RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLAT SZEREPE A KÜLTÉRI BRONZ ALKOTÁSOK RESTAURÁLÁSÁBAN THE ROLE OF NON-DESTRUCTIVE TESTS IN THE RESTORATION OF OPEN AIR STATUES

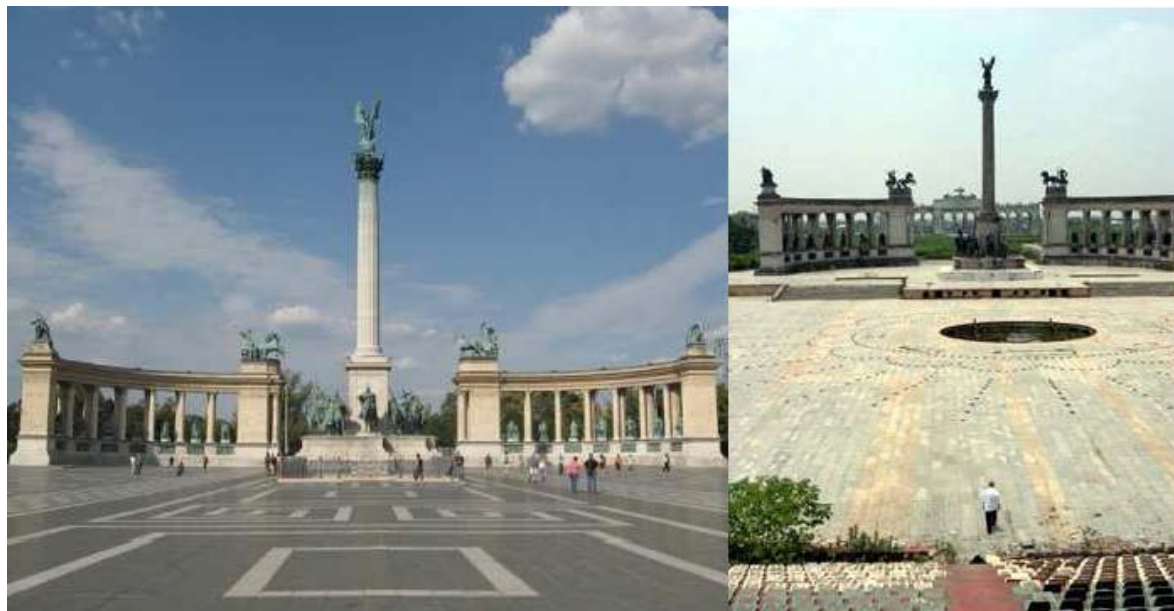
BUZA GÁBOR

Kulcsszavak: restaurálás, kültéri szobrok, roncsolásmentes vizsgálatok

Keywords: restoration, open air statues, non-destructive tests

Egy ország imázsához kötött művészeti alkotás – különösen, ha az egyben emlékmű is – restaurálása anyagtudományi és anyagvizsgálati szempontból különösen érdekes. Ebben az esetben ugyanis találkozunk a történelem, a politika, a gazdaság, a kultúra, a művészet és a technika. A vizsgálatok során nem lehet figyelmen kívül hagyni az alkotás keletkezésének körülményeit, a kor műszaki színvonalát, az alkotók rendelkezésére álló lehetőségeket mind technikai, mind gazdasági értelemben.

Így van ez a budapesti Hősök terén álló Millenniumi emlékművel, vagy a Halászbástya egyik díszével, a Szent István szoborral is. A Millenniumi emlékmű hírét mi sem bizonyítja jobban, mint hogy Sanghaiban a Millenniumi emlékműnek megépítették az eredetivel egyező méretű másolatát a Global Paradise szórakoztató parkban. Az ottani látvány érdekessége, hogy a háttérben nem a Városliget, hanem a berlini Brandenburgi



1. ábra A Millenniumi emlékmű Budapesten és Sanghaiban

Amit ma a budapesti Hősök terén álló Millenniumi emlékműnek nevezünk, az 100 évvel ezelőtt, a millennium évében, 1896-ban még nem létezett [1]. A székesfőváros közgyűlése 1881-ben javasolta az Országgyűlésnek, hogy állítsanak a honfoglalás ezredik évfordulójára emlékművet, amely az utókor számára méltóan örökíti meg a magyarság történeti múltját és a honfoglalást. A képviselőház

illetékes bizottsága csak 1894. februárjában tárgyalta az előterjesztést az akkor „Ezredéves emlékmű”-nek nevezett alkotás megvalósításáról. Az ülésen elnöklő *Wekerle Sándor* miniszterelnök döntése alapján az emlékműnek diadalív jellegűnek kell lenni, az Andrássy út végére kell, hogy kerüljön, és benne Árpád fejedelemnek kell dominálnia.

Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézet

A VII. RAKK-on (2011, Eger) elhangzott előadás nyomtaottváltozata

1894-ben az ennek megfelelő terv elkészítésével, valamint az „Ezredéves emlékmű” megalkotásával *Schickedanz Albert* építőművészt és *Zala György* szobrászművészt bízták meg. A munkákra 800 ezer forintot irányoztak elő. A terv az volt, hogy az emlékmű építészeti munkái – minthogy az

emlékmű helyére a millenniumi kiállítás főkapuja kerül – csak a következő év végén kezdődnek meg. Akkor úgy gondolták, hogy a mű elkészítésére 5 év elegendő lesz. Az emlékmű munkálatai 1896-ban valóban megkezdődtek, és kezdetben rendkívül serényen folytak.

A végleges tervben szereplő emlékmű háttérben két kolonnád áll, melyek felső részét bronzból öntött jelképes szoborcsoportok díszítik. A bal oldali hemicikluson a „háború” vágató harci szekere, valamint a „munka és jólét” kettős szobra, a jobb oldalin pedig a „béke” nyugodtan lépkedő kocsija, valamint a „tudás és dicsőség” allegorikus alkotása áll. A két félből álló oszlopcsarnokban 14 király szobra helyezkedett el, alattuk egy-egy dombormű, amely a király uralkodásának idejéből vett legjelentősebb mozzanatot örökíti meg.

Az emlékmű központi helyén, kőtalapzaton 36 m magas oszlop áll. Az oszlopfő bronzkítésű, amelyen nagyméretű bronzgömb áll, s ezen Gábor arkangyal alakja. Bal kezében az apostoli kettős keresztet, jobb kezében a Szent Koronát tartja. (Utalás II. Szilveszter pápa látomására, mely szerint a már korábban elkészült, de eredetileg másnak szánt(?) királyi koronát mégis a magyar István királynak adja.) Az arkangyalt hordozó oszlop körül sorakozik az emlékmű fő csoportja: Árpád fejedelem és a hat vezér lovas szobra.

1897. júniusában elkészült Gábor arkangyal csaknem 5 m magas szobrának mintája. A háromszoros életnagyságú szobrot *Beschomer A. M.* ésfia műércöntők öntödében öntötték Budapesten, a Váci út 175. alatt. (Az öntöde korábban a bécsi *Tourbain Károly* szoboröntő cég budapesti leányvállalatának tulajdonában volt.) Ez a szobor az 1900. évi párizsi kiállításon grand prix-t kapott. A többi szobor *Raffaello Vignali* olasz öntőmester öntészeti munkája. Ezek szintén Budapesten készültek.

Annak ellenére, hogy Zala György csak Mátyás király, Mária Terézia, I. Ferenc József és Nagy Lajos alakjait mintázta, a többiét más művészekre bízta, mégsem készült el 5 év alatt az emlékmű. Az építkezés megkezdése után öt évvel, 1901. októberében még csak Gábor arkangyal szobrát emelhették az oszlopfő tetejére. 1905. nyarán még hiányzott a 14 királyszobor, a hét vezér lovas szobra, és az oszlopsor tetejére tervezett bigák is. 1915-ig még mindig 5 dombormű és a 6 vezér szobra hiányzott az emlékműből. Jól ismert okok miatt 1915. és 1926. között ezek közül egyet sem készítettek el.

Az I. világháború után, 1919-ben I. Ferdinánd, III. Károly, Mária Terézia és II. Lipót szobraikat ráadásul eltávolították, sőt I. Ferenc József szobrát

össze is törték, úgyhogy azt Zala teljesen újra mintázta. (A régi tábornoki egyenruha helyett koronázási díszöltözékben ábrázolta az uralkodót.) Az I. világháború kezdete óta hiányzó bronzalkotások végül 1926-1929. között készültek el. ('26ban az 5 dombormű, '27-ben Nagy Lajos szobra, '28-ban Előd, Ond, Kond, Tas szobra, '29-ben pedig Hubáé és Töhötömé). Az ezredéves emléket az előtte elhelyezett Nemzeti Hősök Országos Emlékövével együtt 1929. május 26-án avatták fel. Ez alkalomból Zala Györgynek a kormányzó a „másodosztályú magyar érdemkeresztet csillaggal” adományozta (Schickedanz Albert 1915-ben elhunyt). A tér 1932-ben kapta a Hősök tere nevet.

A MILLENNIUMI EMLÉKMŰ TÖRTÉNETE

A 41 bronzalkotást magában foglaló Millenniumi emlékmű építése tehát a tervezett 5 helyett több mint 30 esztendeig tartott. Az alkotások többsége felállításukat követően szemtanúja lehetett az évtizedek politikai és társadalmi viharainak. A jobb oldali hemiciklusnak azonban igazán hányatott sors jutott. Eredeti „lakói” a két Hunyadi, János és Mátyás, valamint az 5 Habsburg-házi uralkodó, I. Ferdinánd, III. Károly, Mária Terézia, II. Lipót és I. Ferenc József voltak. Az emlékmű építését még be sem fejezték, felavatására még sor sem került, amikor 1919-ben történelmi események szemtanúi és elszenvedői lettek. Az 5 Habsburg szobrát eltávolították helyéről, I. Ferenc Józsefét pedig darabokra törték. A 1929-es avatáskor már ez a szobor állt a régi helyén. 1945-ben bombatalálat következtében szintén a Műcsarnok felőli, jobb oldali hemiciklus szenvedte a legnagyobb károsodást. Mária Terézia és II. Lipót szobra darabokra tört, megsemmisült.

1945. után a történelmi szemléletváltozás azonban nem kegyelmezett a másik három, alig károsodott Habsburg uralkodó szobrának sem, noha akkor még fellelhető volt valamennyi szobor gipszmintája is. 1955-ben a Köröndről hozták át Bocskai István és Bethlen Gábor szobrát. A gyors szoboráthelyezés egy szerencsés egybeesésnek is köszönhető: ez a két szobor azonos léptékben (1:1,25) készült a királyokat ábrázoló többi szoborral. Az üresen maradt három helyre új szobrok készültek, melyek Thököly Imrét, II. Rákóczi Ferencet, valamint Kossuth Lajost ábrázolják. Ennek következtében a „királygaléria” kifejezés ma már nem is tekinthető korrekt elnevezésnek. Az emlékműbe került új szobrok *Grantner Jenő* és *Kisfaludi Strobl Zsigmond* alkotásai. Az elmúlt 40 évben további szoborcserére, változásokra nem került sor.

Ha eltekintünk a negyvenes évek végén, az akkori politikusok által megfogalmazott lebontási ötlettől, ezek után az emlékmű csak Budapest

ostromakor került veszélybe. A jobb oldali hemiciklus kivételével a szerkezet nem károsodott, de kisebb-nagyobb felületi sérülések tömegével jelentkeztek az építményen és a szobrokon egyaránt. Ezeket a háborút követően szinte azonnal kijavították. A javításokra akkor csak a helyszínen adódott lehetőség.

Az 1972-ben készült, főként szemrevételezésen alapuló szakvélemények hatására jelentősebb, a királygalériát érintő, összehangolt felújítást hajtottak végre. A kőanyag részleges cseréjén és betétezésén túl a két biga felújítására is sor került. 1972-ben mind a kettőt leemelték, és az Art Plast Képzőművészeti Kivitelező Vállalat ötévi munkával újította fel. A felújítást végző szakemberek elbeszélése szerint a szobrokat megnyitották, tartóvasakat cseréltek bennük, illetve egyes elemeit újraöntötték (a „Háború” bigájáról letört kigyót sikerült a MÉH telepről visszaszerezni).

A „HÉT VEZÉR” SZOBORCSOPORT

A Budapest Galériának, a Fővárosi Emlékmű-felügyelőség jogutódjának egyik feladata a főváros köztéri képzőművészeti alkotásainak gondozása. Munkatársai a kilencvenes évek elején szemrevételezéssel egyre súlyosabb károsodásokat fedeztek fel a vezérek szobrain. Ezért döntöttek a részletes, többek között a kőépítményre is kiterjedő diagnosztikai vizsgálatok mellett [6].

Jó időben történt ez, az európai tudományos és kulturális együttműködések kézzelfogható erősödésének időszakában. Így ugyanis az EU316 EURO CARE COPAL nevű EUREKA program keretében együttműködés és megállapodás született a Bécsi Iparművészeti Főiskola Szilikátkémiai és Archeometriai Intézetével, a lovas szobrok anyagának és patinaszerkezetének vizsgálatára. A vizsgálatokat részben a bécsi laboratóriumokban, részben a berlini Rathgen Kutatólaboratóriumban végezték. A Budapest Galéria ezzel párhuzamosan tágabb diagnosztikai feladatkörrel bízta meg a Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézetet (Bayati). A szobrok anyagának és patinaszerkezetének vizsgálatán túl a szobrok statikai stabilitását befolyásoló elváltozások felderítése, a szobrok javítási szükségességének és lehetőségeinek becslése, az alkalmas technológiák kiválasztása stb. volt a feladat.

A több mint egy évig tartó előkészítő munka eredményei alapján, a szobrok gondozásával megbízottak, a főváros képviselőivel egyetértésben úgy döntöttek, hogy a hét vezér szobrát sürgősen fel kell újítani. A felújítási munkák jellegükből adódóan nem voltak helyszínen végezhetőek. Ezért 1995. március második felében mind a hét szobrot elszállították a Szobor és Színesfém Kivitelező Kft.

telephelyére, ahol a munkákat felkészült szakemberek végezték (a munkával 1996. március közepére készültek el).

A restaurátoroknak és a kivitelezőknek szobrok felújításának és restaurálásának munkafolyamatában is segítséget nyújtott a Bayati. Ennek során alapvetően a konkrét károsodási hely környezetében az anyag és az alkalmazható technológia kiválasztása volt a fő feladat, de a felújítási folyamat egyes lépéseinek figyelemmel kísérése is a Bayati feladata volt.

Gábor arkangyal szobrának szemrevételezése alapján elegendőnek bizonyult a helyszínen végrehajtható tisztítás, illetve felületvédelem. Ennek során a Szent Koronát és az apostoli kereszt felső részét újraaranyozták, illetve pótolták az apróbb hiányzó részeket (pl.: a koronáról lelógó kilenc láncot). Felújították a villámhárító rendszert, és a szobor savmentes viaszos felületvédő bevonatot kapott.

A SZOBROK VIZSGÁLATÁNAK NÉHÁNY EREDMÉNYE

A szobrok Bayati által folytatott átfogó vizsgálata két nagyobb részből állt: a helyszíni és a laboratóriumi munkákból. Ezek egyrészt mintavételezéses laboratóriumi, másrészt roncsolásmentes helyszíni vizsgálatokból álltak.

A helyszíni vizsgálatok sorában a szemrevételezés eredménye volt a legmegdöbbentőbb. A szobrokon már messziről is jól látható foltozások voltak. A többnyire szögletes alakú foltok színe és ahogyan az már akkor is sejthető volt, anyaga eltért az öntvényétől, a folt közvetlen környezetétől. Ennek hatása nem csak látványzavaró, hanem nyilván korróziós szempontból is kedvezőtlen. A korábbi, kampányszerű foltozások javítások során néhány lyuk itt is, ott is kimaradt. A lyukak általában nem befolyásolnák jelentősen a szobrok állapotát, ettől még nem omlának össze.

A hét szobor esetében nem lehetett az „általában” megállapításra hagyatkozni. A lyukak egy részén keresztül ugyanis jelentős mennyiségű víz jutott a szobrok belsejébe, ahol az, hosszú ideig pangó állapotban maradt. Figyelembe véve a savas esők és a kipufogógázok ismert hatását, nem szükséges hosszasan ecsetelni ennek káros következményeit. Az általános és napi rendszerességű pára kondenzáció már csak a folyamatos utánpótlást eredményezte. Ezek együttes következménye, hogy többnapos teljesen száraz, napsütéses időszak után is szivárgó nedvességet lehetett látni a szobrok felszínén. A nedvesség kisebb része a lovak hasánál, az öntvénydarabok összeillesztési vonala mentén szivárgott ki.

Elszomorítóbb volt azonban a lovak lábának látványa (2. ábra). Nem volt olyan szobor, amelynek mind a négy lólába ép lett volna. A jellemző az volt, hogy mind a négy lóláb repedt. A repedések többségéből diszkréten szivárgott a fémionoktól erősen elszíneződött nedvesség. A szemrevételezéskor még elképzelni is alig lehetett, hogy mi tudja a szobrokat álló helyzetben tartani. A szobrász keze nyomán a szél lágy fuvaltatától lengedező lófarkak csaknem valódi lengedezésbe kezdtek, hiszen többen mindegyik repedt volt. Ez annál inkább kritikus jelenség, mivel a helyszínen észlelt nyomok szerint a szobrokat rendszeresen mászókának használták. Volt olyan szoborrészlet is, amin egyértelműen látszott, hogy a letörés határán van. Az egyéb helyszíni vizsgálatok (radiográfiás, ultrahangos, endoszkópos, füstjelzős és mágneses vizsgálat) eredményei, illetve a vizsgálati tapasztalatok alapján megerősödött a korábbi feltételezés: műszaki szempontból minden szobor egyedi jelenségeként kezelendő. Sem szerkezeti felépítésük, sem állapotuk, sem a korábban végzett javítások szakszerűsége, eredményessége szempontjából nem lehetett azokat tipizálni, egységesen kezelni.

A szobrok belsejében összetételét tekintve is különböző, többnyire nedvességet tartó nemfemes

anyag volt. Főleg a lovak lábában (kb. combközépig), de gyakran a lovak nyeregtakarójában, esetleg fejében, általában a mélyebben tagolt öntvényrészekben, ahonnan nehéz a maghomokot eltávolítani.



2. ábra A ló lába körberekedett



3. ábra Kond lovának jobbhátsó lába

Ez korróziós szempontból kifejezetten hátrányos körülmény, különösen, ha figyelembe vesszük, hogy a lovak lábában acél merevítő rudak voltak. Szerencse, hogy az öntvények átlagos falvastagsága még, mindig több mint 6 mm, így a károsodások „könnyen” javíthatók. Azt is látni

kellett azonban, hogy a szobrok javításának elhúzódnása esetén a korróziós folyamatok sebessége valószínűleg eltérően alakult volna. Nehezen volt becsülhető, mi következik be korábban: a) a tartó funkciójú (főleg acél) elemek károsodása miatt szoborrészletek vagy komplett szobrok rognak

meg, vagy b) a bronzöntvények oxigéndús savas közegben zajló lokális korróziója általánossá válik, egyre több helyen vékonyodik el oly mértékben, hogy javításuk illuzórikussá válik. Legvalószínűbb, hogy a két károsodás együttes következményeivel kellett volna számolni.

Laboratóriumokban a helyszínen vett minták (mintánként 1-2 mm³) vegyi összetételének meghatározásával, a korróziós termékek kristályos fázisainak röntgendiffrakciós és mikroszkópos vizsgálata volt a cél. A vizsgálati eredmények szerint a szobrok anyaga a vörös-ötvözet néven ismert rézötvözet családba sorolható. Szabvány szerinti megjelölésüknek nincs nagy jelentősége, hiszen abban a korban ezekre az ötvözetekre Magyarországon nem volt érvényes szabvány. A METALCONTROL Kft-ben atomabszorpciós módszerrel (3410 ICP típusú ARL Spektrométer) végzett elemzések szerint a szobrok anyagának vegyi összetétele nem csak szobronként, de ötvénydarabonként is jelentősen különbözik.

Érdeemes a Millenniumi emlékmű és a Halászbástya álló Szent István emlékmű bronz anyagának összetételét összehasonlítani. A Hősök terén lévő alkotásokban az antimon tartalom ~0,3%, a Szent István szoborban csak ~0,03%. Az uralkodók szobrai között azonban Károly Róberté külön figyelemre méltó. Annak cink és ólom tartalma rendkívül kicsi (Zn: 0,09%, Pb: 0,11%), ón tartalma viszont kiemelkedően nagy (Sn: 7,8%). A többi uralkodó szobrának és a domborművek anyaga egyébként nagyon hasonlít a Hét vezér szobrainak anyagához.

Károly Róbert szobrát 1905-ben öntötték, amikor Szent Istvánét. Szent István szobra az akkori értelemben tiszta önbronzból készült, kb. 8% óntartalommal. Tudjuk, hogy az öntési technológia következtében, a szobordarabok öntése során akár 30-40% visszajáró hulladék is képződik a beömlő rendszer, felöntések stb. miatt. Elképzelhető, hogy Szent István szobra után öntötték Károly Róbertét, amihez a korábbi (Szent István) öntés visszajáró hulladékát használták, ami egyébként „nemesebb” ötvözet, amit ágyúbronznak is neveznek. Lehetséges, hogy Szent István szobrának megrendelésekor a szobor anyagaként kikötötték az ágyúbronzot, az Árpád emlékmű esetében csak a bronzot. Így lett Károly Róbert szobrának anyaga is ágyúbronz.

Nagyon tanulságos volt a röntgendiffrakciós vizsgálatok eredménye is. A szobrokról vett korróziós mintákat öt csoportba lehetett sorolni. A könnyebb áttekinthetőség érdekében érdemes az eredményeket táblázatban áttekinteni.

A Hét vezér szoborcsoport	Cu [%]	Sn [%]	Pb [%]	Zn [%]
Minimum	78,71	4,92	3,67	2,08
Maximum	87,7	8,93	5,94	8,32
A kolonnád	Cu	Sn	Pb	Zn
Minimum	81,1	3,81	0,11	0,09
Maximum	91,9	7,8	4,51	10,15
Szent István	Cu%	Sn%	Pb%	Zn%
Minimum	90.61	7.96	0.12	0.085
Maximum	91.59	9.03	0.14	0.11
Szent István	Cu%	Sn%	Pb%	Zn%
Minimum	90.61	7.96	0.12	0.085
Maximum	91.59	9.03	0.14	0.11

1. táblázat A Millenniumi emlékmű és a Halászbástya álló Szent István emlékmű bronz anyagának összetétele

A 2. táblázatban szereplő adatok könnyen magyarázhatóak a bronz korróziójával kapcsolatban ismert lenségekkal. Jellemző a savas, nagy SO₂-4-ionkoncentrációjú közegben képződő termékek, az antlerit és a kalkantit jelenléte. Azokon a helyeken, ahol a szobor felületét nem mossa eső, és nehezen szárad, ott vastagabb, laza korróziós termék tudott kialakulni. Természetesen a vastag korróziós rétegnek a szobor felőli része szárad meg legutoljára és a savas eső beszáradása során ott alakul ki a legnagyobb savkoncentráció.

Az anglezit 10%-nál kisebb mennyisége megfelel a bronz összetétele alapján várható értéknek. Azokban a mintákban, amelyekben jelenléte nem volt kimutatható, vagy lemosta az eső, vagy a rézvegyületeknél kisebb mobilitása következtében nem jutott el a vastag korróziós termék felszínére.

A foltozások és illesztések korróziós termékei jellemzően több anglezitet tartalmaznak, mint a szoboranyagé (3. táblázat). Ez abból fakad, hogy a foltok a szokásosnál lényegesen nagyobb ólomtartalmúak, illetve, hogy az illesztési vonalak esetenként fémólmossal vannak eldolgozva. Egy esetben olyan illesztési vonalat is lehetett találni, amelyben 80% grafit volt a réz és az ólom korróziós termékei mellett. Ez többféleképpen is kialakulhatott. Vagy bronzport keverték a grafitos masszába (pl. a kívánt színhatás elérésére), amelynek korróziós termékei helyben maradtak, vagy a megszáradt grafitos töltőanyagra máshonnan folyt rá a szobor korróziós terméke.

A korróziós termékek további jellegzetessége az átlagosnál nagyobb brochantit tartalom, ami a kevésbé savas közegre utal. Ez kétféleképpen is magyarázható. Egyrészt az átlagostól eltérő ötvözet összetétellel, másrészt azzal, hogy ezeken a helyeken a többiekhez képest lényegesen vékonyabb a korróziós réteg, tehát a savas eső nem itt

töményedik be száradása során. Ezek a szoborrészek nem „áznak” a betöményedett savas közegben. Ezeknek a helyeknek az átlagoshoz képest

esetenként kedvezőbb korróziós viszonyait jellemzi a szokásosnál nagyobb mennyiségű kuprit jelenléte is.

A mintavétel helye	Antl [%]	Angl [%]	Gyps [%]	Quar [%]	Chlc [%]
Árnyékos hely, közel függőleges felület (Tas nyeregtakarója, külső felület)	70	5	20	5	
Árnyékos hely, közel függőleges felület (Tas lovának oldala, külső felület)	60	10	10	3	
Árnyékos, fölülről takart, védett hely; vastag, laza korróziós termék (Tas nyeregtakarója)			95	2	2
Teljes takarásban lévő, nyirkos, árnyékos hely; vastag korróziós termék levegő felőli rétege (Tas nyeregtakarójának belső oldala)	70	10	5	2	10
Teljes takarásban lévő, nyirkos, árnyékos hely; vastag korróziós termék szobor felőli rétege (Tas nyeregtakarójának belső oldala)	20				70

2. táblázat A szobrok felületének korróziós termékei

(Antl: antlerit, $\text{Cu}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_4$; Angl: anglezit, PbSO_4 ; Gyps: gipsz, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Quar: kvarc, SiO_2 ; Chlc: kalkantit, ill. rézgálic, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$;))

A mintavétel helye	Antl [%]	Angl [%]	Quar [%]	Lead [%]	Broc [%]	Grph [%]	Cupr [%]	Chlc [%]
Tarka folt (Tas lovának sörénye)	25	20	3	20	25			3
Öntvény illesztési vonal (Tas, köpeny és nyeregtakaró találkozás)		40		60				
Öntvény illesztési vonal (Tas lábának és a ló testének találkozás)	5	10			5	80		
Átlagos kinézetű foltról származó minta (Tas lovának lába)	20	10	5		50		15	
Kilazult foltról származó minta (Tas lovának lába)		30			40		30	
Folt, Tas lovának nyeregtakaróján	25	30			40		5	

3. táblázat Foltozások, javítások, öntvény illesztési vonalak korróziós termékei (Antl: antlerit, $\text{Cu}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_4$; Angl: anglezit, PbSO_4 ; Quar: kvarc, SiO_2 ; Lead: ólom, Pb ; Broc: brochantit, $\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$; Grph: grafit, C ; Cupr: kuprit, Cu_2O ; Chlc: kalkantit, ill. rézgálic, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

A szobrok külső felszínén több helyen látszott a jellegzetes vörösesbarna szín, jelölve annak, hogy ott, a bronz korróziós termékein kívül a vas korróziós termékei is előfordulnak (4. táblázat). E helyek egyik része a formázási gyakorlatban alkalmazott homokszög végének megfelelő méretű és kiterjedésű, másik része a 15-25 mm átmérőjű csapok (a szobordarabok összeszerelésekor használt huzatószegek) vége. Jellemző korróziós termék a goethit, a maghemit és a lepidokrokrit. A kvarc a szállóporral kerül a korróziós termékek közé. A fémréz jelenlétének két magyarázata is lehet. Vagy

a mintavétel során a lyuk széléről kapart korróziós termék közé kevés bronz is került, vagy elektrokémiai úton a rézvegyületekből fémréz cementálódott a „vasra”.

Megjegyzendő, hogy korróziós termék képződésére az acél-bronz érintkezési helyek a legkedvezőtlenebbek, itt a legnagyobb a korrózió sebessége. A vas elektrokémiai szempontból kevésbé nemes anyag lévén, a réznél gyorsabban korrodál (általában ezért mennek gyorsan tönkre a tartó, rögzítő szerepet játszó acélelemek). A szobrok esetén azonban a szivacsos rozsdában megtapa-

dó nedvességben még oldott rézionok is vannak, amelyek az ismert folyamat során kicementálódnak az elemi vas felületén. Ez a kicementálódott réz laza szerkezetű, nem védi meg az acélt a további korróziótól. A cementálódás során az oldatban

csökken a rézionok koncentrációja, így újabb és újabb rézionok beoldódását teszik lehetővé. Nagyon leegyszerűsítve a folyamatot úgy is mondhatjuk, hogy nedves közegben és oxigén jelenlétében az acél és a bronz „megeszi egymást”.



4. ábra Szemmel láthatóan vas korróziós termékek (huzató szegek végei a szobor felületén)

A mintavétel helye	Quar [%]	Goet [%]	Cu [%]	Magh [%]	Lepi [%]
Tas lábszárán lévő mélyedésből vett minta	5	90	5		
Tétény lovának combján lévő mélyedésből vett minta		95		5	
Előd nyeregtakaróján lévő mélyedésből vett minta		85		5	10

4. táblázat A szobrok láthatóan vastartalmú korróziós termékei (Quar: kvarc, SiO_2 ; Goet: götit, $\text{FeO}(\text{OH})$; Cu: réz; Magh: maghemit, Fe_3O_4 ; Lepi: lepidokrokit, $\text{FeO}(\text{OH})$)

A szobrokon egy-egy helyen 1 cm-nél vastagabb korróziós termék is található volt (5. táblázat). Ezek színe a szürkésfehértől a szürkésrózsaszínig terjed. Jellemzően a gazdag vízutánpótlású helyeken alakultak ki.

A szobor állékonysága szempontjából egy kevésbé aggasztó jelenség a Kond nyeregtakaróján képződött „kinövés”. Itt ugyanis „csak” arról van szó, hogy a nyeregtakaróban összegyűlt folyadékban oldódott a szobor anyaga, ami a takaró egyik alsó részén utat talált magának, és lassan szivárgott a szabad, szél fújta oldalra. A szállóporral érintkezve az oldott rézvegyületekből gipsz képződött. Mivel több hete nem volt eső a mintavétel előtt, valószínű, hogy a szivárgó folyadék kémhatása már erősen savassá vált, amit a kalkantit jelenléte is alátámaszt.

Aggodalomra adott viszont okot a Huba lovának bal hátsó lábszáráról származó korróziós termék összetétele. Ebben ugyanis már jelentős mennyiségű volt a vas korróziós terméke, a götit is, ami azt jelenti, hogy a lábat merevítő belső acélváz is korrodált. Nagyon valószínű, hogy a lovak lábában hosszú ideig pangott a nedvesség, ami jelen esetben a ló lábát kitöltő anyagon átszivárgva, egy hosszú repedésen keresztül jutott a szobor külső felszínére. A minta levételekor az anyag erősen nedves, a vizes táblakrétára emlékeztető tapintású volt. Azt, hogy a folyadék jelentős mennyiségű rezet oldott, bizonyítja a 8% cuprit jelenléte a korróziós termékben.

A mintavétel helye	Antl [%]	Gyps [%]	Quar [%]	Chlc [%]	Cupr [%]	Goet [%]	Jaro [%]
Huba lovának lábán hosszan elnyúló „kinövés” levegő oldali része		90	1				5
Huba lovának lábán hosszan elnyúló „kinövés” szobor oldali része		75	2		8	15	
Kinövés Kond nyeregtakarójának belső oldalán	5	90	1	1			

5. táblázat 1 cm-nél vastagabb „kinövések” a szobrok felületén (Antl: antlerit, $\text{Cu}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_4$; Gyps: gipsz, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Quar: kvarc, SiO_2 ; Chlc: kalkantit, ill. rézgálic, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; Cupr: kuprit, Cu_2O ; Goet: götit, $\text{FeO}(\text{OH})$; Jaro: jarozit, $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$)

A szobrok egyes üregrészeiben eltérő állagú szilárd anyag volt található (6. táblázat). Színük jellemzően vöröses szürke. A röntgendiffrakciós elemzés alapján tudható, hogy színét a jelentős

mennyiségű réz-oxid erősen befolyásolja. Ez a rézoxid feltehetően a szobor anyagából származik, mivel a nedves, nyirkos anyag jelenlétében a szobor belső felülete oxidálódik, korrodál.

A mintavétel helye	Gyps [%]	Quar [%]	Cupr [%]	Chlc [%]	Albi [%]	Illi [%]	Jaro [%]
Előd lovának farkából vett szemcsés minta	60	30	10				
Árpád nyeregtakarójából származó szemcsés minta	59	15	5	5	20	5	
Árpád lovának bal hátsó lábából származó málékony anyag	30	35	5	5	5	20	
Előd lovának patájából kikapart szilárd anyag	85	1	3				10

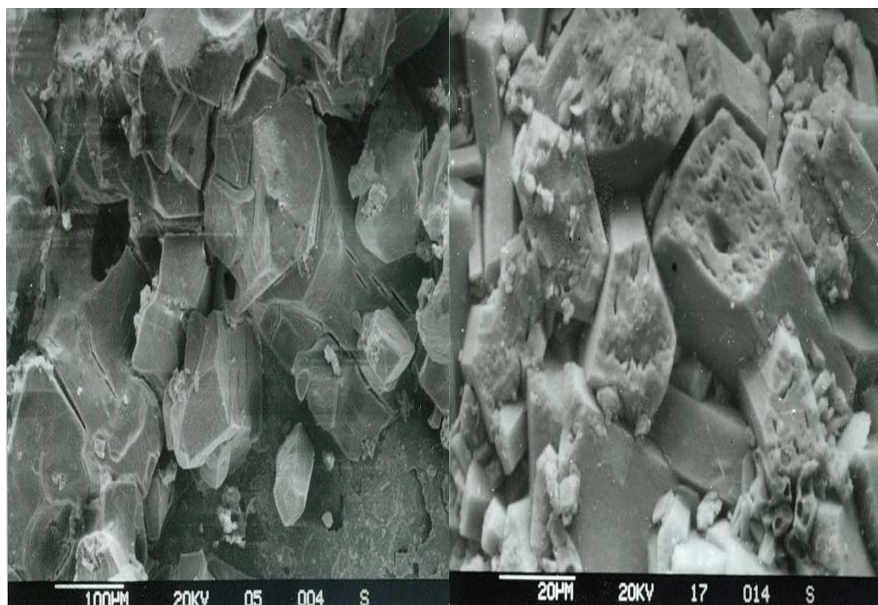
6. táblázat A szobrok belső üregeiből származó minták (Gyps: gipsz, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Quar: kvarc, SiO_2 ; Cupr: kuprit, Cu_2O ; Chlc: kalkantit, ill. rézgálic, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; Albi: albit, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$; Illi: illit, $(\text{K},\text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{SiO}_3\text{Al}_{10}(\text{OH})_2$; Jaro: jarozit, $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$)

Érdekes összehasonlítani Árpád és Előd szobrának belsejéből származó anyagok összetételét (Árpád szobrát 1912-ben öntötték, Elődét 1928-ban), mivel ezek eredeti formázóanyagoknak tűnnek. Lényeges különbség, hogy a korábban öntött szoborban talált por tartalmaz kalcitot, albitot és illitet, amelyek közül az utóbbi kettő földpát, illetve földpát mállástermék, amit feltehetően agyagként adagoltak a formázóanyaghoz. Az Előd lovának farkából származó formázóanyag lényegében gipszből és homokból áll, eltekintve a bronz korróziós termékétől, a cuprittől.

A lovak lábában a merevítő vázon kívül szilárd töltőanyag is volt. Ezt kopogtatással is meg lehetett állapítani. Ebből a szilárd anyagból csak egy helyen sikerült jól értékelhető mintát nyerni, Előd lovának jobb hátsó lábából, ahol az öntvényen lévő repedés már annyira szétnyílt, hogy a résen keresztül a bronz megsértése nélkül is lehetett mintát kaparni. Ez a mintavétel volt egyébként a legnehezebb, mert szikével egyáltalán nem lehetett anyagot leválasztani, csak a keményfém-betétes szerszám hegyével erőszakoskodva. A röntgen-

diffrakciós vizsgálatok eredményei szerint a ló lábában lévő töltőanyag kevés agyagot tartalmazó gipsz. A szobrok belsejéből származó minták alapján arra lehet következtetni, hogy az I. Világháború előtt és után alkalmazott formázási technológia, formázóanyag nem volt azonos.

Igazán látványos volt a korróziós termékek scanning elektronmikroszkópos vizsgálata is. Nyilvánvaló, hogy jelen esetben a kristályos állapotú vegyületek, korróziós termékek folyékony fázisból kristályosodnak ki, illetve az egyik kristályos állapotú vegyületből a másikba való átmenet oldott állapoton keresztül történik, aminek természetesen sokféle hatása van. A folyamat egy része könnyen szemléltethető Tas lovának jobb oldalán lelógó nyeregtakaró (közel függőleges rész) külső és belső oldaláról vett korróziós termék mintáinak vizsgálati eredményeivel. Ez egy öntésből származó üreges öntvénydarabnak két külső felszínét jelenti, tehát a bronz vegyi összetétele csaknem azonos a két mintavételi helyen.



5. ábra Korróziós termékek elektronmikroszkópos képei a kristályosodás különböző stádiumaiban

A nyeregtakaró mindig árnyékos oldalán a száradás és a kristályosodás lassabban megy végbe, mint a külső, időnként napsütött oldal. A mindig árnyékos oldalon a nagy ionkoncentrációjú folyadék tovább reagál a bronzsal, ezért a külső oldalhoz képest más fázisok alakulnak ki, és mellesleg nagyobb méretű kristályok tudnak növekedni.

Az eltérő ionkoncentráció hatását, ami a száradási sebesség különbségéből adódik, a röntgendiffrakciós vizsgálatok eredményei is mutatják (2. táblázat). A gyorsan száradó külső oldalon nincs kalkantit, a belső, nehezen száradón akár 70% is lehet. Ez két dolognak tulajdonítható. Egyrészt, hogy a nagy szulfátion-koncentrációjú folyadék sokáig reagál a bronzsal, elegendően sok idő áll rendelkezésre a reakciók lejátszódásához, másrészt az eső nem tudja a vízben egyébként jól oldódó kalkantitot lemosni a szoborról, hiszen esőtől védett részről van szó. A gipsz- és a kvarctartalomban mért különbség alapvetően azzal magyarázható, hogy a szél a különböző helyekre különböző mennyiségű szállóport képes hordani.

ÖSSZEFOGLALÁS

A szabadtéri bronz alkotások vizsgálata az anyagvizsgálat egyik speciális területét jelenti. Több oka van annak, hogy a vizsgálatok során nem lehet a szokásos módszereket alkalmazni, hogy ezeket a vizsgálatokat speciális módon kell alkalmazni. Ezek között a legfontosabb, hogy a vizsgálandó anyagot műemlékként kell kezelni, tehát azoknak a módszereknek van elsőbbsége,

melyek az alkotásokat megkímélik, vagyis a roncsolásmentes vizsgálatoknak. Helyesen csak akkor járhatunk el, ha a szobrok születésének történetét is ismerjük, hiszen számos fölösleges vizsgálatot spórolhatunk meg.

A roncsolásmentes vizsgálatokat a szobrok szempontjából kell értékelni. A felületükön kialakult korróziós termékekre már nem érvényes a védelem, vagyis azok eltávolíthatók (pontosabban a restaurátor szakemberek által szisztematikusan eltávolítandók). A cikkből kiderül, hogy ezeknek a korróziós termékeknek a vizsgálata, a vizsgálati eredmények értékelése, értelmezése alapján nagyon sok információhoz lehet jutni a szobor belsejében lévő anyagokról, azok állapotáról, ill. a belsejében zajló folyamatokról anélkül, hogy a szobrot meg kellene nyitni.

Természetes, hogy a korróziós termékek alapos vizsgálata mellett a hagyományosan roncsolásmentes vizsgálmódszereknek is nagy szerepe van. A Hősök terén és a Halászbástyán is számos módszer (ultrahang, radiográfia, termovízió, mágneses tér) segítette a restaurálási munkák előkészítését, tervezését és végrehajtását. Ezek a módszerek nem helyettesítik, hanem kiegészítik egymást.

IRODALOM

- [1] *Liber Endre*: Budapest szobrai és emléktáblái. Budapest Székesfőváros Házinyomdája, Statisztikai közlemények 69. kötet, I.sz., 354-364.

- [2] *Prohászka László*: A Millenniumi Emlékmű. Ifjúsági Lap-és Könyvkiadó, Budapest, 1988.
- [3] *Jakóby László*: A magyar szoboröntészet (műöntészet) története. Kohászati Lapok, Öntöde 1957/VIII., 1-2. sz., 1-8.
- [4] *Jakóby László*: A magyar szoboröntészet (műöntészet) története, folytatás. Kohászati Lapok, Öntöde 1957/VIII. 3. sz., 62-68.
- [5] *Buza Gábor*: Bay Zoltán Anyagtudományi Intézet; Szabadtéri szobrok restaurálása. Műszaki Magazin 1996. február, 9-10.
- [6] *Szilágyi András*: A budapesti Millenniumi Emlékmű központi elemének restaurálása. Műemlékvédelem XL. évfolyam, megjelenés alatt.
- [7] A hét vezér szoborcsoport vizsgálata I, II, III. Kutatási jelentések, Bay Zoltán Anyagtudományi és technológiai Intézet, Budapest, 1994,1995.
- [8] Budapest köztéri szobrai 1692-1945. Mahir Zalai Nyomda, Zalaegerszeg, 1987., 67.
- [9] *Takács Viktória -Keresztes Tibor*: A hét vezér szoborcsoport restaurálása. Dokumentáció, 1996.

RONCSOLÁSMENTES HÍDVIZSGÁLATI MÓDSZEREK METHODS FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF BRIDGES

AGÁRDY GYULA¹ LUBLÓY LÁSZLÓ²

Kulcsszavak: híd, roncsolásmentes vizsgálatok, szerkezeti jellemzők

Keywords: bridge, non-destructive tests, structural characteristics

BEVEZETÉS

A hidak a közlekedési infrastruktúra legértékesebb, legnehezebben pótolható, a hálózat megfelelő teljesítőképessége szempontjából a legfontosabb elemei. Ennek megfelelően hídjaink megfelelő állapotának biztosítása a közlekedéspolitika sarkalatos céljai között szerepel, bár e cél felé tett lépések néha visszalépések érzetét keltik a hidászok körében. Nem feladatunk itt kitérni a hídállomány megfelelőségi kritériumainak taglalására, a megfelelő szolgáltatási szint meghatározására, a forráshiány következményeinek prognosztizálására, ezekkel a problémákkal a hídgazdálkodás körében találkozunk és foglalkozunk. Említésük ebben a körben azért indokolt, mert éppen a gazdálkodási szemlélet erősítette és erősíti azt az igényt, hogy a hídszerkezetek állapotát-állapotváltozását objektív, összehasonlítható, időszaki kezelhető mérési eredmények alapján értékeljük, ami természetesen csak a szerkezetek megőrzésével, azaz roncsolásmentes vizsgálatokkal történhet.

Fel szeretnénk azonban hívni a figyelmet arra, hogy a hídszerkezetek mérete, tömege a gépesített berendezésekhez képest általában egy-két nagyságrenddel nagyobb, így a roncsolásmentesség fogalmát kissé eltérően merjük értelmezni: a szerkezeti elemeken ejtett kisméretű, a szerkezet teherviselő-képességét, időállóságát nem, vagy alig befolyásoló mintavételeket (pl. kis átmérőjű furatok, helyreállítható feltárások) (kvázi) roncsolásmentes vizsgálatként tartjuk számon, és alkalmazzuk.

A hídvizsgálatok másik speciális tulajdonsága, hogy a szorosan vett anyagjellemzők helyett sokkal inkább a szerkezetjellemzők meghatározására törekszünk, azaz a lokális anyagvizsgálati, méretellenőrzési adatoknál jobban érdekel bennünket a szerkezet-szerkezeti elem méreteit, keresztmetszeti kialakítását, anyagjellemzőit, esetenként kapcsolatait integráltan értékelő

merevségi (teherbírási) adat. Természetesen szükség van lokális vizsgálatokra is, de a hangsúly az integrált jellemzők értékelésén van, és a lokális vizsgálati eredményeket is sok esetben ezek pontosítására, kalibrálására használjuk. Ezt a hangsúlyeltolódást indokolja az is, hogy egyrészt a hídépítéseknel a beépített anyagok szilárdsági jellemzőit meglehetősen szigorúan bizonylatolni kell, másrészt a szerkezetek alakváltozásait-teherbírást sokkal inkább a beépített anyag mennyisége (szelvényvastagság, keresztmetszeti kialakítás, betonacél mennyiség) mint (épp a szigorú ellenőrzés folytán kis szórású) minősége határozza meg.

A fentiek szerint is célszerű és szükséges műszeres mérési eljárások elterjedését a hídvizsgálatok terén nagyban nehezíti a hidak összetettsége, egyedi kialakítása, a mérendő helyek erősen korlátozott hozzáférhetősége és elszórt telepítése. Mindezek miatt nem tudunk olyan meggyőző, elterjedt és kiforrott vizsgálati eljárásokról beszámolni, ami a tipizált gyártósori méret- és anyagvizsgálatoknál már megszokott (pl. a hazai híd-gazdálkodási rendszerek állapotfelvétele is lényegében standardizált kategóriákat használó mérnöki szemrevételezésen alapul).

ÉRDEKES PRÓBATERHELÉSI ESETEK

MODELLPONTOSÍTÁS PRÓBATERHELÉSI EREDMÉNY ALAPJÁN

A nagyon ferde (35 fokos ferdeségű) hídon a takaréköreges lemez próbaterhelési vizsgálatánál az eredmények a közel mértékadó (~180 t-ás) teherre néhány mm-es lehajlást adtak, de a lehajlási hatásfüggvények tényleges kiértékelése alapján a számított érték még ennél is kisebbre adódott. Az eredmények alapján a szerkezet nem felelt (volna) meg, amit azonban a szerkezet állapota, sem a mért igen kicsiny lehajlási érték nem támasztott alá. A tervezővel történő egyeztetés során kiderült, hogy a számítás egyszerűsítése érdekében a takaréköreges lemezt tömör tartóként méretezték, ami merőleges beépítés esetén alig jelent az összmerevségben eltérést, de a ferdeség és a nagy szélesség miatt a lemezmezők ebben az esetben dominánsan a támaszok vonalára merőlegesen, tehát nem a bordák irányában dolgoznak. A számítást a pon-

¹ egyetemi adjunktus. Széchenyi István Egyetem, Szerkezetépítési Tanszék

² dr., főisk. doc. Széchenyi István Egyetem, Szerkezetépítési Tanszék

A VII. RAKK-on (2011, Eger) elhangzott előadás nyomtaottváltozata

tos(abb) modellel megismételve a mért alakváltozások a számított értékeknél lényegesen kisebbre

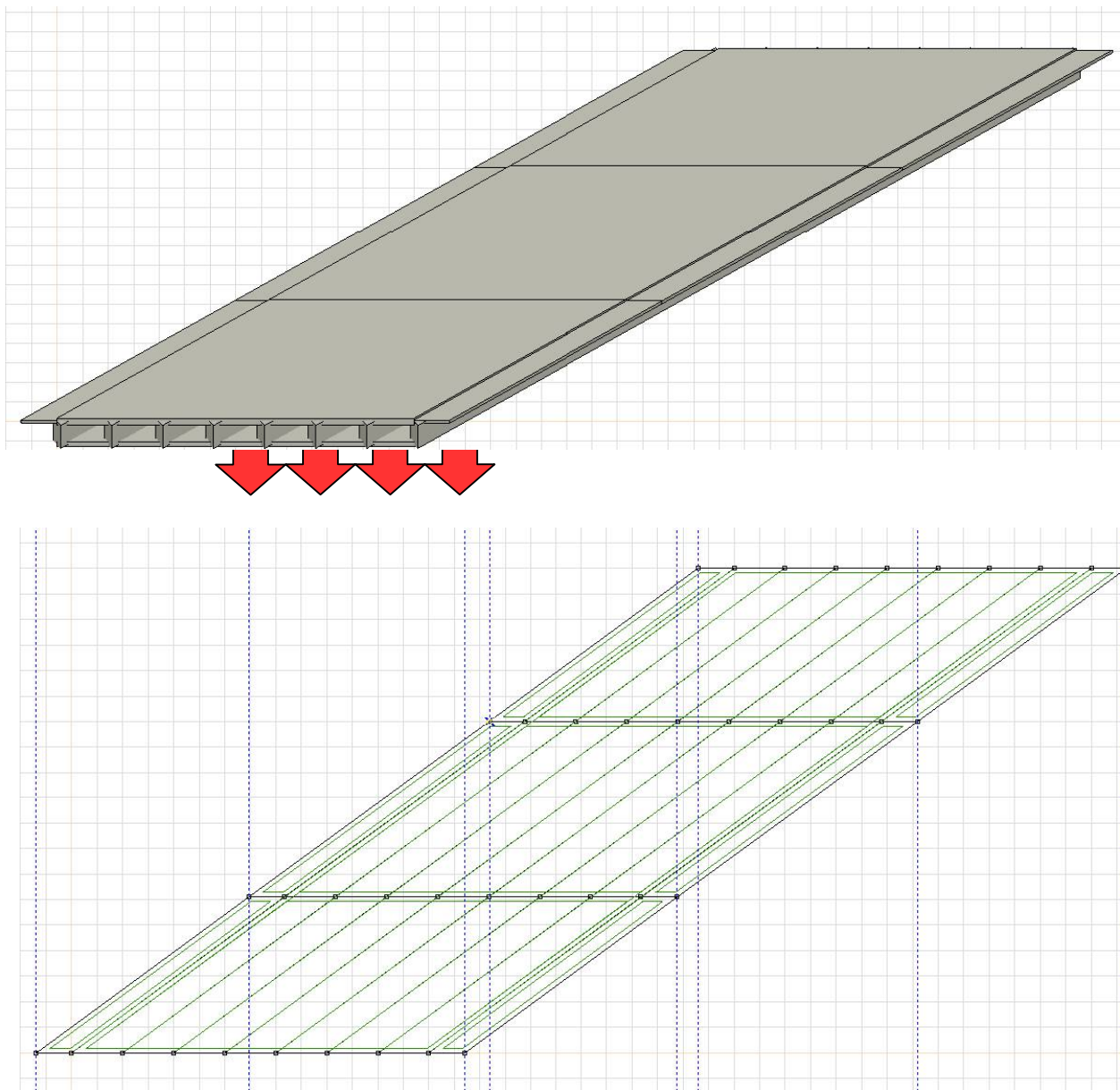
adódtak, azaz a szerkezet megfelelt.

A hazai hídvizsgálati gyakorlatban alkalmazott lokális roncsolásmentes mérési eljárások

TÍPUS	MÉRÉSI CÉL	MÓDSZER-ESZKÖZÖK
geometriai mérések	a keresztmetszeti és hosszmeretek ellenőrzése, a geometriai alaktorzulások mértékének meghatározása	mérőszalag, lézeres távmérő, tolómérő
betonacél mérések	a betonacélok helyzetének, kiosztásának, átmérőjének meghatározása, ellenőrzése	mágneses elvű vaskereső
szilárdsági mérések	a beton ill. az acél tájékoztató szilárdság meghatározása	SCHMIDT kalapács, Betontester, POLDI kalapács
korrozíós mérések	a betonacélok korrozíós veszélyeztetettségének meghatározása	furatpor minták helyszíni ill. laboratóriumi vegyelemzése
feszítőerő mérések	a feszítőelemekben lévő feszítőerő tényleges értékének vagy változásának meghatározása	az elemen mért és számított sajátfrekvenciák összehasonlítása
repedés-mérések	a vasbeton szerkezeteken a repedések tágasságának, ill. az acélszerkezetek varrataiban a repedések megjelenésének meghatározása	mérőmikroszkóp; mágnesporos vagy folyadékpenetrációs repedés-vizsgálat
meghúzási nyomaték ellenőrzés	az acélszerkezetek kapcsolataiban alkalmazott csavarok meghúzási nyomatékának ellenőrzése	nyomatékkulcs

A hazai hídvizsgálati gyakorlatban alkalmazott integráló roncsolásmentes mérési eljárások

TÍPUS	MÉRÉSI CÉL	MÓDSZER-ESZKÖZÖK
statikus próbatelhelés	a teljes szerkezet alakváltozási merevségének meghatározása, a számítási modell ellenőrzése (közel) mértékadó teherre	eltolódás- ill. nyúlásmérés a mértékadó pontokban + modellszámítás
kvázi statikus próbatelhelés	a teljes szerkezet terhelés alatti alakváltozás függvényeinek meghatározása, a számítási modell ellenőrzése	eltolódás- ill. nyúlásmérés a mértékadó pontokban + modellszámítás
célzott statikus próbatelhelés	megerősített-átalakított vagy bizonytalan kapcsolatú szerkezet elemei közötti együttműködés létének-mértékének meghatározása, ellenőrzése	eltolódás- ill. nyúlásmérés a jellemző pontokban + modellszámítás
egyszerűsített dinamikai próbatelhelés	a fő tartószerkezeten megjelenő tényleges dinamikai többlet meghatározása a jellemző járműtípusokra és sebességekre	eltolódás- ill. nyúlásmérés a jellemző pontokban + statikus mérés
dinamikai próbatelhelés	a tartószerkezet jellemző sajátfrekvenciáinak meghatározása	gyorsulásmérés a tartóelemeken + FFT transzformáció



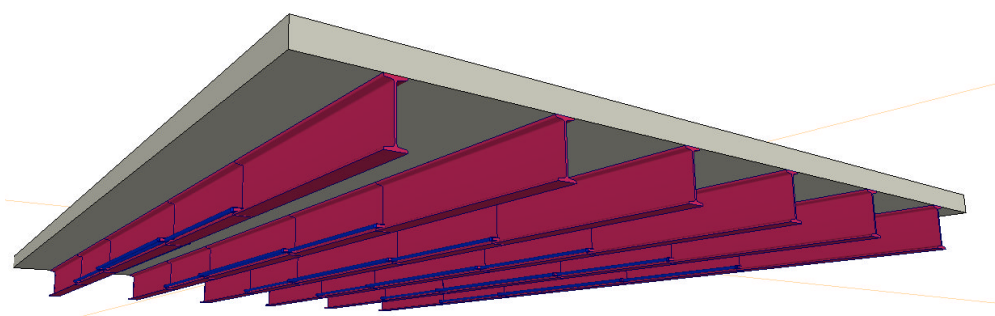
UTÓLAGOS FESZÍTÉS MEREVSÉG- ILL. TEHERBÍRÁS NÖVELŐ HATÁSÁNAK IGAZOLÁSA

A kis fesztávú kéttámaszú híd felszerkezetét acélgerendákra támaszkodó vasbetonlemezrel alakították ki. Az acélgerendák és a vasbetonlemez közötti kapcsolat megoldása ismeretlen volt, így az együttműködés mértéke is kérdéses. A felszerkezetet az acéltartók aláfeszítésével kívánták megerősíteni, és a próbaterhelés feladata volt igazolni (vagy cáfolni) a merevségnövekedést,

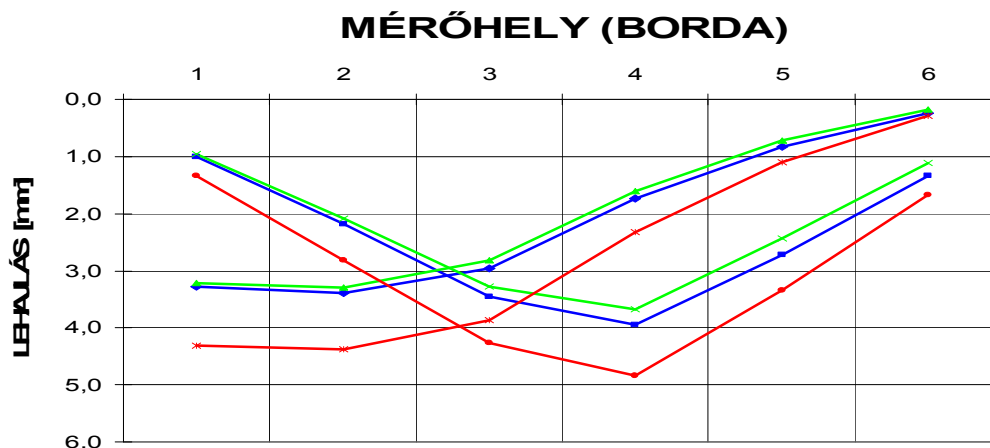
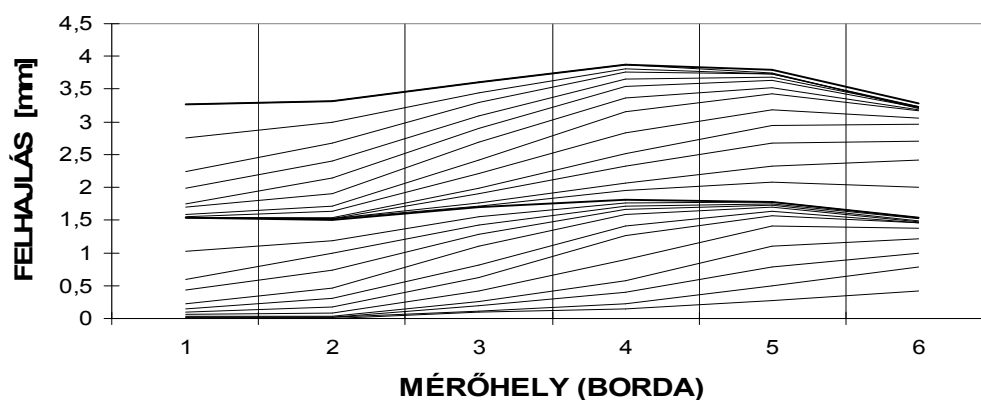
aminek alapján (közvetve) a szerkezeti elemek együttműködése és a teherbírás változása is vélelmezhető. A vizsgálat során minden egyes feszítési fázisban mértük a bordák középkeresztmetszetének függőleges eltolódását, és az eredmények alapján kirajzolódott, hogy a feszítés végeredményben közel azonos felhajlásokat okozott a tartókban, de az egyik oldalon a szerkezet szignifikánsan lágyabb, az alakváltozások nagyobbak. A feszítés előtti és a feszítés utáni terhelőpróba azt igazolta, hogy a szerkezet ugyan-

azon teherre lényegesen kisebb alakváltozással reagál, azaz megerősítés hatékony, és a szerkezeti elemek együttműködése is fennáll. (A szimmetri-

kus terhelés eredményei megerősítették, hogy az egyik oldal lágyabb, a tengelyben álló teherre is nagyobb lehajlást mutat.)



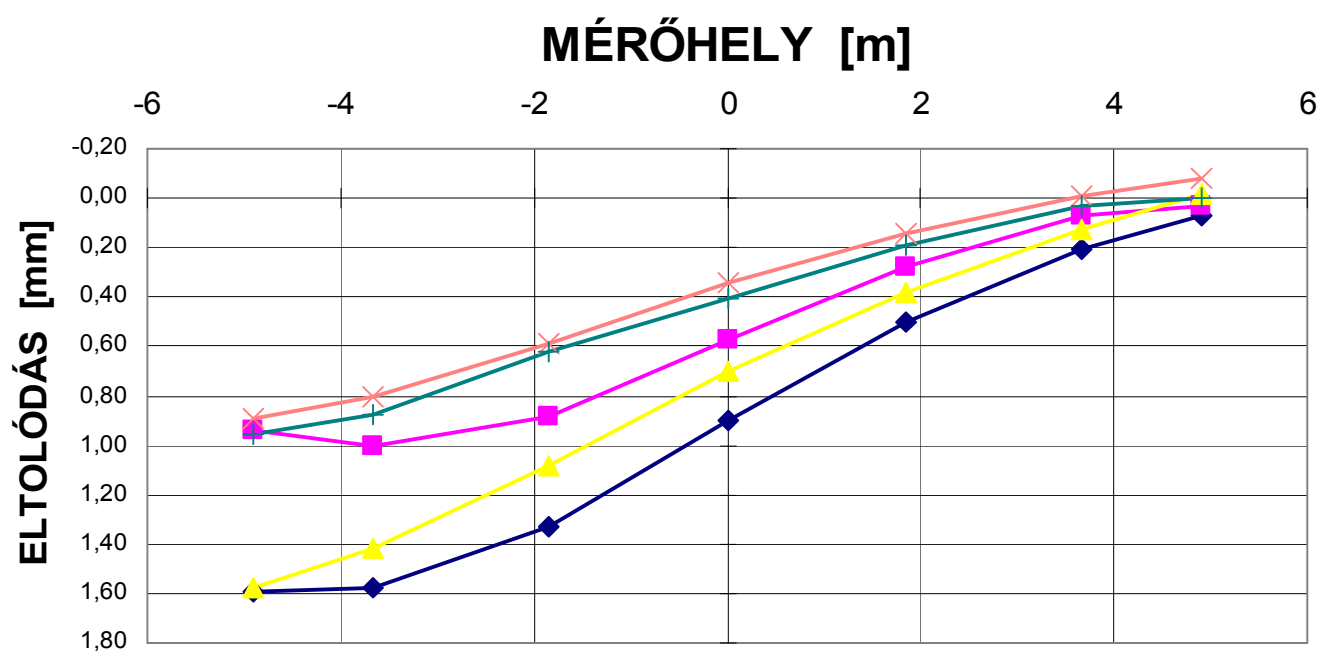
A FELHAJLÁSOK A FESZÍTÉS EGYES FÁZISAIBAN



SZÉLESÍTÉS-MEGERŐSÍTÉS HATÉKONYSÁGÁNAK IGAZOLÁSA CÉLZOTT PRÓBATERHELÉSSSEL

Az eredetileg ötbordás vasbeton hídát új, erősebb szélső főtartók beépítésével, együttműködő pályalemezzel és megnövelt méretű, feszített közép-kereszttartóval erősítették meg. A próbaterheléstől két kérdésre vártak választ: együttmű-

zik-e az új pályalemez a régi szerkezettel, ill. a megerősített közép-kereszttartó képes-e hatékonyan bevonni az erőjátékba az új, erős, szélső főtartókat. A számítási modellt négy változatra készítettük el, és a mérési eredmény az együttműködő pályalemezes, hatékony közép-kereszttartós modell számítási eredményeivel mutatott igen jó egyezést, igazolva a tervező szándékát és feltételezését.



A hídszerkezetek körében a roncsolásmentes vizsgálatoknak más tartalmakat tulajdonítunk: a szorosan vett anyagjellemzők helyett integrált, komplex szerkezetjellemzők (főleg merevségi jellemzők, kereszteloszlás, együttdolgozás, feszültségeloszlás) meghatározását célozzuk meg.

Természetesen a lokális anyagvizsgálatnak is fontos szerepe-feladata van a szerkezetek teherbíró-képességének megítélésében, és a mérés-technika fejlődését figyelembe véve szándékunk és reményeink szerint a rendszeres vizsgálati folyamatokban is egyre nagyobb szerephez jut.

VIZSGÁLATTECHNIKA

TEST TECHNICS

AKUSZTIKUS EMISSZIÓS VIZSGÁLATOK ACÉLOK SZAKÍTÁSA ALATT ACOUSTIC EMISSION STUDY OF TENSILE TEST ON STEELS

PÓR GÁBOR, DOBJÁN TIBOR, DOSZPOD LÁSZLÓ

Kulcsszavak: akusztikus emisszió, szekvenciális valószínűségi hányados, AE adatbank

Keywords: acoustic emission, Sequential Probability Ratio Test, AE database

ÖSSZEFOGLALÁS

A számítástechnikai fejlődés ma már lehetővé teszi, hogy újra az anyag szerkezetének vizsgálatára használjuk az akusztikus emissziós (AE) eseményeket. Visszatértünk az AE hajnalán végzett szakítópróbákhoz. Könyvtárat készítünk, amely lehetővé teszi az anyagszerkezetek változásainak felismerését képfeldolgozási módszerekkel. Ehhez sokkal jobb AE esemény-felismerési módszert, a Szekvenciális valószínűségi hányados tesztet, választottuk

ABSTRACT

New development in computer sciences opened the way to use the Acoustic Emission (AE) technique for recognition of the structure of materials, as it had been used at the early stage of application of AE. We are collecting a new library of AE events, which enables us to use the contemporary pattern recognition techniques. For that reason a better event recognition is needed. We are introducing the Sequential Probability Ratio Test for AE event recognition.

BEVEZETÉS

Az Akusztikus Emisszió (AE) fogalmát és jelentőségét az anyagvizsgálatokkal foglalkozók jól ismerik, és alapjait a legtöbb anyagvizsgálatokkal is foglalkozó felsőfokú tanintézményben (és persze anyagvizsgáló tanfolyamokon is) oktatják. Jól ismert, hogy az anyagok terhelés alatt recsegő, pattogó hangot bocsátanak ki. Ezt az élményt akár gyermekkorunkból is ismerős, amikor a faág recsegésére felfigyelve időben leugrunk az ágról. Igaz, a faágban a rostok szakadnak, pattannak el, azok okozzák a hangkibocsátást, de ez igen hasonló a napjainkban oly divatos szálerősítésű műanyagok AE vizsgálataihoz. A fémekben a terhelés hatására növekvő energia szabadul ki, és indukálja az akusztikus hullámokat, amikor egy-egy összekapcsolódó domén kapcsolat elpattan, az domén-támasz letörik; akkor, amikor a repedés megindul és nő, amikor diszlokációk lépnek fel.

Ezek megfigyelése alapján következtethetünk

Dunaújvárosi Főiskola, Magyar Akusztikus Ipari Diagnosztikai Laboratórium, H-2400, Dunaújváros, Táncsics M. u. 1/A
A VII. RAKK-on (2011, Eger) elhangzott előadás

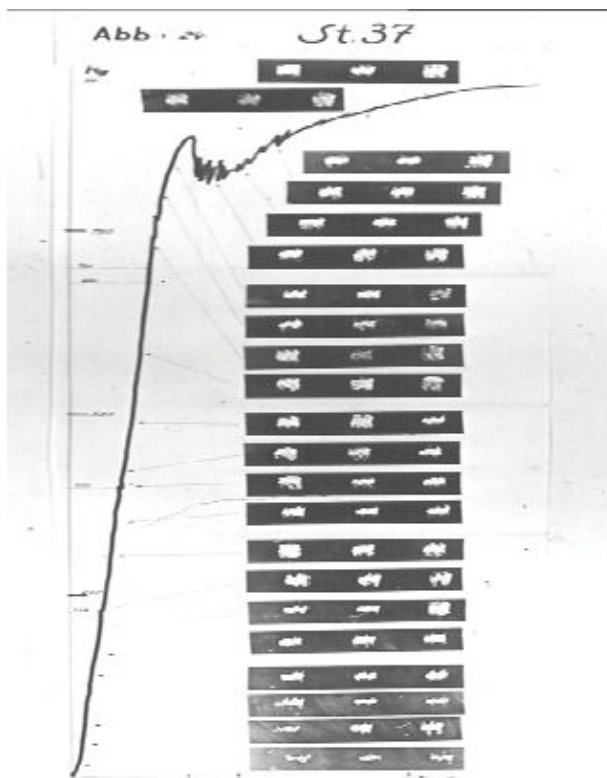
az anyag tulajdonságainak változására, szilárdságának gyengülésére. Szűcs Pál (1993) kiváló történeti áttekintéséből (és az Enciklopédia Britannica-ból) azt is tudjuk, hogy akusztikus emissziót a kiégetett agyagedények hűlés közbeni pattogásának megfigyelésére már 6500 évvel ezelőtt is használták a termék minősítésére. A fémkohászatban az önzörej volt az, amit korán, már i.e. 2500 előtt is használtak. Az ón +13,2 °C és +161 °C között létező tetragonális változata, a fehér ón a képlékeny deformáció hatására létrejövő ikresedés során hallható hangokat bocsát ki. 1916-ban J. Csohralszkij kapcsolatot talált az ón és cink-zörej valamint az ikresedés között. 1923-ban A.M. Pertevin és F. Le Chatelier Al-Cu-Mg ötvözetek nyújtásakor a Lüders vonalak megjelenésével párhuzamosan "rövid éles hangokat" hallott.

Olyan AE tankönyv, vagy áttekintés, amely ne emlékezne meg J. Kaiser érdemeiről az AE újbóli felfedezésében és széleskörű elterjesztésében, nem is létezik. Nevét viseli az AE vizsgálatok során jól megfigyelhető Kaiser effektus, amely szerint, ha az anyagot már terhelés érte, akkor újabb terheléskor csak akkor bocsát ki újra AE eseményeket (hangot), ha a terhelés meghaladja a korábbi. Kaiser 1949-50-ben végzett müncheni kísérletei (PhD disszertációja) után az események felgyorsultak. Már a 60-as években az elektrotechnika lehetővé tette olyan ipari mérőműszerek megalkotását, amelyeket ipari alkalmazásra lehetett használni, nevezetesen nyomás és terhelés alatt működő berendezések állapotjellemzésére, vizsgálatára kezdték használni az AE módszert. Ez annyira elterjedt, és az AE anyagvizsgálati kurzusokon annyira ezt oktatják, hogy sokan már azt sem tudják, hogy Kaiser eredetileg a kísérleteit szakítógépen végezte, és célja az anyagok minősítése, belső szerkezetének vizsgálata volt, - és nem a szerkezetek vagy tartályok minősítése. Az 1. ábrán látható egy részlet Kaiser eredeti munkájából. A szakítógörbe egyes pontjaihoz hozzárendelte az oszcilloszkóp képernyőjére vitt mikrofonjelről felvett film 3-3 kockáját. A korabeli technika csak ezt tette lehetővé.

Az AE konferenciákon és az anyagvizsgálatokban egyértelműen a diszlokációkat, a repedésterjedést, a fázisátalakulásokat, és az anyagon

belüli belső súrlódásokat szokás az AE okaként felsorolni és ezeket vizsgálni. De használatát elsősorban a tartályok, a szerkezetek öregedésének és meglévő anyaghibáinak lokalizálására korróziós gyengüléseire használják fel. Az anyag-szerkezeti vizsgálatok lényegében háttérbe szorultak. Annyira csak ezekre figyelünk, talán el is sikkad, amikor üdítő kivételként megjelenik például az Anyagvizsgálók Lapjában Kindlein Melinda, Fodor Olivér (2010) cikke, amelyben szakítógépen és hajlító gépen vizsgálták az anyag szerkezetével összefüggő AE eseményeket.

Az elmúlt évtized forradalmian új eredményei nyomán a számítástechnika területén, most újabb lehetőségek nyílnak meg az AE használatában. Amíg az évtizedekkel ezelőtt megalkotott és azóta is használt Defektoszkóp és Sensophone jellegű készülékek elsősorban a beütések számát, azok hosszát, felfutási idejét és az ebből származó statisztikákat, valamint a késleltetési időket tudták csak rögzíteni, most rövidesen képesek leszünk (vagy már vagyunk) az események időjeleinek rögzítésére, azok spektrális feldolgozására, és ami legalább ilyen fontos, korszerű információtechnológiai osztályozására és elemzésére.



1. ábra Egy történelmi kép Kaiser 1949-es szakítási kísérletéből.

Laboratóriumunknak, a Magyar Akusztikus Ipari Diagnosztikai Laboratóriumnak (MAIDLab) eltökélt

célja, hogy az AE technikát ismét az anyagvizsgálatok fontos eszközévé tegye. Ebből a célból láttunk hozzá újra a szakítógépeken történő AE anyagvizsgálatokhoz. Olyan eljárásokat fejlesztünk, amely reménytelivé teszi az események eredeti időjeleinek rögzítését és off-line elemzését; tovább fejlesztjük mérés technikánkat, hogy a szakítógépnél bonyolultabb anyag-szimulátorokon és magának a hengerlés folyamata közben is képesek legyünk AE jeleket mérni.

Jelen cikkben, egy szakítógépen folytatott mérés eredményeinket mutatjuk be, valamint azt a számítástechnikai fejlesztést, amely lehetővé teszi az események időjeleinek és hosszának a korábban jobb rögzítését, valamint a hullámvezetők fejlesztésének megindítását, amelyekkel reményeink szerint üzemi méréseket is lehet végezni az anyagok előállításában.

AKUSZTIKUS EMISSZIÓS MÉRÉSEK A BÉTA 100 SZAKÍTÓGÉPEN

Kísérleteinket a 2. ábrán látható Béta-100 szakítógépen végeztük. Az AE események érzékeléséhez négy, egyvonalban elhelyezett 150 kHz-es AE érzékelőt használtunk, - természetesen a két külsőt guard módban. Az AE méréseket ebben a fejezetben az ábra jobb oldalán álló Geréb és tsa kft által gyártott AED-40 Sensophone-nal rögzítettük, míg a következő fejezetben bemutatott időjeleket már egy saját fejlesztésű, a kép bal oldalán álló számítógépes rendszerrel, amelynek gyorsműködésű része egy beágyazott National Instruments PXI mintavevő egység.

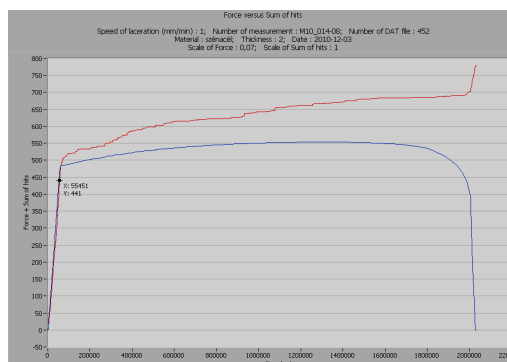
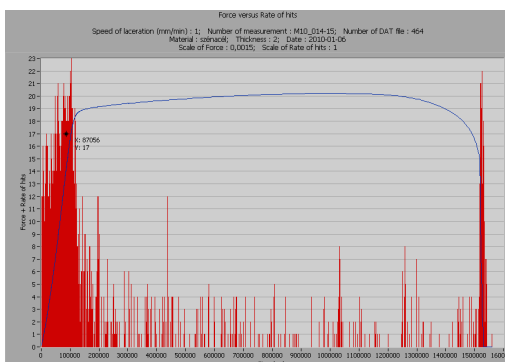


2. ábra A Béta 100- szakítógép az AED-40 és a beágyazott számítógépes rendszer

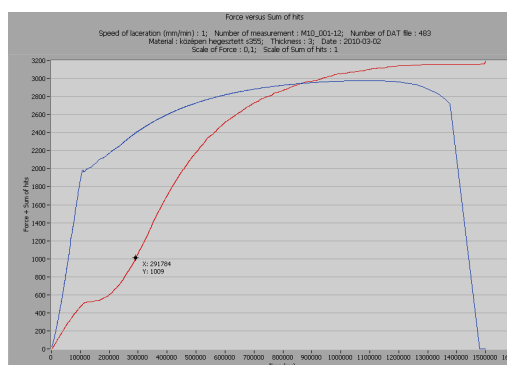
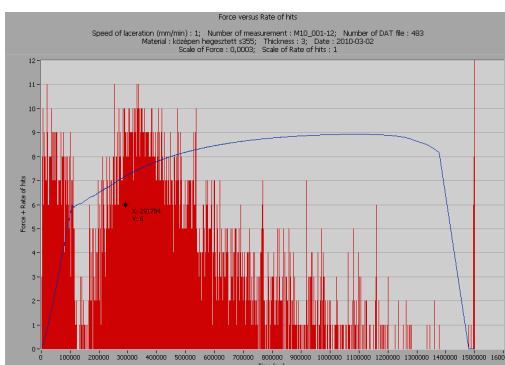
A 3. ábrán egy hagyományos ausztenites acél-szalag szakítógörbáját láthatjuk a beütések gyakoriságával és a beütések összegével. Vegyük észre a szembeszökő különbségeket a 4. ábrával, amelyen egy félbevágott és meghegesztett szakítólap-

nak mutatjuk be a szakító görbét, a beütési gyakoriságát és a beütések összegét. Nem egy, hanem több mint egy tucat hasonló ábrát készítet-

tünk, és ezekből megállapítható, hogy jó egyezést mutatnak. Azaz, ezek a görbék valóban jellemzik az adott anyagot.



3. ábra A szakítógörbe (kék) a Rate of hit (bal oldalt pirossal) valamint a Sum of hits (jobbra pirossal jelölve) hagyományos ausztenites szakítólapnál



4. ábra A szakítógörbe (kék) a Rate of hit (bal oldalt pirossal) valamint a Sum of hits (jobbra pirossal jelölve) hagyományos hegesztett szakítólapnál

Vegyük észre, hogy a hegesztett anyagnál egy második lineáris szakasz kezd kialakulni a folyás kezdete után, amely az AE események újbóli erős megindulásához vezet némi csendes szünet után. Ezt mi a hegesztésben kialakuló másodlagos nyúlásokra vezetjük vissza.

Hasonló mérésekből egy egész könyvtárat kívánunk létrehozni a jövőben, amely lehetőséget nyújt arra, hogy a terhelések alatt észlelt AE események alapján azonosítani tudjuk az anyagok struktúráját és esetleg a hegesztés jóságát is. A könyvtárra elsősorban a korábban (Pirumov et al., 2011) ismertetett ideghálózati módszer következtéseinek lesz szükségünk.

ÚJ MÓDSZER AZ AE ESEMÉNYEK KERESÉSÉBEN

Jól ismert, hogy a XX. század második felében előállított AE mérőrendszerek elsősorban az AE börsztek 6 fontos paraméterét voltak képesek rögzíteni: a beállított küszöbszinthez tartozó be-

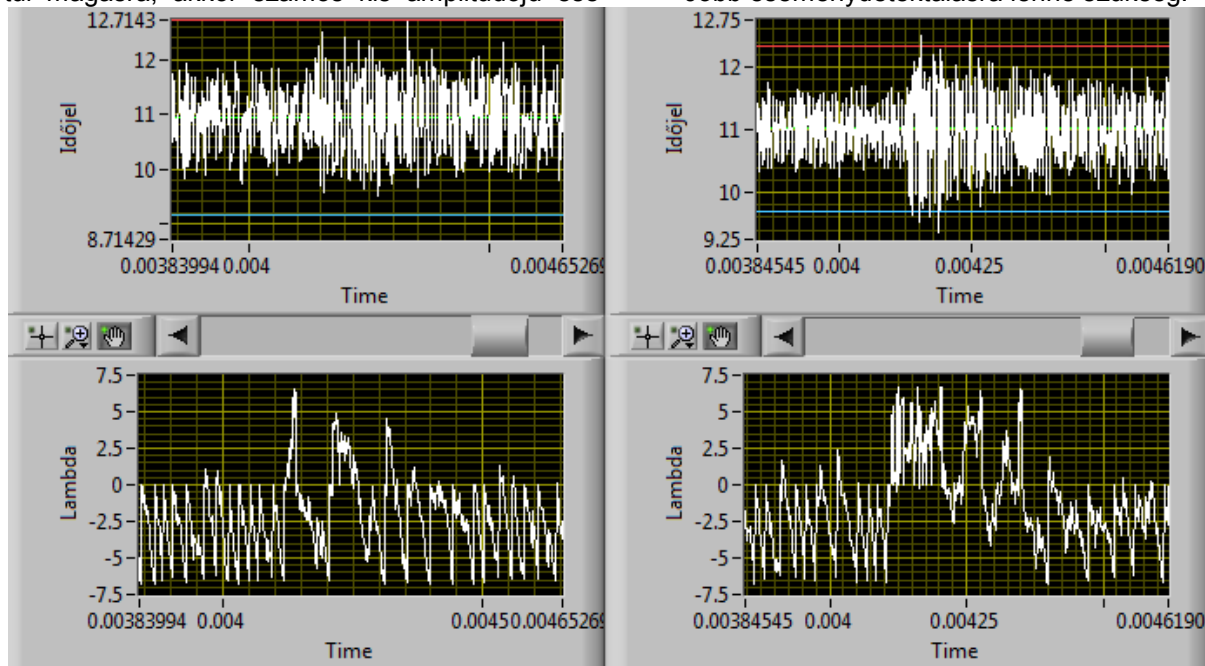
ütések kezdetét, hosszát (duration), felfutási idejét (rise time), amplitúdóját, az oszcillációk számát (counts) és a teljesítményét, valamint energiatartalmát (MARSE). A beütések időpontjából persze további statisztikát és integrálok képezhetők. A korabeli technika nem tette még lehetővé a magas frekvenciás jelek olyan mintavételezését, amely a teljes jelet rögzítette volna, de már lehetővé tette a fenti paraméterek előállítását az elektronikai szintek összehasonlítása alapján.

Az elmúlt 20 év számítástechnikai fejlődésének köszönhetően, ma már megnyílt annak lehetősége, hogy akár a teljes időjelet rögzítsük jó felbontással. Ez a technika csak azért nem terjedt el, mert hihetetlen nagyméretű időfájlokat hoz létre, amelyben a börsztek megkeresése a régi módszerrel még off-line is igen fáradságos, és kis hatékonyságú lenne. A túl sok adattal nehéz mit kezdeni.

Ezért megnövekedett az igény más módszerű esemény-kiválasztásra. A küszöbszinthez való jelszint hasonlítás igen sok hibát rejt magában. Ha

alacsonyra állítjuk a küszöböt, akkor igen gyakran még a háttér szintje is események bizonyulhat. Ha túl magasra, akkor számos kis amplitúdójú ese-

ményt veszünk el. A Duration igen erősen függ a küszöbszint beállításától (de a többi paraméter is). Jobb eseménydetektálásra lenne szükség!



5. ábra A mért időjelek és alattuk az SPRT módszer lambda görbéje.

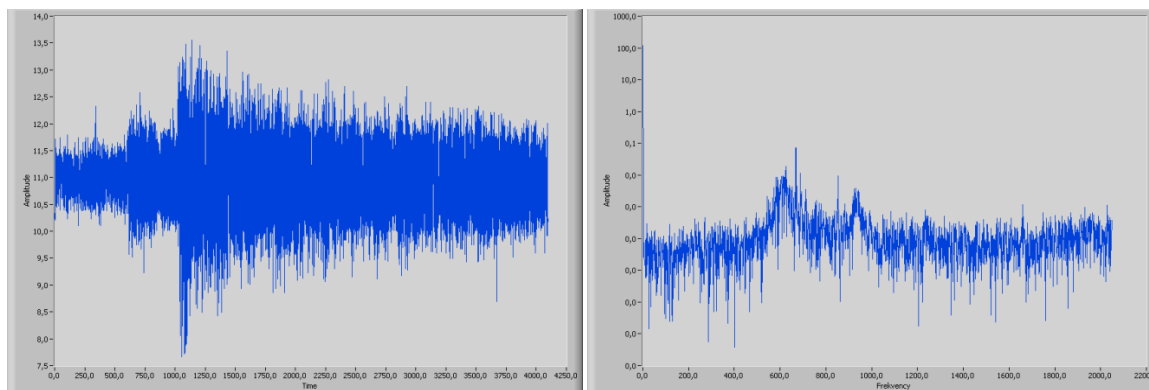
Jól látható a lambda görbe segítségével, hogy kezdődik az AE esemény és hol végződik

Mi a jobb eseménydetektálást a Szekvenciális Valószínűségi Hányados Tesztben (SPRT) találtuk meg. Előbb Autoregressziós (AR) szűrővel eltávolítjuk a háttérben fellelhető esetleges determinisztikus összetevőket és zéróközepűvé tesszük a jelet, majd az SPRT kiválasztja a szűrt jelből azokat az eseményeket, amelynek a statisztikája különbözik a háttértől. Ebben rejlik az SPRT hihetetlen előnye! Nem szintekkel dolgozik, hanem a mintavételezett jelek statisztikáját számítja ki, és arról állapítja meg, hogy az egyértelműen a háttér statisztikáját követi, vagy attól eltérő statisztikát. Akármilyen deviáció a statisztikában jelzést generált, amelyet mi eseménynek értékelünk. Az SPRT lambda függvénye egyértelműen mutatja, hol kezdődik az esemény és hol ér véget. Az SPRT olyan érzékeny, hogy ha a szórásban az esemény egy kettes faktorról (érték 6 dB-lel) magasabb, mint a háttér, akkor már reagál. Még ennél kisebb amplitúdó különbséget is képes észrevenni, ha az esemény statisztikája különbözik a háttér valószínűségi

sűrűség függvényétől. Márpedig a borsztők valószínűségi eloszlási függvénye a Gamma eloszláshoz tartozik, míg a háttér a megszokott normál eloszlást követi!

Az elmondottakat jól demonstrálja az 5. ábrán látható időjel és az alatta lévő lambda függvény két időfelbontásban. Egyértelműen látható, hogy mind nagy borsztnél, mind kis, alig kiemelkedő eseménynél mind a kezdeti időpont, mind a duration jól azonosítható a lambda függvény segítségével.

A 6. ábrán egy ilyen módon kiválasztott időjel szakaszt, azaz borsztőt, és annak spektrumát láthatjuk. Ha az SPRT-vel kiválasztottuk a borsztőket, akkor elég könnyen elő lehet állítani az események spektrumát. Ez különben elvesz a sokkal hosszabb háttér szakaszok miatt, mivel az események száma még mindig sokkal kisebb, mint a háttér fluktuációk mennyisége.



6. ábra A regisztrált borszt az időjelenben és annak spektruma

ÖSSZEFOGLALÁS ÉS DISZKUSSZIÓ

Az elmúlt húsz év fejlődése a számítástechnikában, lehetővé teszi, hogy amit Kaiser 1949-ben még oszcilloszkóp és filmfelvétel segítségével rögzített, ma már digitálisan is rögzítsük. Ugyanakkor a számítástechnikai képfelismerési és mesterséges intelligencia technikák megnyitották az utat az elemzések előtt. Ez lehetővé teszi, hogy az AE a jövőben ne elsősorban a szerkezetek öregedésének és szilárdságának vizsgálatában hasznosítsuk, hanem anyagvizsgálatoknál, az anyag-előállítás (pl. hengerlés) közbeni vizsgálatokban is. Olyan könyvtárakat kívánunk létrehozni, amely lehetővé teszi, hogy az alakfelismerő programokat és ideghálózatosítást is bevezessük a szövetszerkezetek tanulmányozására. Ehhez a Gleeble szimulátoron végzett mérések során is AE vizsgálatokat tervezünk, az általunk kifejlesztett hullámvezetők segítségével.

IRODALOM

- [1]. Szűcs P (1993) AZ AKUSZTIKUS EMISSZIÓ, mint szilárdtestfizikai jelenség és mint roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer, előadás a Veszprémi Egyetemen, elérhető a Műszertechnika honapján
- [2]. J. Kaiser (1953): "Untersuchungen über das Auftreten Gerauschen beim Zugversuch" Ph.D. thesis Technische Hochschule, München
- [3]. Kindlein M., Fodor O. (2010): Akusztikus aktivitás akusztikus emisszió vizsgálatoknál Anyagvizsgálók Lapja, 2010/1-2 37-41 old.
- [4]. Primurov et al. (2011) Előadás a MAROVISZ jelen konferenciáján

KÉSZÜLÉKEK, BERENDEZÉSEK

INSTRUMENTS, EQUIPMENTS

NYÚLÁSMÉRÉSEK ÉS AZ AKUSZTIKUS EMISSZIÓS MÉRÉSEK KÖZÖTTI ÖSSZEFÜGGÉS A TARTÁLYTERHELÉS FOLYAMATÁBAN

RELATION BETWEEN STRAIN GAUGE MEASURING AND ACOUSTIC EMISSION RESULTS LOADING TANKS

PÁL CSABA

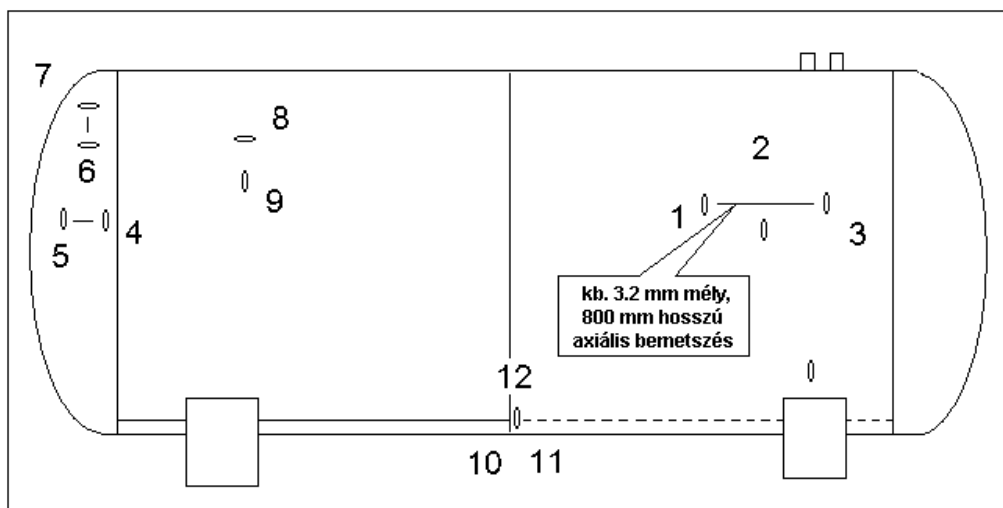
Kulcsszavak: tartályok terhelése, akusztikus emisszió, nyúlás

Keywords: x loading tanks, acoustic emission, strain gauge

Mint ismeretes, mindkét vizsgálati módszer egy dinamikus eljárás, amely terhelés hatására vizsgálja a szerkezetekben rejlő feszültségeket, anyaghibákat. Aktív hibákra utaló jeleket az anyagszerkezet csak egy bizonyos terhelési szint elérésével bocsát ki, mely feszültségeket és hibajeleket megfelelő számú AE érzékelőkkel és nyúlásmérő bélyegekkel jelezni és lokalizálni lehet. A két vizsgálati módszer közötti összefüggés kimutatására még 2009 novemberében egy sikeres kísérletre került sor a Dunaújvárosi Főiskola Gépészeti

Tanszékén, a Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség közreműködésével, valamint a szakterületeken ismert és gyakorlattal rendelkező vizsgáló laboratóriumok és intézmények bevonásával.

A tartályrepsztesztes vizes nyomásterheléssel történt és az eredményes felhasadás elérése érdekében az 5 m³-es PB tároló tartály 5,1 mm falvastagságú palástfelületén többek között egy 800 mm hosszú és 3,2 mm mély műhiba bemetszésre került sor.



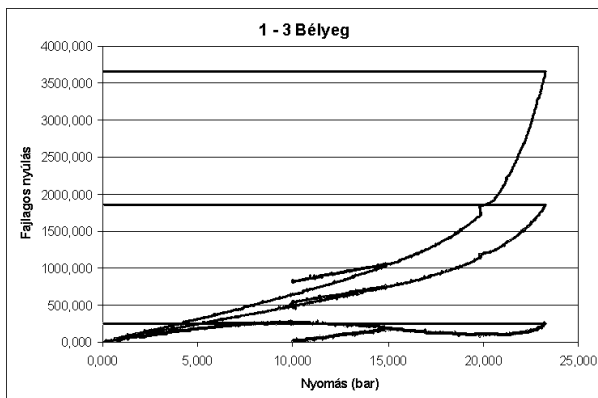
1.ábra

A műhiba környezetében (1. ábra) 3 db. nyúlásmérő bélyeg rögzítése mellett, párhuzamosan több akusztikus emissziós műszer 4-4 mérőfejjel vizsgált. A 2. bélyeg meghibásodása ellenére, mindkét vizsgálati módszer on-line követése eredményesen jelezte a terhelés folyamatában az anyag megfolyását, valamint a felhasadás bekövetkezésének és az azt megelőző pillanatoknak nyomon követését. A mérések utólagos kiértékelése és a két vizsgálati módszer eredményeinek összevetése látványosan igazolta a nyomásterhelés hatására a fajlagos nyúlás (2. ábra), és a hang

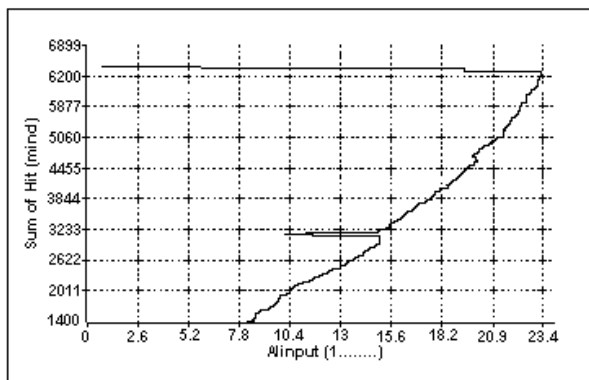
emissziós beütésszám növekedés (3. ábra) közötti összefüggéseket.

A fajlagos nyúlást arányosan követi a hang emissziós beütésszám növekedés és a 15 bar nyomást követő visszaterhelés kontrakciója (4. ábra) csendes állapotban zajlik (5. ábra). Miután az ismételt terhelés meghaladta a 15 bar nyomáshatárt, a hang emisszió ismételten követi a nyúlás folyamatát (Kaiser-effektus).

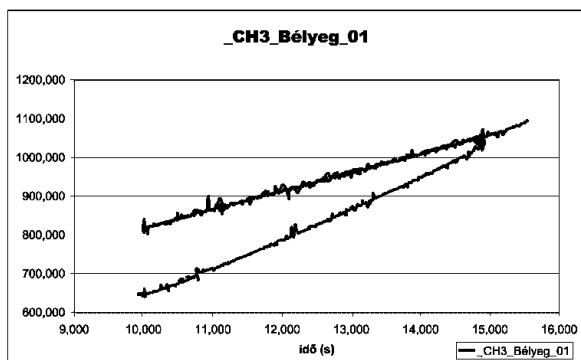
okl. gépészmérnök, AT-2, AETA Mérnökiroda Kft.



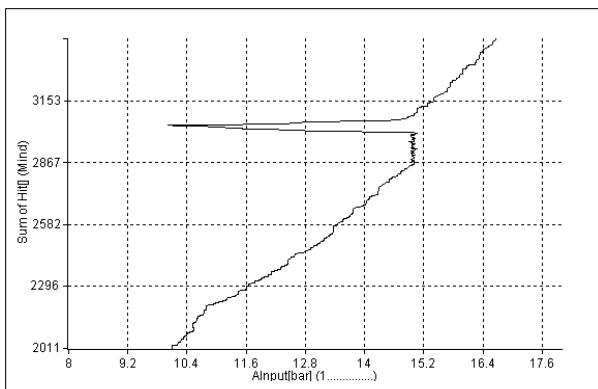
2. ábra Nyomás – Fajlagos nyúlás



3. ábra Nyomás – Beütésszám növekedés

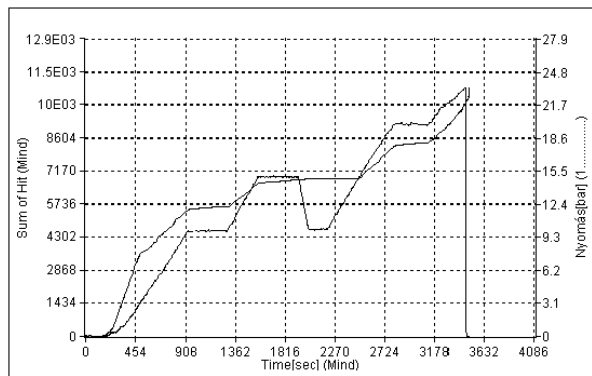


4. ábra Visszaterhelés – Fajlagos nyúlás



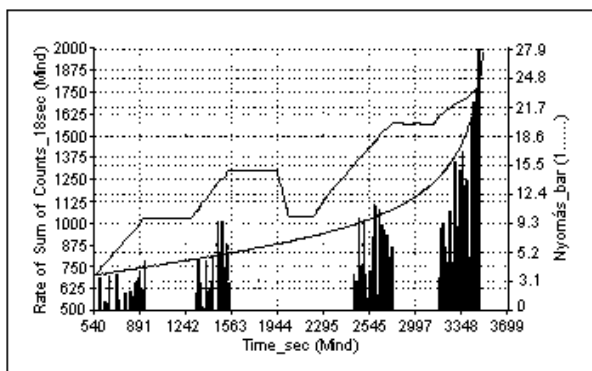
5. ábra Visszaterhelés – Beütésszám növekedés

A nyomásterhelés folyamatában többszöri nyomástartás és visszaterhelés is be lett iktatva (6. ábra), a Kaiser -effektus nyomon követése érdekében.

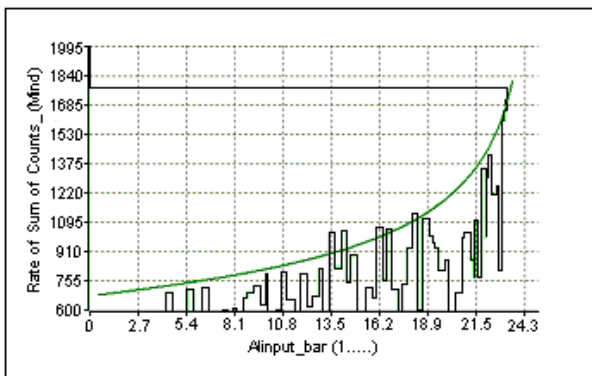


6. ábra Nyomásterhelés és beütésszám növekedés idő függvényében

A tartály anyagára és szerkezetére jellemző ismert fizikai tulajdonságokat figyelembe véve, mindkét vizsgálati mérés alapján szakaszelemzéssel kiértékelve, az anyag nyúlása már a 4-től 10 bar nyomásterhelés alatt kimutatható volt, és a 23 bar nyomáshatáron bekövetkező felhasadásra a rezgésszám növekedés exponens voltából (7. és 8. ábra) előre lehetett következtetni.



7. ábra Rezgésszám eloszlás idő függvényében



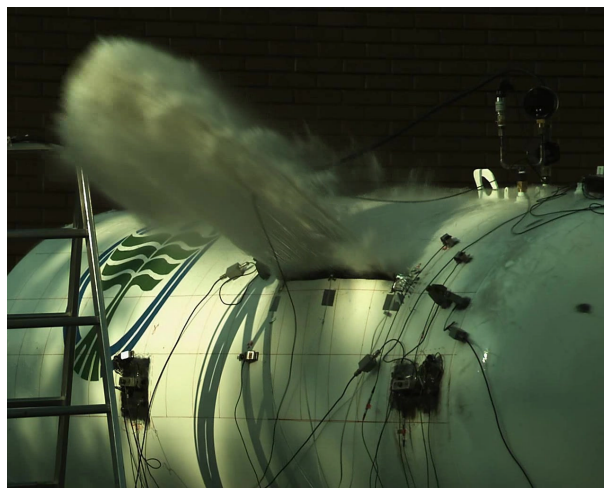
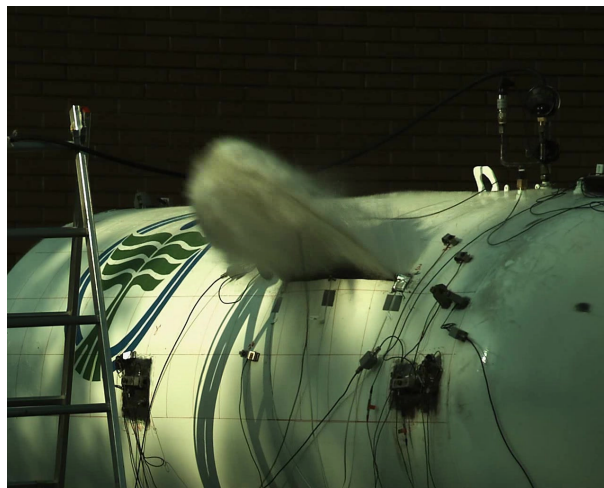
8. ábra Rezgésszám eloszlás nyomás függvényében

Az akusztikus emissziós integritás vizsgálat, mint roncsolásmentes vizsgálati módszer, a nyomástartó edények egész szerkezetében lehetőséget biztosít az aktív hibák érzékelésére, minősítésére és a vizsgálatok utólagos lefuttatására és kiértékelésére. Az aktív és intenzív hibaforrások, azaz a forráshelyek hangeseményeinek száma, energiája, és a forráshelyek kiterjedése a tartályszerkezet koncentrált hibahelyeire, belső korrózióra, zárványra, vagy repedésekre utalnak, a folyamatos RMS jelek értéke az edénytömorségre.

Minden AE vizsgálati mérést megelőző vizsgálati tervek lehetővé teszik a megfelelő számú és elhelyezésű érzékelők kiválasztását. A helyesen megválasztott vizsgálati körülmények biztosítják a szerkezeti hibák feltárását és a hibahely meghatározás pontosságát.



A roncsolásmentes vizsgálati eljárások közül az akusztikus emissziós vizsgálatokat is szabványok sorozatai és vizsgálati eljárások biztosítják, a vizsgálatot végzők tanúsításával, és jogszabályok alkalmazandó vizsgálattechnikaként írják elő alkalmazásukat.



RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATTECHNIKA

NDT TECHNICS

Tüzelőanyag cellák működés közbeni vizsgálata dinamikus neutron radiográfia alkalmazásával

Study of fuel tank in service applying the dynamic neutron radiography

BALASKÓ MÁRTON¹, HORVÁTH LÁSZLÓ¹, HORVÁTH ÁKOS¹, KRISTON ÁKOS², NEMES ÁKOS²

Kulcsszavak: tüzelőanyag cellák, neutron radiográfia, oxigén-hidrogén reakció

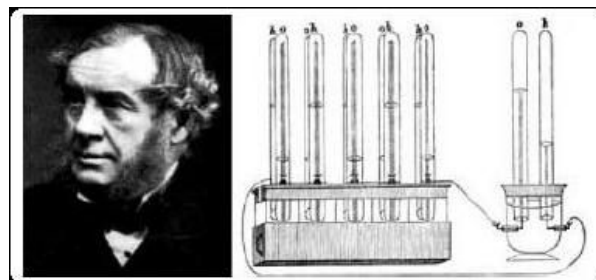
Keywords: fuel tanks, neutron radiography, oxygen-hydrogen reaction

ÖSSZEFOGLALÁS

Napjainkban a társadalom számára alapvető gondot jelent a növekvő energia igény kielégítése. Ismeretes, hogy a Föld fosszilis tüzelőanyag tartalékai végesek és a kitermelésük egyre költségesebbé válik. Az energia tömeges, környezet barát előállítására az atomerőművek alkalmasak, azonban ezeket csak több 100 MW-os blokkokban lehet hatékonyan üzemeltetni. A közlekedési eszközök és a 100 MW-nál kisebb, állandó teljesítmény leadására képes erőművek számára a tüzelőanyag cella lesz az alkalmas energiaforrás. A tüzelőanyag-cellában az elektrolízissel ellentétes folyamat zajlik: az oxigén és hidrogén reakciójánál víz és elektromos energia, valamint hő keletkezik. A cella hatékonyságát döntő módon befolyásolja a keletkező víz elvezetése. Nagyon fontos, hogy a tervezők tisztán láthassák a cellán belül a víz keletkezési körülményeit, és annak a problémamentes elvezetési lehetőségeit. A dinamikus neutron radiográfia (DNR) jelentős támogatást tud nyújtani ebben a munkában, mert a neutron sugárzás csekély veszteséggel hatol át a cella szerkezeti anyagain (grafit, vékony fémszerelvények és csekély vastagságú tömítő anyagok), de a megjelenő vizet már néhány tized milliméteres vastagságban is érzékeli.

1. BEVEZETÉS

Mielőtt elmerülnénk a tüzelőanyag cellák működési sajátosságainak elemzésében, szeretnénk egy rövid áttekintést nyújtani azok történetéről [1]. Sir William Grove fejlesztette ki az első tüzelőanyag cellát 1839-ben Angliában. Az ebben az időben végzett elektrolízises kísérletei vezettek ahhoz az elgondolásához, hogy ha az elektromos áram segítségével a vizet hidrogénre és oxigénre lehet bontani, akkor ennek a reakciónak a fordítottjával, azaz oxigén és hidrogén egyesítésével valószínűleg áramot is lehet termelni. Ez sikerült is neki, amint azt az 1. ábra szemlélteti. Abban a korban ezt az elrendezést „gázelem”-nek nevezték.



1. ábra. William Robert Grove és a tüzelőanyag cellája. A rajzon öt "gázelem" soros kapcsolása látható, amellyel vizet bont a különálló cellákban

A fenti elrendezésnek Ludwig Mond és Charles Langer adták a „tüzelőanyag cella” nevet, amikor 1889-ben megpróbálták létrehozni az első gyakorlatban is jól használható készüléket. Ez azonban csak Francis Baconnak sikerült 1932-ben, miután a drága platina elektródákat jóval olcsóbb nikkelezett fémekkel helyettesítette és a kénsavas elektrolitot pedig az elektródákat kevésbé roncsoló káliumhidroxiddal váltotta fel. 1959-ben Bacon már bemutathatta azt a készülékét, amely 5 kW villamos energiát termelt. Ez elegendő volt egy hegesztő berendezés üzemeltetésére. Az 1950-es évek végén és az 1960-as évek elején megújult az érdeklődés a tüzelőanyag cellák iránt. A NASA, az akkoriban gyártandó, ember vezette űrrepülőgépek áramellátására keresett megoldásokat. A hagyományos akkumulátorok használatát már elvetették azok súlya miatt, a napenergia túl drága volt abban az időben, míg a nukleáris energiát túl kockázatosnak tartották. Ezért esett a választás a bacon féle cellára. Ezek az erőfeszítések vezettek az első protoncserélő membrános tüzelőanyag cellák kifejlesztéséhez. A GE és a NASA együttesen fejlesztette ki ezt a technológiát a Gemini űrprogram keretén belül. Ez volt a tüzelőanyag cella első kereskedelmi alkalmazása. Az 1970-es évek alatt a tüzelőanyag technológiát a földi rendszerekhez kezdték fejleszteni. Az 1973 és 1979 közötti olaj áremelkedés elősegítette a tüzelőanyag cellák kutatását, mivel az amerikai kormány az olaj importtól való függőség megszüntetését akarta elérni. Az 1980-as évek alatt a tüzelőanyag cella technológiája különböző alkalmazási területeken, pl. az autógyártásban lett tesztelve. Az évtized technikai áttörését az jelen-

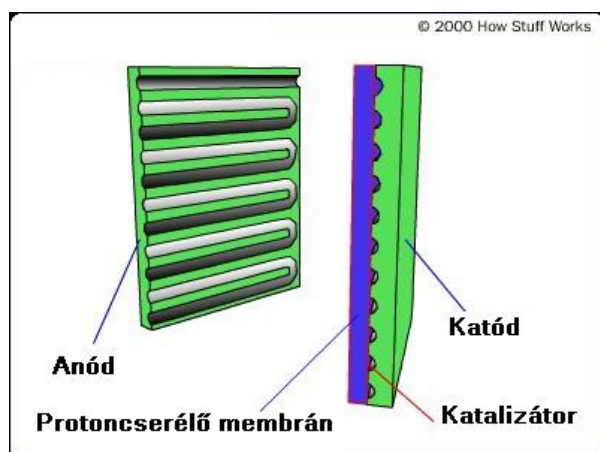
¹ MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet, 1121 Budapest Konkoly Thege-u 29-33

² ELTE TTK 2 2 Kémiai Intézet Elektrokémiai és Elektroanalitikai Laboratórium
A VII. RAKK-on (2011, Eger) elhangzott előadás nyomtatott változata

tette, mikor 1993-ban egy kanadai cég, a Ballard tüzelőanyag celláját alkalmazták egy járműben. Az első tüzelőanyag cellával ellátott buszok Chicagóban és Vancouverben lettek forgalomba állítva. Az utóbbi években kórházakban és iskolákban is telepítettek tüzelőanyag cellákat. Az Amerikai Védelmi Minisztérium 30 db tömény foszfor savas rendszer telepítését támogatta, mely rendszer minden eleme 200-200 kW villamos energiát termel, ezzel demonstrálva a technológia működőképességét valós körülmények között.

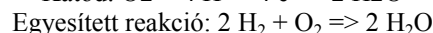
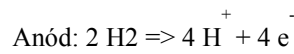
2. A TÜZELŐANYAG CELLA FELÉPÍTÉSE ÉS MŰKÖDÉSE

A tüzelőanyag cella két elektródából (anódból és katódból), katalizátorból, mely a két elektróda egymás felé néző oldalán található, valamint elektrolitból (membránból, mely lehet szilárd vagy folyékony halmazállapotú) áll. A 2. ábrán az egyik legelterjedtebb, úgynevezett protoncserélő membrános tüzelőanyag (PMEFC) cella elvi rajza látható.



2. ábra. A protoncserélő membrános tüzelőanyag cella elvi rajza

A működési elv a következő: Az anódra adott nyomáson vezetett hidrogén molekulákat a platínából készült katalizátor szétválasztja hidrogén atomokra, majd az atomok elektronjait az anódra vezetve a H^+ ionok a membránon átjutnak a katódhoz. A hidrogén ion egy pozitív töltésű protonból áll. A membránt ezért nevezik protoncserélőnek, mivel csak a hidrogén iont, azaz a protont engedi át, míg a negatív töltésű elektront nem. Az elektronok egy külső fogyasztón tudnak csak átjutni a katódra, miközben hasznos munkát végeznek. A katódra vezetett oxigén molekulák a katalizátor segítségével szintén lebomlanak oxigén atomokra, melyek az anódból - valamilyen fogyasztón keresztül - áramló elektronokkal és a membránon átjutott hidrogén ionokkal egyesülve vizet alkotnak. Ezt a folyamatot a következőképpen írhatjuk le:



A reakció során az egy cellán keletkező feszültség értéke kb. 0,7 V, a DC áramerősség pedig a másodpercenként átáramlott hidrogén és oxigéngázok mennyiségének a függvénye. Ha nagyobb feszültséget szeretnénk elérni, akkor több cellát kell sorba kapcsolnunk. Az üzemanyag celláknak több típusa létezik, melyeket az elektrolit (membrán) anyaga szerint csoportosíthatunk. A különböző elektrolitok különböző tulajdonságokkal ruházzák fel az üzemanyagcellát és a reakciók is különböző hőmérsékleten játszódnak le. Ennek megfelelően a felhasználási területük is változik az elektrolit függvényében, amelyek összehasonlításáról az Ő. táblázat nyújt áttekintést [2].

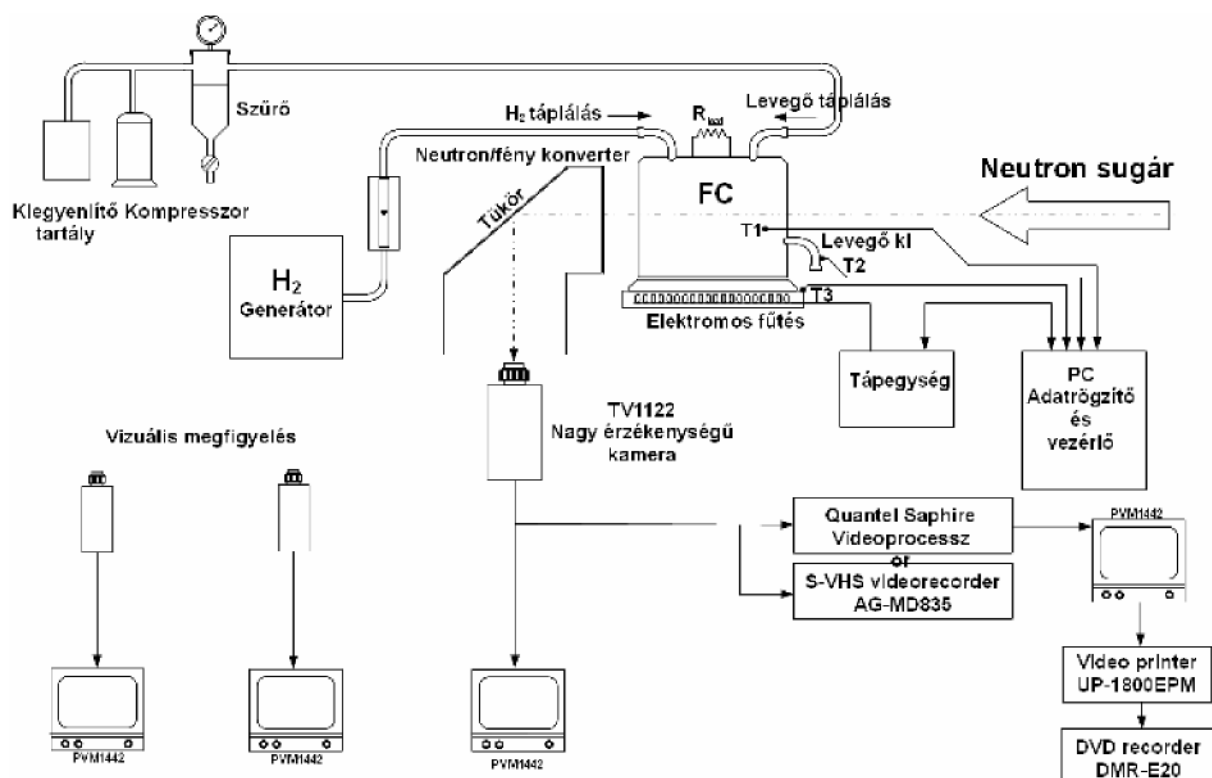
3. AZ ALKALMAZOTT MÉRÉSI TECHNIKA ÉS ESZKÖZEI

Ismeretes hogy a cella hatékonyságát döntő módon befolyásolja a keletkező víz elvezetése. Nagyon fontos, hogy a tervezők tisztán láthassák a cellán belül a víz keletkezési körülményeit, és annak a problémamentes elvezetési lehetőségeit. Erre kínál vizuális megfigyelési módszert a DNR. A tüzelőanyag cella belsejében keletkező víz tulajdonságait a Budapest kutató reaktor Dinamikus Radiográfiai állomásán [3] mértük azzal a komplex mérési elrendezéssel, amelynek vázlatos képe a 3. ábrán látható. A neutron nyaláb fluxusa 10^8 neutron $cm^{-2} sec^{-1}$, a kollimációs tényező 170, a nyaláb átmérője 155 mm. A vizsgált minta sugárzás által keltett árnyképét a neutronsugárzást fénné átalakító konverter lemez teszi láthatóvá. Az így nyert kis intenzitású fény egy tükörről reflektálódva kerül a képalkotó, távvezérelhető zoom optikával felszerelt, nagyérzékenységű tv kamerába. A 40 msec képalkotási idejű kamerának, beépített képerősítő vidikon cső a képérzékelője. A DNR kép az ellenőrző monitoron jelenik meg, és egyidejűleg S-VHS típusú video magnóval, valamint DVD készülékkel kerül rögzítésre.

A víz keletkezési folyamatának megfigyelése különleges képfelvételi technikát igényel, az úgynevezett "SHADDÖNG" módszert [4]. Ennek lényege, hogy az üres, feltöltetlen tüzelőanyag cella neutron radiográfiai képét eltároljuk a QUANTEL SAPHÖRE képfeldolgozó egység memóriájába, majd a később rögzítésre kerülő neutron radiográfiai képekből kivonjuk azt, így a cella változatlanul marad, statikus elemei elvesztik jelentőségüket a felvételek során, és ott, ahol megjelenik a víz, sötét kontrasztú, -a növekvő víz réteg vastagság növekvő sötétség tónusú képet eredményez.

Típusa	Elektrolit	Működési hőmérséklet °C	Elektromos hatásfok	Üzemanyag	Alkalmazás
AFC (alkáli)	30 % KOH oldat, gel	80	elméleti: 70% gyakorlati: 62%	- tiszta H ₂ - O ₂	Hordozható ~60 kW
PEMFC (proton-áteresztő)	protonáteresztő membrán	80	elméleti: 68% gyakorlati: 50%	- tiszta H ₂ - O ₂ - levegő	Hordozható Járművek ~80 kW
DMFC (direkt metanol)	protonáteresztő membrán	80 - 130 80-130	elméleti: 30% gyakorlati: 26%	- metanol - O ₂ - levegő	Járművek, telefonok 1 W – 70 kW
PAFC (foszforsavas)	tömény foszforsav	200	elméleti: 65% gyakorlati: 60%	- tiszta H ₂ - O ₂ - levegő	Telepített > 250 kW
MCFC (alkáli-karbonátsó)	lítium-karbonát, kálium-karbonát	650	elméleti: 65% gyakorlati: 62%	- H ₂ - földgáz - szengáz - biogáz - - levegő - O ₂	Telepített > 250 kW
SOFC (oxid-kerámia)	yttrium-cirkon oxidkerámia	800 - 1000	elméleti: 65% gyakorlati: 62%	- H ₂ - földgáz - szengáz - biogáz - - levegő - O ₂	Telepített > 250 kW

1. táblázat. Az üzemanyag cellák összehasonlítása



3. ábra Elrendezés a tüzelőanyag cella DNR mérésére

A cella üzemeltetése szempontjából fontos paraméterek, mint amilyen a betáplált hidrogén és a levegő mennyiségének, valamint nyomásának és hőmérsékletének ismerete nélkülözhetetlenül fontos volt számunkra. Ezért ezeket és a cella villamos jellemzőit, valamint a cella hőmérsékletét mértük. A villamos jellemzőket és a hőmérsékleteket elektronikusan rögzíteni is tudtuk a saját

fejlesztésű és készítésű adatkezelő rendszerünkkel. A gázok áramlási paramétereit mérő műszerek nem rendelkeznek elektronikus kimenetekkel, ezért az általuk mért értékeket, a sugár veszélyes helyre telepített tv kamerákkal, vizuálisan figyeltük meg. A gázok áramlási paramétereit mérő műszerek és a levegő nedvesség tartalmát szabályzó edény, a 4. ábrán látható módon, kompaktul szerelve lettek elhelyezve. A cella hőmérséklet

függésének mérésére a cellát egy szabályozható, villamos fűtéssel ellátott főzőlapra helyeztük.

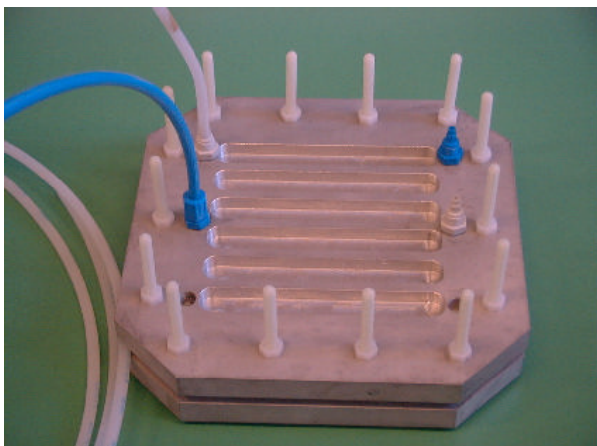


4. ábra A tüzelőanyag cellát működtető gázok mérésére szolgáló összeállítás

4. VIZSGÁLATI TÁRGY

Az összeszerelt cella fénykép felvétele az 5. ábrán látható. Az alumíniumból készült szorító lemezekben lévő kimunkált hornyok, 4 mm-re csökkentik a lemezek radiográfiai vastagságát, a legkritikusabb megfigyelési területeknél, ahol a vízképződés várható, ezzel is növelve a jelenségek észlelési lehetőségét. Az elválasztó grafit tömb és a vékony tömítések nem gyengítik számottevően a neutronos képalkotás feltételeit.

5. ábra A kísérleti tüzelőanyag cella, kikönnnyített

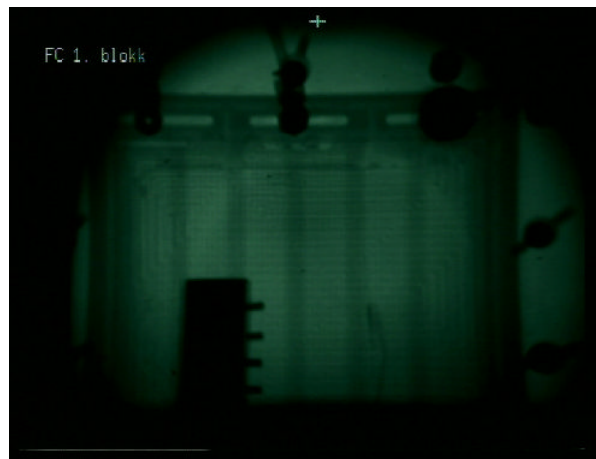


szorító lemezekkel

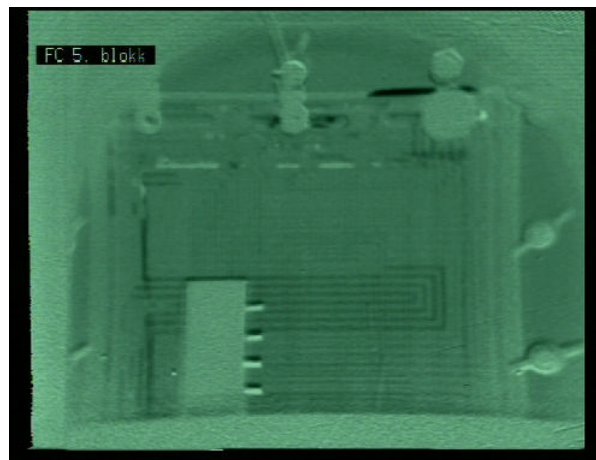
5. DINAMIKUS NEUTRON RADIográfIAI MÉRÉSEK

A 6. ábrán az összeszerelt, de még feltöltetlen tüzelőanyag cella DNR képe látható. Az ábra függőleges tagoltsága jól mutatja, a szorító lemezek kikönnnyítésének következményét. A felvétel bal alsó részében egy ék típusú víz vastagság etalon árnyképe látható. Ebben a víz vastagsága 0,5 és 25 mm között változik. Ez a kép lett eltárolva referencia felvételnként a QUANTEL

SAPPHÖRE típusú képfeldolgozó készülékünk memória egységébe, és a cella üzemelése során rögzítendő DNR képekből ez kerül kivonásra. A kép jobb alsó részében láthatók a cella hőmérsékletét érzékelő termopár vezetékai. A felső vízszintes betápláló csatornában, még az előző üzemelésből visszamaradt víz ad sötét kontrasztú képet a csatornáról. A 7. ábrán a cella SHADDÖNG képe látható az üzemeltetés kezdetén.



6. ábra Az összeszerelt, de még feltöltetlen cella DND képe

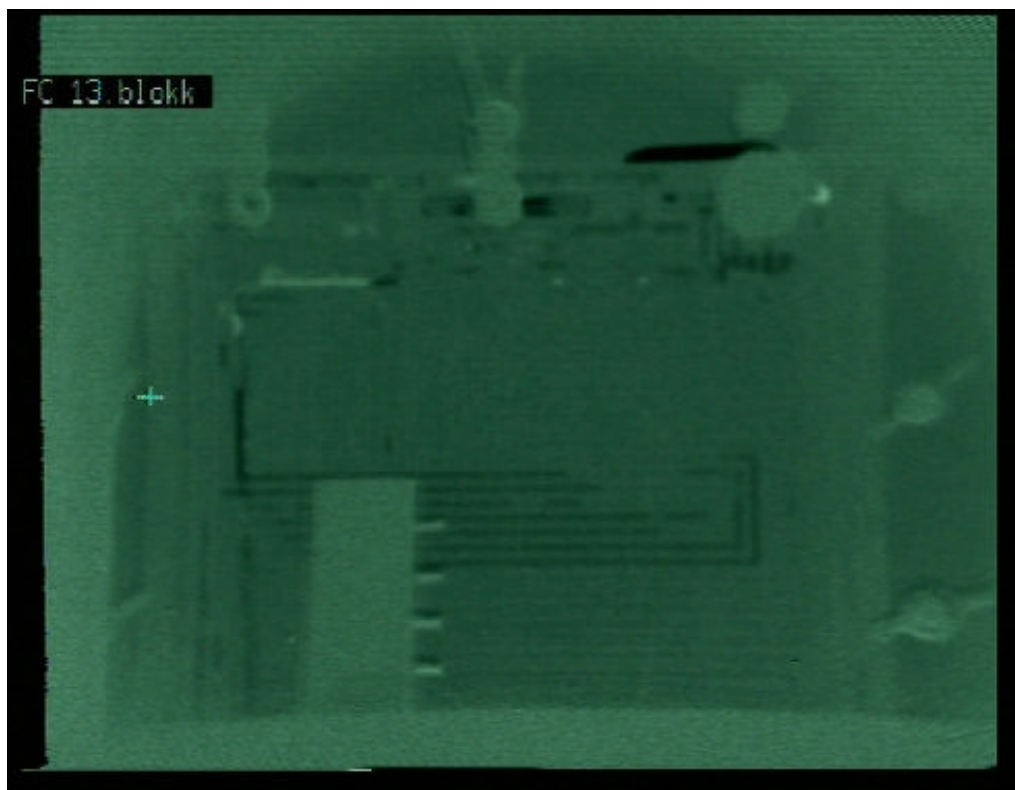


7. ábra Tüzelőanyag cella SHADDÖNG képe az üzemelés kezdetekor

A beinduló gázáramlás, az előző felvételen még sötét kontrasztot adó, visszamaradt vizet elsodorta, és a helyén áramló gáz, neutron sugárzás gyengítő hatása sokkal kisebb, ezért ezen a helyen világos tér részt érzékelünk. Az előnedvesített levegőből kiváló víz részecskék útját nyomon követhetjük a cella alsó traktusában. A cella jobb felső részén, az üzem kezdetekor kicseppenett, 6 mm vastag víz réteg, sötét kontrasztú formája figyelhető meg. A cella üzemeltetését ciklikusan megváltoztattuk, ami magával vonta a cella csatornáiban összegyűlt víz elhelyezkedésének szakaszossá válását, amint ez a 8. ábrán látható. A megismételt mérések során is sikerül kimutatnunk a részleges vizesedés jelenségét,

azonban a jelenség megszüntetésére irányuló

erőfeszítéseink nem jártak teljes sikerrel.



8. ábra Tüzelőanyag cella SHADDING képe ciklikus üzemelés eredményeként

6. KÖVETKEZTETÉS

Méréseink során bebizonyítottuk, hogy a dinamikus neutron radiográfia alkalmas eszköz a tüzelőanyag cellák víz-háztartásának a vizsgálatára

- Sikerült kimutatni a részleges vizesedést és a vizesedés lokalizációját (új jelenség)
- Elemeztük a részleges vizesedés hatását elemi cellákon és tüzelőanyag-cella rendszeren is
- További kapcsolt vizsgálatok szükségessége, komplex elektrokémiai és a dinamikus neutron radiográfiai vizsgálati berendezés fejlesztésével.

IRODALOM JEGYZÉK

- [1] fenykapu.free.energy.hu/pajert34/UCTort.html -10k
- [2] hy-go.fcell.hu/a-tuzeloanyag-cella/ -18k
- [3] M.Balaskó, E. Sváb, Dynamic neutron radiography instrumentation and applications in Central Europe, Nuclear Önstr. and Methods in Physics Research A 377, 140-143 (1996)
- [4] M.Balaskó, E. Sváb, G. Endrôczi, Combined dynamic neutron radiography and vibration diagnostics for industrial applications, Proc. 5th World Conference on Neutron Radiography, Ed. Fischer et al, DGZfp, Berlin, 1997, pp.617-622

MAKYOH-TOPOGRÁFIA: EGY OPTIKAI MÓDSZER A FELÜLETI SIMASÁG ELLENŐRZÉSÉRE
MAKYOH TOPOGRAPHY: AN OPTICAL METHOD FOR THE TESTING OF SURFACE FLATNESS

RIESZ FERENC, MAKAI JÁNOS PÉTER, LUKÁCS ISTVÁN ENDRE

Kulcsszavak: felületi simaság, felületi morfológia, optikai metrológia, geometriai optika

Keywords: surface flatness, surface morphology, optical metrology, geometrical optics

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk egy ősi elvű optikai vizsgálati eljárást ismertet tükörjellegű felületek simaságának a vizsgálatára. A módszer elve: a mintát kollimált fénynyalábbal világítjuk meg, és a visszavert nyalábot egy távoli ernyőn jelenítjük meg. A felületi egyenetlenségek fókuszáló vagy defókuszáló hatása intenzitásváltozásokat eredményez a visszavert képben. A cikkben bemutatjuk a módszer geometriai optikai modelljét, elemezzük az érzékenységet és a megvilágítás koherenciája okozta hatásokat. Alkalmazási példákat is ismertetünk elsősorban a félvezető technológia területéről.

ABSTRACT

The paper describes an optical tool for the flatness testing of mirror-like surfaces. The principle of the method is the following: the sample is illuminated by a collimated light beam and the reflected image is intercepted by a distant screen. The focusing and defocusing effects of the surface irregularities cause intensity variations in the reflected image. The paper describes the geometrical optical model of the method, analyses its sensitivity and the effect of the illumination coherence. Application examples are shown as well, mainly from the field of semiconductor technology.

BEVEZETÉS

Tükörjellegű felületek simaságának és felületi hibáinak a vizsgálatát az ipar számos területe igényli. A legfontosabb és legnagyobb igényeket támasztó alkalmazás a félvezető technológia. A szeletek felületének síktól való eltérése meggátolhatja a további megmunkálás egyes lépéseit, vagy rontja az adott megmunkálási folyamat paramétereit, így a gyártott eszközök minőségét, amely a szelét visszafordíthatatlan károsodásában vagy a selejtes termékek mennyiségében nyilvánul meg. Hasonló követelményekkel találkozunk az optikai elemeknél, egyes precíziós mechanikai alkatrészekkel valamint az optikai és

mágneses adattároló lemezekkel kapcsolatban.

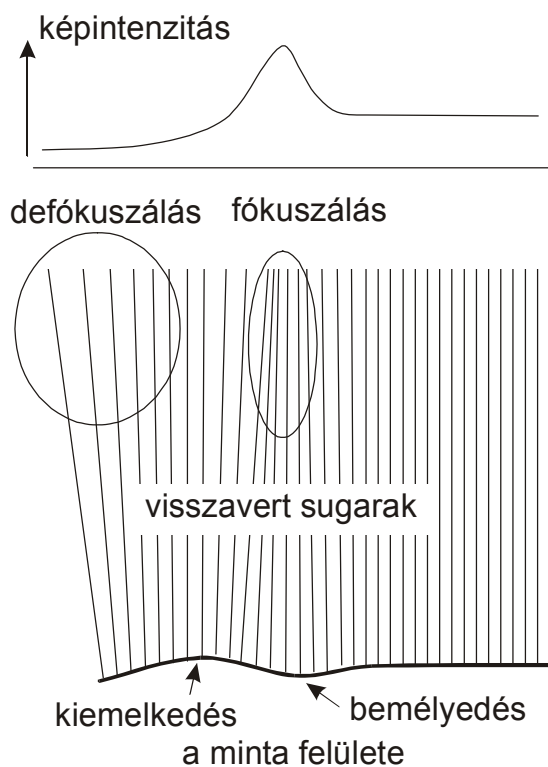
A felület síkságának az ellenőrzésére számos módszer használatos. Tapintótűs eljárással a felületi domborzat nagy pontossággal mérhető, de a módszer lassú, mechanikai mozgatót igényel és a tű a felület károsodását is okozhatja. Az érintésmentesség igényét az optikai módszerek elégítik ki, ilyenek a lézeres pásztázás, a konfokális elven alapuló pásztázó módszerek és a különféle topografikus – főként interferometrikus – módszerek.

Az 1970-es évek végén új, érdekes elvű optikai vizsgálati módszer jelent meg a felületi simaság vizsgálatára: a Makyoh-topográfia [1]. A „Makyoh” japán szó, jelentése „varázstükör”, és egy ősi eredetű, szakrális felhasználású tükört jelöl. A ránézésre közönségesnek látszó tükör, ha a felületére párhuzamos fénysugár (pl. egy résen bevilágító napfény) esik, valamilyen ábrát vetít egy néhány méter távolságban levő felületre [2]. A tükör hátoldalán domborművű ábra (pl. egy Buddha-kép) található, amely megfelel a kivetített képnek, ezzel mintegy az átlátszóság illúzióját keltve. A jelenségért a tükröző felület szabad szemmel nem látható mikrodeformációi felelősek, amelyeket a hátoldal megmunkálása okoz. A képképzés lényege pontosabban a következő: a felületre kollimált és homogén eloszlású fénynyaláb esik. Ha a felület tökéletesen sík, a felülettől távolabb eső ernyőn egy egyenes fénycsík jelenik meg. Ha azonban a felületen egyenetlenségek találhatók, ezek a visszaverődő fénysugár párhuzamosságát és így intenzitás-eloszlását megzavarják, és az ernyőn a felületi topográfiát valamilyen módon visszatükröző kép jelenik meg (1. ábra). Az elv így alkalmas tükörjellegű felületek topográfiájának a vizsgálatára. A Makyoh-topográfia további előnyei: rendkívüli egyszerűsége, olcsósága, és az, hogy nem igényel pontos beállítást. A legnagyobb hátrány a kvantitatív értelmezés korlátozottsága. Így a Makyoh elsősorban félkvantitatív, összehasonlító vizsgálatokra a legalkalmasabb.

Az eljárás leggyakoribb alkalmazása a félvezető szeletek válogatása és a szeletek gyártási – vágási, polírozási – hibáinak elemzése [1]. Beszámoltak mechanikai megmunkálási fémfelületek vizsgálatáról is [3]. Alkalmas elrendezés

MTA, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet, 1121 Budapest, Konkoly-Thege út 29-33.
e-mail: riesz@mfa.kfki.hu

esetén a módszer érzékenysége megfelel a félvezetőipar szigorú követelményeinek: 0,5 mm távolságon 50 nm mély felületi hiba detektálását is jelentették. A gyakorlatban a fentebb vázolt alap-elrendezést CCD kamerával és egyéb optikai elemekkel egészítik ki. Maktyoh elvű vizsgálóbe-rendezés kereskedelmi forgalomban is kapható.



1. ábra: A Maktyoh-topográfia képalkotásának a vázlat

Fig. 1. Scheme of Maktyoh-topography imaging

A KÉPALKOTÁS OPTIKAI MODELLJE ÉS FŐBB TULAJDONSÁGAI

A képalkotás geometriai optikai modellje a következőképpen vázolható fel [4, 5]. Vegyünk egy közelítőleg sík, $h(\mathbf{r})$ felületi domborzattal jellemezhető felületet és egy azzal párhuzamos síkú, attól L távolságban elhelyezkedő ernyőt. A mintafelület egy adott $\mathbf{r}$ helyvektorú pontjáról visszaverődő merőleges beesésű fénysugár essen az ernyő $\mathbf{f}(\mathbf{r})$ pontjába. Kis beesési szögek esetén $\mathbf{f}(\mathbf{r})$ a visszaverődés törvénye alapján felírható a következőképpen:

$$\mathbf{f}(\mathbf{r}) = \mathbf{r} - 2L \text{grad } h(\mathbf{r}). \quad (1)$$

Az ernyő $\mathbf{f}(\mathbf{r})$ pontjában mért képintenzitás, $I(\mathbf{f})$ a megvilágító sugáráramra normálva a következőképpen adható meg. Egy infinitezimálisan kis keresztmetszetű fénysugár adott pontjában mért sugáráram a fénysugár keresztmetszetével fordítottan arányos. Így $I(\mathbf{f}) = \rho |dA_r/dA_f|$, ahol dA_r és dA_f rendre a felületről visszaverődő fénysugár keresztmetszete a minta és az ernyő síkjában és

ρ a felületi reflexiós tényező (a kis beesési szög miatt a nem merőleges beesésből eredő tényezőket elhanyagoltuk). Elemi differenciálgeometriai számításokból következik [4, 5], hogy a keresett intenzitás:

$$I(\mathbf{f}) = \frac{\rho}{|(1 - 2LC_{\min})(1 - 2LC_{\max})|}, \quad (2)$$

ahol $C_{\max}$ és $C_{\min}$ rendre a maximális és minimális főgörbületek, amelyek $h(\mathbf{r})$ -ből számíthatók. Az (1) és (2) egyenletek alapján már bármely tetszőleges felület Maktyoh-képe előállítható L ismeretében.

Belátható [6], hogy ha a felület minden pontjában a lokális görbületi sugár jóval nagyobb, mint L , a képintenzitás a következőképpen közelíthető (egységnyi felületi reflexiót feltételezve):

$$I(\mathbf{r}) \approx 1 + 2L \nabla^2 h(\mathbf{r}). \quad (3)$$

A fenti egyenletekből következik, hogy kis $|L|$ mellett a mintafelület egy adott pontja és a pont képe közel lesz egymáshoz (a mintát és az ernyőt azonos síkba képzelve) és a képkontraszt fő összetevőjét a felület reflexiós tényezőjének az inhomogenitása adja. Növekvő $|L|$ megnöveli a pont és képe közti távolságot és a kép kontrasztját is. Adott felület esetén a képalkotást L határozza meg, annak helyes megválasztása tehát kulcsfontosságú. L változtatásával kényelmesen beállítható a kívánt, mintának megfelelő érzékenység.

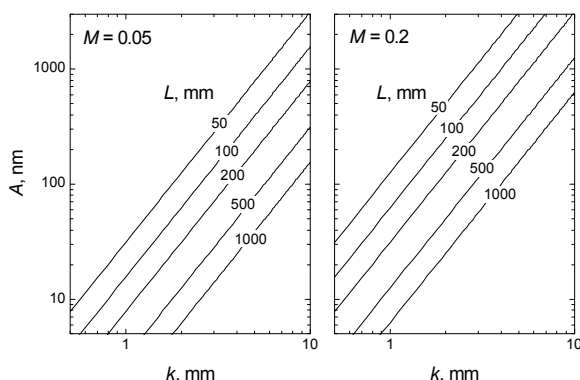
KVANTITATÍV KITERJESZTÉS

A Maktyoh-topográfia leképezését leíró egyenletek nem invertálhatóak, ezért a felületi Maktyoh kép alapján a felületi domborzat meghatározása általános esetben analitikusan nem lehetséges. Bár a kvantitatív megvalósítására történtek kísérletek iterációs algoritmusok alkalmazásával, a kiértékelés rendkívül számításigényes, és nem kellően robusztus. Célravezetőbb strukturált megvilágítás alkalmazása. Ha a homogén megvilágítást valamilyen maszk segítségével strukturáljuk, ezzel mintegy „megjelöljük” a felület bizonyos pontjait. Így az (1) egyenlet alapján a felület gradiense a megjelölt pontokban meghatározható, ha ismerjük az ideális sík felülethez tartozó pozíciót. A strukturálás legcélszerűbb megvalósítása egy négyzethálós mintájú maszk. A felületi domborzat ezután valamilyen integrálközelítő összeggel számítható ki a rácspontokban. Ezzel lényegében a Hartmann- és Shack-Hartmann-féle hullámfront-érzékelési eljárásokkal rokon módszerhez jutunk. Mivel a jelen cikk témája a kvalitatív változat, a részletekkel kapcsolatban az irodalomra utalunk [7, 8].

A MÓDSZER ÉRZÉKENYSÉGE

Mivel a kép pontjainak az intenzitásértékeit a lokális görbületek határozzák meg, a módszer érzékenységének meghatározása a mérhető *felületi magasságprofil* tekintetében elvi nehézségekbe ütközik. Célszerű az érzékenységet más módon, a következőképpen tárgyalni: kiválasztunk egy valamilyen egyszerű, jellegzetes geometriájú felületelemet, ennek Maktyoh-képét kiszámítjuk, ebből meghatározzuk a kép jellemző maximális kontrasztját, mely annak detektálhatóságára utal. Majd rögzítünk egy minimális, még éppen detektálható képkontraszt-értéket, s ebből a felületelem jellemzőit visszaszámoljuk. A módszert egy egyváltozós szinuszos felületre mutatjuk be [9]. Ez jól közelít bármilyen periodikus vagy kváziperiodikus jellegű felületet. A (2) egyenlet egyváltozós alakja alapján egy A csúcstól csúcsig mért amplitúdójú és k periódushosszú felület esetében a kontrasztra jellemző moduláció M [9] (definíció szerint $M = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$, ahol a $I_{\max}$ és $I_{\min}$ a kép maximális illetve minimális intenzitása):

$$M = AL(2\pi/k)^2. \quad (4)$$



2. ábra: A minimális detektálható A felületi amplitúdó k periódushossz és L függvényében, két különböző M modulációs értékre

Fig. 2. The detectable minimum amplitude A as a function of period k and L for two different M modulation values

A 2. ábra mutatja az e képlet alapján számított A amplitúdóértékeket L és a periódushossz függvényeként a moduláció két értékére. Az $M = 0,05$ moduláció egy ideális esetben éppen detektálható, míg az $M = 0,2$ érték egy biztonsággal észlelhető kontrasztértéket jelent. Látható pl., hogy 0,5 mm méretű felületi hiba esetén a tipikusnak mondható $L = 500$ mm mellett az érzékenység 10 nm alatt van. Fontos megjegyezni, hogy az érzékenység $M \sim 1/k^2$ jellegű, vagyis a kis méretű felületi hibákra érzékenyebb a módszer. (Termé-

szetesen a képképző rendszernek megfelelő laterális felbontással kell rendelkeznie.)

Sajnos, mivel a leképezés törvényei nemlineárisak, a fenti analízis nem terjeszthető ki általános esetben bonyolultabb felületi profilokra pl. Fourier-analízis útján.

HULLÁMOPTIKAI HATÁSOK

Bár a geometriai optikai modell csak közelítő, a legtöbb gyakorlati esetben mégis kielégítő leírást ad. Diffrakciós jelenségek ugyanis akkor kerülnek előtérbe, amikor a képsík egy pontjában sok sugár találkozik, vagy élek, nyílások stb. árnyéka mentén. A minta szélén vagy lokalizált felületi hibák körül létrejövő elhajlási csíkok illetve gyűrűk erős kontraszttal rendelkeznek, így azok többnyire jól azonosíthatóak; ezek a hibák felismerését meg is könnyíthetik.

A másik hullámoptikai hatás a szemcsekép (elterjedt angol elnevezéssel speckle) megjelenése a Maktyoh-képben. A szemcsekép egy koherens vagy részben koherens fénynyalábnak érdes felületről való visszaverődése során, a nyaláb önmagával való interferenciája útján keletkezik [10]. A Maktyoh-topográfia elrendezéséből természetesen következik, hogy ezzel a hatással számolnunk kell (ekkor az ún. objektív szemcseképet kapjuk). A jelenség metrológiai alkalmazásai szerteágazóak [10, 11], a Maktyoh-topográfiában azonban a szemcsekép mint zavaró hatás jelenik meg. A szemcsekép alapvetően statisztikus természetű; számunkra fontos két általános jellemzője az átlagos szemcseméret s és a kontraszt C . Az átlagos szemcseméret az alábbi összefüggés segítségével közelíthető:

$$s \approx \lambda \frac{L}{d}, \quad (5)$$

ahol λ a megvilágítás hullámhossza és d annak a felületrésznek az átmérője, amelyről az ernyő egy adott pontjába érkező sugarak interferenciát hoznak létre. Ideális esetben d a minta átmérője, azonban a gyakorlatban a fényforrás nem tökéletes koherenciája miatt ez kisebb is lehet. Különböző érdességű felületekkel végzett kísérleteink szerint empirikusan az $s \approx |L|/1000$ összefüggést kaptuk ($\lambda = 670$ nm és 50 μ m foltátmérő mellett), amely a $d \approx 1,5$ mm értékhez vezet.

A szemcsekép kontrasztja a felület statisztikai jellemzőitől és a megvilágítás koherencia tulajdonságaitól függ, általános esetben igen bonyolult módon [10]. Általánosságban annyi elmondható, hogy a kontraszt monoton növekszik a felületi érdességgel és $\lambda/4$ körüli rms érdesség körül egységnyi értéknél telítődik. Napjaink félvezető szeleteinek az érdessége a nm alatti tartomány-

ban van, ez a gyakorlatban észrevehetően (maximálisan néhány százaléknál) kontrasztot okoz. Leválasztott fémrétegek, kémiai marat vagy nem tökéletesen megmunkált félvezető felületek tipikusan néhányszor 10 nm érdessége azonban már nagyobb, jól észlelhető, a 10% nagyságrendjébe eső kontrasztot eredményez. Mechanikailag megmunkált fémfelületek érdessége a mikrométeres tartományban is lehet.

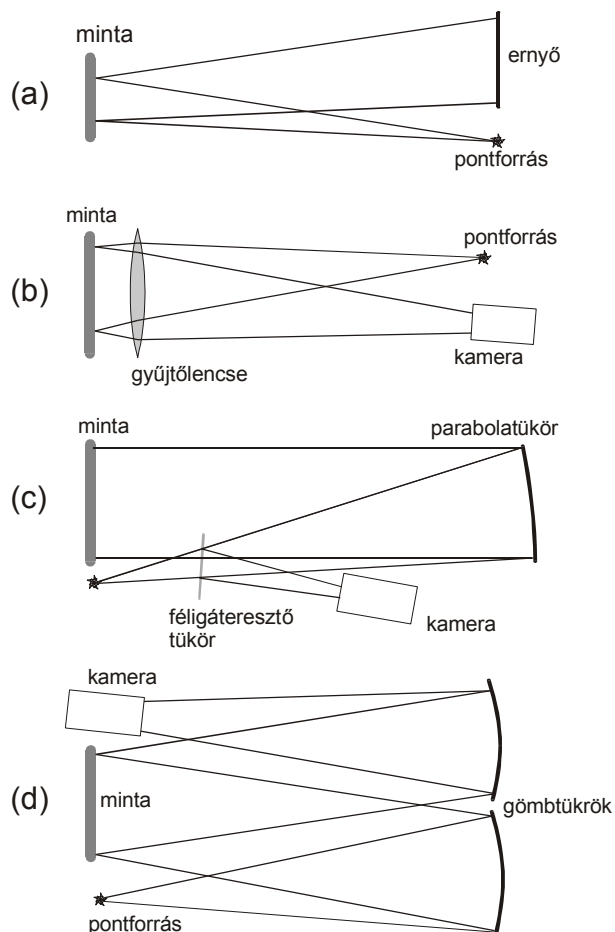
A szemcsekép megjelenésében hasonló egy kváziperiodikus textúrájú felület Maktyoh-képéhez, így azzal könnyen összetéveszthető. A két jelenség megkülönböztetésére azonban mód van az L függvényében mutatott eltérő viselkedés: (1) a szemcsekép kontrasztja csak az érdességtől függ, L -től nem, míg a Maktyoh-kép kontrasztja L -lél nő; (2) a szemcse jellemző mérete L -lél arányos, míg a Maktyoh-kép jellemző méretei nem függenek L -től (globálisan sík felületet feltételezve). Az érdességről esetlegesen rendelkezésre álló független információk alapján is eldönthető, számíthatunk-e szemcseképre. A szemcseképre a kísérleti eredményeket ismertető részben mutatunk példát.

A MAKTYOH-TOPOGRÁFIA MEGVALÓSÍTÁSA A GYAKORLATBAN

A legegyszerűbb mérési elrendezés az ősi felhasználást utánozza („templom-modell”). A kollimált megvilágítást nyalábtágítóval ellátott gázlámpa vagy távol elhelyezett pontszerű fényforrás (LED vagy izzószálas lámpa) biztosítja, a kép megjelenítésére ernyő szolgál. A fényutak hossza az érzékenységi igényektől függően akár több méter is lehet. Természetes elvárás az elrendezés méretének a csökkentése és CCD kamera használata. Ez a következő elrendezéssel valósítható meg [1, 12]: a mintához közel nagy átmérőjű gyűjtőlencse helyezkedik el; ez kollimátorként szolgál a pontszerű fényforrás és nagyítólencseként a kamera számára. Ezen összeállítás legnagyobb hátránya, hogy nagy átmérőjű minták vizsgálatára nem, vagy csak jelentős korlátozásokkal alkalmas, mivel a minta maximális mérhető területét a lencse átmérője korlátozza. Ugyanis a kollimátor/nagyító lencse nem készíthető tetszőlegesen nagy méretben lencsehibák nélkül. Ennek a problémának a megoldására tükör alapú rendszert terveztünk és építettünk meg intézetünkben [8, 13]. Az „off-axis” elrendezésben használt parabolatükör miatt nincs szférikus aberráció, a nyalábosztó alkalmazása miatt a leképezés parallaxmentes. Mint említettük, az elrendezés legnagyobb előnye a méretbeli skálázhatóság: 450 mm átmérőjű, $\lambda/20$ felületi minőségű off-axis parabolatükrök kereskedelmi forgalomban kaphatók, lehetővé téve a korszerű nagy (300 és 450 mm) átmérőjű Si szeletek vizsgálatát. Alternatív elrendezésként a megvilágító és a detektáló

fényútban külön-külön gömbtükröket tartalmazó összeállítást is építettünk és demonstráltuk működését [14]. Ezen összeállítás előnye a parabolatükros rendszerhez képest a jóval kisebb költség. A kamerát alkalmazó összeállítások esetében az ekvivalens L a kamera objektív távolságbeállításával kényelmesen, tág határok között szabályozható (L lehet negatív is).

A 3. ábra illusztrálja a fent vázolt összeállításokat.

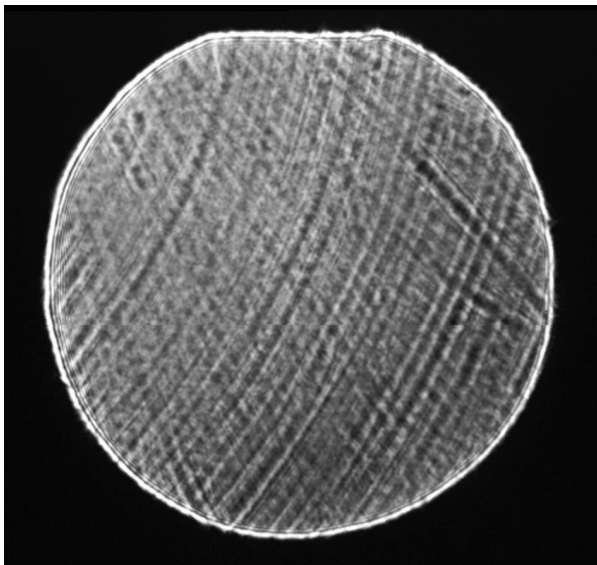


3. ábra: A gyakorlatban használt Maktyoh-topográfiás elrendezések: (a) „templom-modell”, (b) lencse alapú, (c) parabolatükör alapú és (d) gömbtükrök alapú rendszer

Fig. 3. Practical Maktyoh-topography set-ups: (a) temple model, (b) lens based, (c) paraboloid mirror based and (d) spherical mirror based set-ups

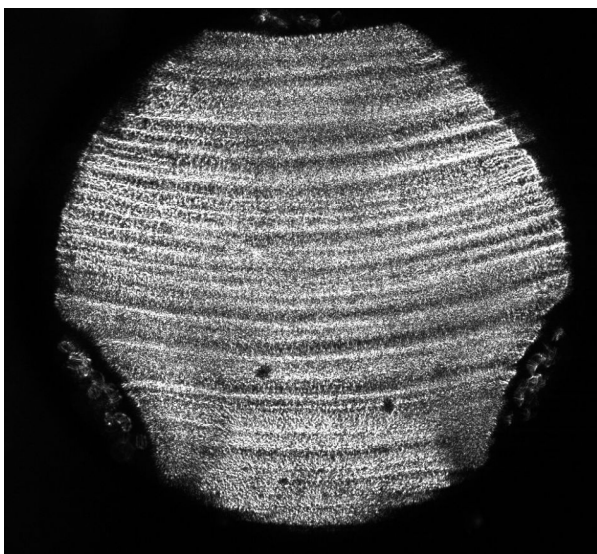
ALKALMAZÁSI PÉLDÁK

Az itt bemutatott Maktyoh-képek az intézetünkben épített lencse alapú berendezéssel [12] készültek. A 4. ábra egy félvezető szeletről készült; jól láthatóak a (feltehetően a szelet fűrése okozta) íves nyomok ($L = -480$ mm mellett).



4. ábra: Félvezető szelet Makroh-képe, feltehetően fűrészelés okozta íves nyomokkal
Fig. 4. Makroh image of a semiconductor wafer showing arc traces probably due to sawing

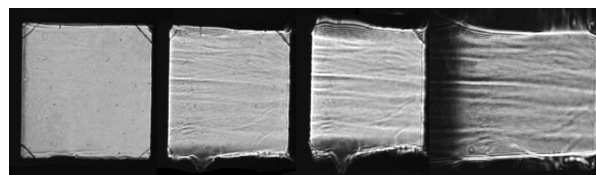
Az 5. ábrán egy félvezető szelet szabad szemmel is megfigyelhető, ismeretlen eredetű íves morfológiája látható, valamint egy „X” alakú nagyléptékű felületi alakzat is feltűnik (itt $L \approx 10$ mm). A képen erős kontrasztú szemcséképp min-tázata is megfigyelhető.



5. ábra: Egy félvezető szelet Makroh-képe, íves nyomokkal, egy „X” alakú alakzattal és erős kontrasztú szemcséképp
Fig. 5. Makroh image of a semiconductor wafer showing arc traces, an X shaped feature and strong speckle contrast

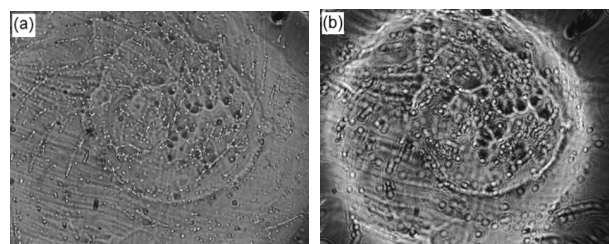
A 6. ábra egy kémiai marásnak kitett AlGaAs/GaAs félvezető heteroszerkezet Makroh-képeit mutatja különböző L beállítások mellett (0, -65 mm, -155 mm és -340 mm; a minta élhossza 16 mm). Látható, hogy a marás okozta sávos

jellegű morfológia okozta kontraszt L növelésével hogyan lesz egyre erősebb, ugyanakkor hogyan torzul a négyzet alakú szelet képe. A szelet szé-lének képén elhajlási csikrendszer is megfigyelhe-tő. A 7. ábra egy Si szeletből kémiai marással történő vékonyítással előállított membrán mart felületét mutatja $L = -80$ mm és -19 mm mellett. A képeken megfigyelhető a jellegzetes felületi morfológia valamint pontszerű hibák sokasága. A sötét foltok bemélyedésre, míg a világosak ki-emelkedésre utalnak (mivel L negatív; vö. 1. ábra). A hibák jellegzetes spirálszerű elrendező-dése a marószer áramlását jelezhetik. A nagyobb L mellett készült képen a pontszerű hibák körül elhajlási kép látható.



6. ábra: Kémiai marásnak kitett AlGaAs/GaAs heteroszerkezet Makroh-képei különböző L beállítások mellett (balról jobbra: 0, -65 mm, -155 mm és -340 mm)

Fig. 6. Makroh image of a chemically etched AlGaAs/GaAs heterostructure at different L settings (from left to right: 0, -65 mm, -155 mm)

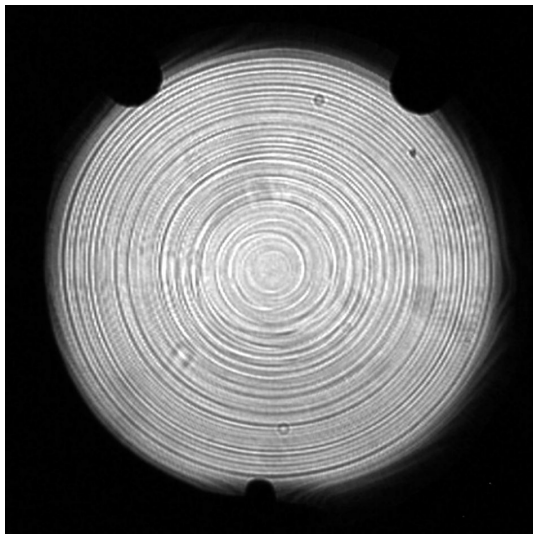


és -340 mm)

7. ábra: Kémiai marással vékonyított Si membrán mart felületének Makroh-képei (a) $L = -19$ mm és (b) -80 mm mellett.

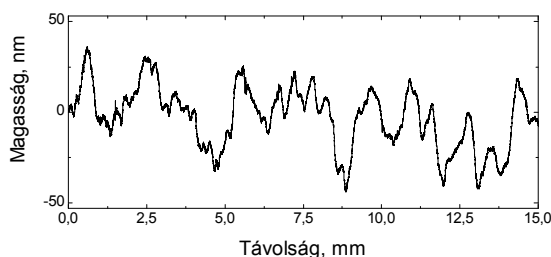
Fig. 7. Makroh images of the etched surface of a chemically thinned Si membrane at (a) $L = -19$ mm and (b) -80 mm

Az érzékenységre fent bemutatott modell érvényességét egy úgynevezett „swirl” felületi hibával rendelkező Si szeleten is kipróbáltuk [15]. A swirl hiba erős p adalékolású szeleteknél fordul elő, az egykristályöntecs növesztése közben keletkezik és a felületen egy koncentrikus körök-ből álló, kváziperiodikus jellegű keresztmetszeti profillal rendelkező morfológiai hibaként jelentke-zik. A 8. ábra egy jellegzetes Makroh-képet mutat (ez a parabolatükrös összeállítással készült, $L = 390$ mm; a szelet átmérője 75 mm). A tapintótűs profil (9. ábra) átlagosan 50 nm amplitúdót muta-tott.



8. ábra: Swirl-hibát tartalmazó Si szelet Makyo-képe

Fig. 8. Makyo image of a Si wafer with swirl defect



9. ábra: A fenti szelet egy sugárirányú metszetének a tapintótűs méréssel mért magasságprofilja

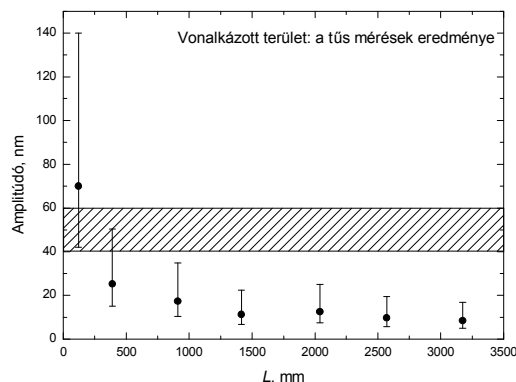
Fig. 9. Surface stylus scan of the wafer shown above along its radius

A 10. ábra mutatja a Makyo-képek intenzitásértékeiből a (4) egyenletből a különböző L értékek esetén számított elméleti amplitúdó értékeket. Látható, hogy a modell egyszerűsége és erősen közelítő jellege ellenére a tapintótűs mérésekkel az egyezés kielégítő. A számított értékekben mutatkozó egyértelmű tendencia valamilyen valós fizikai hatásra utal: a valószínű ok az, hogy a növekvő L mellett egyre inkább „elkenődik” az ideális profil, ezáltal csökken a moduláció és így a számított amplitúdó is. Ez a mérés egyben egy kísérletileg igazolt érzékenységet is meghatároz: ez a kb. 1.5 mm periódushosszon jobb, mint 50 nm. Megjegyezzük, hogy $L = 120$ mm mellett a mintázat már biztonsággal észlelhető volt.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők ezúton is köszönik a következő munkatársaik segítségét: Bársony István, Réti István, Eördögh Imre, Csákó Tamás és Szörényi Tamás. A kutatómunkát az Országos Tudomá-

nyos Kutatási Alap (K 68534 sz. szerződés) támogatta.



10. ábra: A fenti szelet Makyo-intenzitásértékekből számított felületiprofil-amplitúdói L függvényében

Fig. 10. Surface profile amplitudes inferred from the Makyo intensities as a function of L for the wafer studied above

IRODALOM

- [1] P. Blaustein, S. Hahn, Solid State Technol. **32** (1989) 27.
- [2] Riesz F., Élet és Tudomány **55** (2000) 41.
- [3] T. Shiomi, T. Hirogaki, E. Aoyama, K. Ogawa, Proc. AMPT 2006, Jul. 30 – Aug. 3, 2006, Las Vegas, USA, pp. 1-4.
- [4] F. Riesz, J. Phys. D: Appl. Phys. **33** (2000) 3033.
- [5] Riesz F., Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat **133** (2000) 315.
- [6] M. V. Berry, Eur. J. Phys. **27** (2006) 109.
- [7] Riesz F., Lukács I. E., Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat **138** (2005) 45.
- [8] F. Riesz, I. E. Lukács, J. P. Makai, Proc. SPIE **6616** (2007) 66160L.
- [9] F. Riesz, Phys. Stat. Sol. C **6** (2009) 1948.
- [10] J. W. Goodman, Statistical properties of laser speckle patterns, in: J.C. Dainty (Ed.), Laser speckle and related phenomena, Springer, New York, 1984, pp. 9-75.
- [11] Horváth B., Anyagvizsgálók Lapja **18** (2008) 46.
- [12] Szabó J., Makai J., Elektronikai technológia, mikrotechnika **32** (1993) 15.
- [13] I. E. Lukács, J. P. Makai, L. Pfitzner, F. Riesz, B. Szentpáli, European Patent EP 1 434 981 B1, July 5, 2006; US Patent 7,133,140 B2, November 7, 2006.
- [14] J. P. Makai, F. Riesz, I. E. Lukács, Proc. Third International Conference on Metrology, Tel Aviv, November 14-16, 2006.
- [15] F. Riesz, A. E. Pap, M. Ádám, I. E. Lukács, Thin Solid Films **516** (2008) 8087.

Gyakorlati tapasztalatok hegesztett kötések eljárás vizsgálatában Practical Experience in Study of Welded Joints

LEHOCZKY JUDIT, FODOR OLIVÉR

Kulcsszavak: hegesztett kötések, makró felvételek, metallográfiai vizsgálatok, jellegzetes hegesztési hibák
Keywords: welded joints, macrograph images, metallographic test, characteristic welding defects

A hegesztéssel foglalkozó iparvállalatok, egy új hegesztett kötésfajta gyakorlatban történő bevezetése előtt, a tapasztalatokra, az irodalomra, illetve a kereskedői ajánlásokra támaszkodva meg kell, hogy tervezzék az alkalmazott technológiát. Az így megtervezett technológia ipari körülmények között végzett próbahegesztését elvégezve és azt valamilyen roncsolásmentes, roncsolásos vizsgálattal ellenőrizve kerül igazolására az elgondolt hegesztett kötés megfelelősége. Röviden ezt nevezzük eljárásvizsgálatnak.

A piac számos területén (pl. nyomástartó edények gyártása, átalakítása) az eljárás vizsgálati próbadarab hegesztésének körülményei, az elvégzendő vizsgálatok mennyisége és körülményei szabályozva vannak, szabványokban leírva. A mi gyakorlatunkban az EN szabványok közül a 15614-es sorozat a TÜVIS HP előírásai mértékadóak a leggyakrabban.

Ezek jól körülhatároltan, néha túlzottan is megkövetelik a technológia leírását WPS (Welding Procedure Specification) lapon.

A WPS lapokon szereplő adatok alapján a kötésnek reprodukálhatónak kell lennie. Az itt szereplő adatok közül a vizsgálatok szempontjából a kötés kialakításáról, felépítéséről készült vázlat és az eljárás-vizsgálati szabvány megnevezés a legfontosabb. ez utóbbi határozza meg az elvégzendő vizsgálatok mennyiségét köztük a metallográfiai vizsgálatokat is.

Az előírások és bonyolultabb esetekben a gyártó és/vagy a tanúsító szakemberek a következő roncsolásmentes és roncsolásos vizsgálatok közül válogatnak:

- vizuális vizsgálat
- felületi repedésmentesség ellenőrzés (folyadékbehatolásos, mágnesezhető poros),
- radiográfiai és/vagy ultrahangos vizsgálat,

Az 5. AGY konferencián 2010-ben elhangzott előadás írott változata
AEF Laboratórium Kft.

- szakítóvizsgálat (kötésszakító, ömledék szakító),
- hajlító vizsgálat (normál, oldalhajlító),
- ütővizsgálat (ömledékből, hőhatásövezetből esetleg alapanyagból, néha a lemez síkja merőleges bemetszéssel, gyakorlatilag csak ISO Charpy V bemetszéssel),
- keménységvizsgálat (néha mikro keménységmérés),
- makroszkópos, egyes anyagminőségek-nél mikroszkópos vizsgálatok,
- összetétel vizsgálat ömledékből,
- δ ferrittartalom mérés,
- egyes kötésfajtáknál speciálisnak tekinthető mechanikai vizsgálatok (ponthegeztetés „kigomboló” vizsgálata, csővég behegeztetés, „kihúzó” vizsgálata, plattírozott lemezek nyíró vizsgálata),
- korróziós vizsgálatok

A mi gyakorlatunkban fárasztó, kúszási törésmechanikai vagy bemetszés érzékenységi vizsgálatok nem fordulnak elő.

Egyes vizsgálatok áttekintése alapján, azok eredményeiről a következőket mondhatjuk:

A próbadarabok vizuális vizsgálatát a tanúsító általában elvégzi, így azokon nem megengedhető eltérés csak elvétve fordul elő. A próbadarabok végleges elkészítése előtt a gyártó és annak hegesztési felelőse a technológiát a hegesztőkkel alaposan begyakorolhatja, így felületi hiba előfordulásának a valószínűsége nagyon kicsi.

Kicsit más a helyzet a belső hibákkal, itt leggyakrabban térfogati hibák, gázzárványok, ritkábban salakzárványok fordulnak elő, illetve a nem megfelelés leggyakoribb oka a kötésihibák jelenléte.

A mechanikai vizsgálatok során a szakítóvizsgálatok eredményei a legritkábban előforduló probléma. A hajlító vizsgálatok eredményei alapján kell a legtöbbször újra hegeszteni a darabokat.

Az ütőmunka vizsgálatok során nagyon kevés alkalommal válik nem megfelelővé egy-egy he-

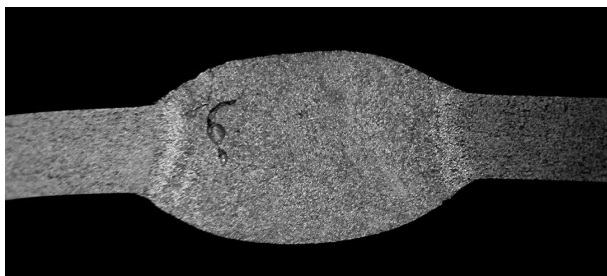
gesztési kötés, az ütő próbatestek feltűnő nagy szórást mutatnak, ennek természetes oka a varrat és környezetének inhomogén állapota. A hőhatás övezetből kivett próbatestek bemetszési környezete az esetek jelentős részében változó mértékben tartalmazza a hőhatásövezetet.

A kötések keménységvizsgálata nagyon ritkán ad kedvezőtlen eredményt, elenyésző számban fordult elő, hogy a mai szabványok által pl. ötvözetlen acélok esetében a kötésre előírt 380 HV10 értéknél nagyobb adódjon.

A felsorolásban még szerepelt δ ferrittartalom mérés, kémiai összetétel meghatározás, illetve korróziós vizsgálatok viszonylag kis előfordulási gyakorisága miatt általános tapasztalatokról nem tudunk beszámolni, de azt elmondhatjuk, hogy ezek a vizsgálati módszerek a bonyolultabb és nehezebben kivitelezhető hegesztett kötéseknel fordulnak elő, és ezért nem mindig jók a kapott eredmények.

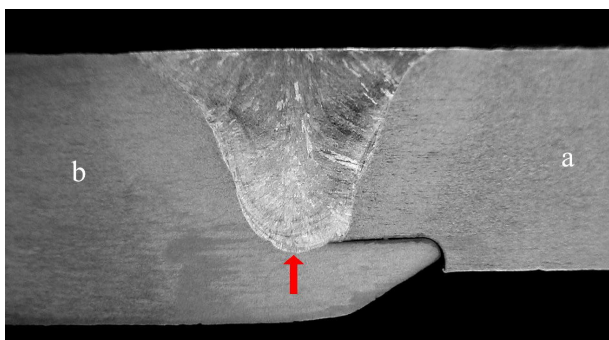
A makroszkópos és mikroszkópos vizsgálatok során számos érdekes varrattal, hibás szövet-szerkezettel találkozunk, szeretnénk ezek közül néhányat bemutatni.

Az 1. ábrán, amely egy 2 mm-es ötvözött alumínium lemez tompakötését mutatja, megfigyelhető az ömledékben egy folytonossági hiány.



1. ábra

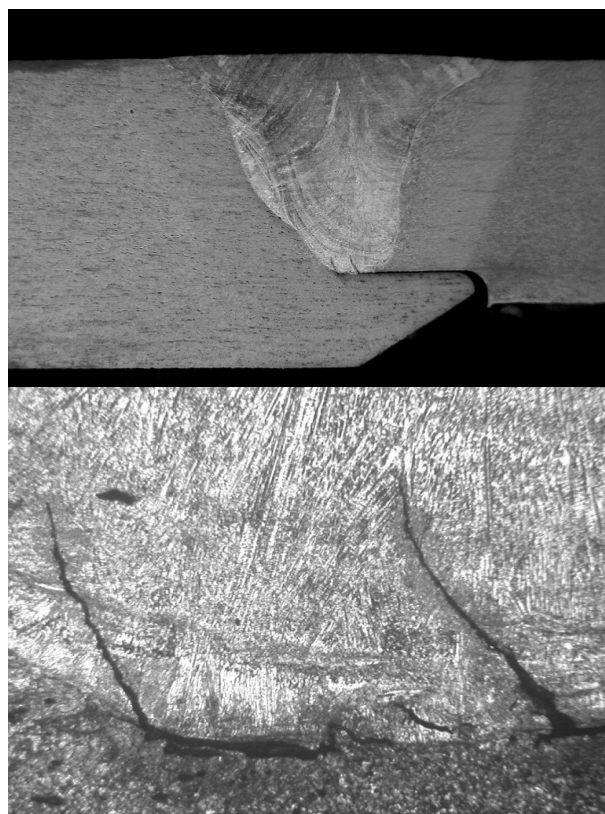
Tompakötések illesztési nehézségeinek elkerülése érdekében, nyomástartó edények fenékpálcát körvarratnál szívesen alkalmaznak 2. ábrán látható megoldást.



2. ábra

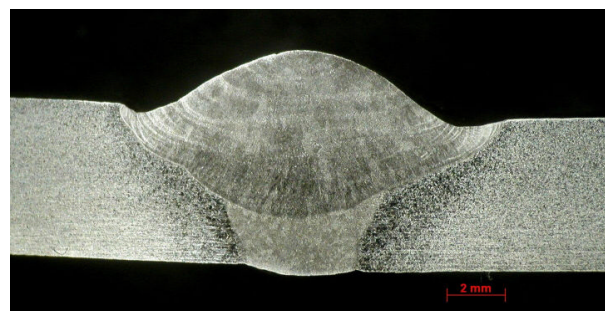
Ha a két összehegesztendő alkatrész (a és b jelű) megfelelő kimunkálásával elkerülhetők a kötés illesztési hibái, azonban a nyíllal jelzett helyen a megfelelő beolvadás kialakítása gondos kivitelezést igényel, a beolvadási mélység itt is éppen csak elegendő.

Az előző varrat egy másik metszetében (3. ábra), már rosszabb a helyzet, a gyökérszélről repedések indulnak ki, ez különösen jól megfigyelhető a kritikus rész nagyításában (alacsony karbon tartalmú szénacél).



3. ábra

A 4. ábra egy 1.4541-es ausztenites korrózióálló acélon a meg nem engedhető szélkiolvadásra



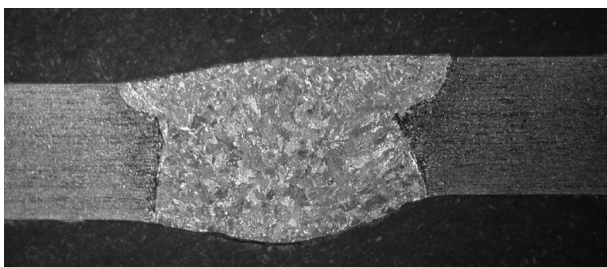
mutat példát. Az 5. ábrán pedig egy P235TR1 szénacél gyökoldali beszívódása figyelhető meg.

4. ábra



5. ábra

A 6. ábrán 3,5 mm vastag 1.4301 ausztenites acél él eltolódása látható.



6. ábra

Jellemzően, a 2 mm-es szelvényméretű ötvözött alumínium hegesztésénél a 7. ábra szerinti elégtelen átolvadás következtében, repedés alakult ki.



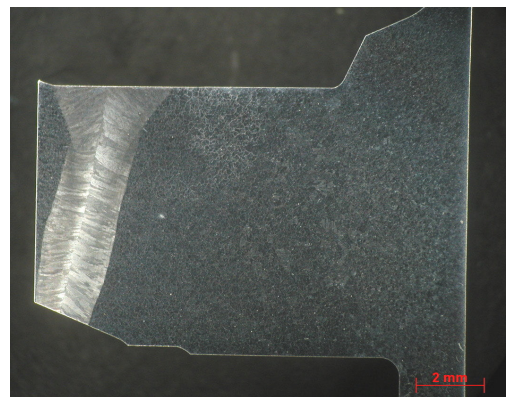
7. ábra

A 8. ábrán 8 mm-es lemezvastagságú ötvöztelen acéllemezen, összefüggésben a nem szokásos leélezéssel nagyméretű kötészhiba alakult ki.

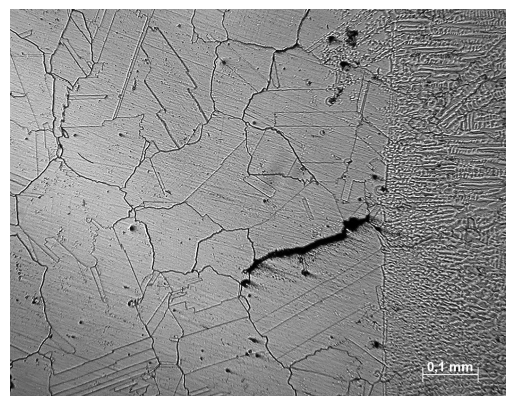


8. ábra

A 9. ábrán egy nikkelbázisú szuperötvözet lézerhegesztett varrata látható, de csak az első pillantásra tűnik minden rendben lévőnek, mert a hőhatásövezetben (10. ábra) mikrorepedés fedezhető fel.

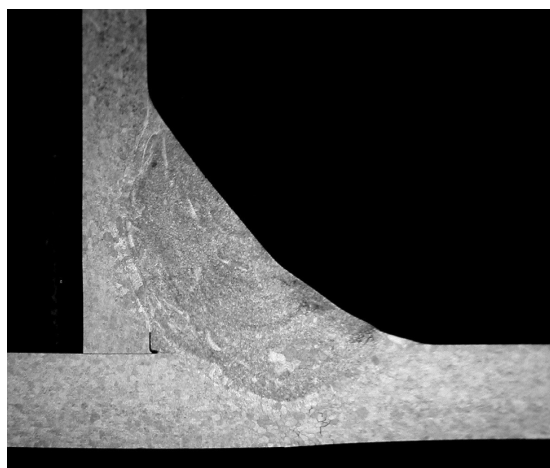


9. ábra



10. ábra

A sarokvarratoknál többször fordul elő hiba, mint a tompavarratoknál, itt is a jellemző hiba az esetek 90 %-ban beolvadás, átolvadás hiánya.



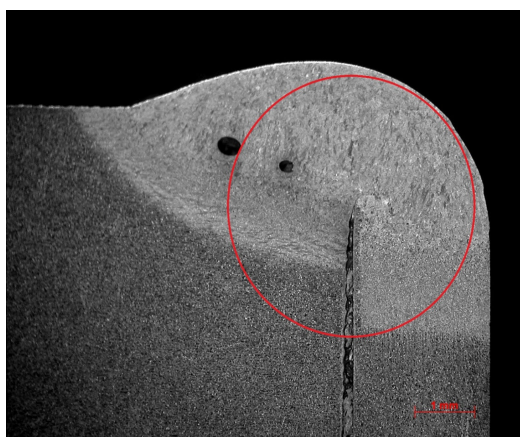
11. ábra

A 11. ábrán ötvözött alumínium (2/1,6 mm) tompavarratának beolvadási hiányos kötése látható. Ausztenites acél (1.4301) rossz sarokkötése látható a 12. ábrán, illetve egy hasonlóan

sikertelen kötés szénacélnál 13. ábra (Lv 4/2 mm).



12. ábra

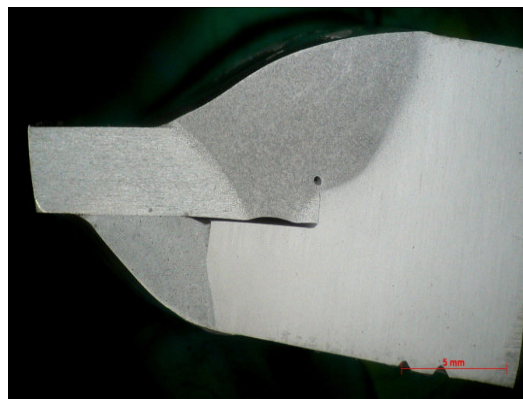


13. ábra

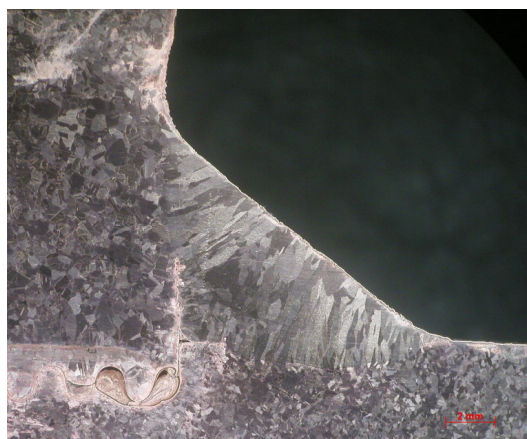
Egyes előírásoknál a csővégehegesztésnél, az elvárt varrat keresztmetszet a cső falvastagságának legkevesebb 90 % kell, hogy legyen.

Ez a követelményt a 13. ábrán bemutatott ötvöztlen acélkötés teljesíti, és a gázpórusok is a megengedhető méret alatt maradtak, de a gyökben mikro repedések láthatók.

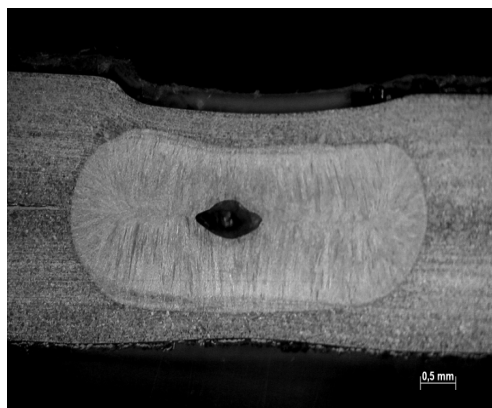
Néhány különleges esettel folytatva: ötvöztött alumínium érdekes varratkialakítása látható a 14. ábrán, sárgaréz hegesztési varrata a 15. ábrán. 16. ábrán ausztenites acél ponthegeesztése, nagy hibával az ömledékben.



14. ábra



15. ábra



16. ábra

ACÉL HEGESZTETT KÖTÉSEKRŐL KÉSZÜLT RADIOGRÁFIAI FILMEK ÉRTÉKELÉSÉNEK KÖRVIZSGÁLATA - EREDMÉNYEK ÉS TAPASZTALATOK

RESULTS AND EXPERIENCES OF ROUND ROBIN TEST OF RADIOGRAPHS ABOUT STEEL WELDED JOINTS

FÜCSÖK FERENC¹ - HÁMORNIK BALÁZS²

Kulcsszavak: körvizsgálat, hegesztési varrat, radiológiai filmértékelés, POD, PFC

Keywords: Round Robin Test, welded joints, evaluation of radiographs, , POD, PFC

ÖSSZEFOGLALÁS

A Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség második körvizsgálatának témája a hegesztési varratokról készült radiográfiai varratok értékelése volt. A szervezők fel kívánták mérni a laboratóriumokban dolgozó radiológusok észlelési megbízhatóságát és teljesítményét hegesztési varratokról készült felvételek értékelésében. E célkitűzés eredményét és tapasztalatait mutatjuk be.

A résztvevőknek 20 db acél hegesztett kötések-ről készített radiográfiai felvételt kellett értékelni az MSZ EN 12517-1:2006 jelzésű szabvány 1. átvételi szintjének követelményei szerint. Mindegyik film tartalmazott folytonossági hiányt. A körvizsgálaton 15 laboratórium és három személy vett részt. Ők már megkapták a körvizsgálat értékelését tartalmazó zárójelentést, melyben eredményeiket a kódszámuk alapján tudták azonosítani.

A körvizsgálat értékelését a „Statistikai értékelés észlelési feladatot tartalmazó körvizsgálathoz” című MAROVISZ dokumentum alapján SSPS Statistics 19 statisztikai programcsomag segítségével végeztük. Minden résztvevőnek meghatároztuk a ROC diagramját, (Reliability Operating Characteristic = megbízhatósági működési jelleg-görbe) melyben az x tengelyre a téves detektálás valószínűségét, az y tengelyre a helyes észlelés valószínűségét mértük fel.

Meghatároztuk a résztvevők észlelési valószínűségének görbét, (POD) is. Ez a görbe az egyén észlelésének valószínűségét mutatja be a hiány jellemzőjének függvényében. A jellemzőnek ebben az esetben a hiány és a környezetének fektetés különbségét vettük. A valószínűségi görbe alakja függvénye a vizsgálati módszernek, a vizsgáló személynek és az értékelés körülményeinek is. Legfontosabb jellemzője, hogy eléri-e, és melyik méretnél, a 0,95 (azaz a 95 %) értéket. E diagram alapján minden résztvevő meg tudta határozni észlelési érzékenységét.

¹ a körvizsgálat koordinátora, Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség

² PhD hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Ergonómia és Pszichológia Tanszék,
A VII. RAKK-on (2011, Eger) elhangzott előadás nyomtatott változata

A cikkben javaslatot teszünk a radiológiai film-értékelés megbízhatóságának javítására is.

BEVEZETÉS

A Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség (MAROVISZ) Vezetősége 2008. évben elhatározta, hogy jártassági vizsgálatokat szervez tagjai és az érdeklődő laboratóriumok részére. A jártassági vizsgálatok fontos eszközök a mérési eredmények minőségének ellenőrzésében. Az MSZ EN ISO/IEC17025:2005 szabványnak [1] megfelelően a laboratóriumoknak rendelkezniük kell minőségirányítási eljárásokkal a végzett vizsgálatok és kalibrálások érvényességének figyelemmel kísérésére. E feladat teljesítésének egyik módja, ha részt vesznek laboratóriumok közötti összehasonlításban vagy felkészültség vizsgáló programokban.

A Vezetőség a második körvizsgálat céljának a hegesztési varratokról készült radiográfiai filmek értékelésének laboratóriumok közötti összehasonlítását tűzte ki. Ezzel a MAROVISZ lehetőséget nyújtott a résztvevőknek az értékelés során nyújtott teljesítőképességük bizonyítására, és a laboratóriumok segítséget kaptak a szolgáltatások minőségének javítására, valamint az akkreditálási feltételek teljesítésére.

A KÖRVIZSGÁLAT BEMUTATÁSA

A Szövetség a feltételek megteremtése után a hegesztési varratokról készült radiográfiai filmek értékelése jártassági vizsgálatot 2010. június 18. -án hirdette meg. Az utolsó vizsgálat eredményének megérkezése után a körvizsgálatot 2011. február 14. -én fejeztük be.

A körvizsgálat célja hegesztési varratokról készült radiográfiai filmek szabvány szerinti értékelésének laboratóriumok közötti összehasonlítása volt.

A körvizsgálat tárgya acéllemezek hegesztési varratairól készült 20 darab radiográfiai film értékelése a MSZ EN 12517-1:2006 szabvány [2] 2. táblázat 1. átvételi szintjének megfelelően.

A körvizsgálatban való részvétel nem volt korlátozva, valamennyi érdeklődő, laboratórium, vagy a labor egy munkatársa, részt vehetett benne. A

részvevők egyéni kódot kaptak, így az elért eredményt csak a tulajdonosa tudta azonosítani.

A körvizsgálathoz három, egyenként 20 darab-
ból álló, radiográfiai filmkészlet állt rendelkezésre.
A filmek jó minőségű digitális másolatok, a nyom-
tatást csak kb. 10 X nagyítással lehet észlelni. A
filmek a hegesztési varratokat és környéküket
tartalmazzák, ezért azokat papír keretbe foglaltuk.
A kereten ROC 11 –től ROC 30 –ig terjedő jelzé-
sek láthatók, ezekkel azonosítottuk a filmeket és
az értékelés eredményeit.

A filmek döntő többsége 20 cm hosszú hegesz-
tési varratszakaszt mutat be. Ettől eltérő hosszú-
ságú varratot 4 film tartalmaz (3 db 11 cm, 1db 16
cm), így összesen 369 cm varrat volt az értékelés
tárgya.

A körvizsgálat adatainak összehasonlíthatósá-
ga szempontjából fontos, hogy minden résztvevő
azonos tulajdonságú (homogén) próbatestet
vizsgáljon. Ezért kísértük figyelemmel a filmek
homogenitását. A filmértékelés szempontjából a
filmeket homogéneknek tekintjük, ha a körvizsgálat
idején nem éri őket durva mechanikus- vagy
hőhatás. Mivel a körvizsgálat befejezése után a
filmek állapota azonos volt a kezdeti állapottal, a
vizsgálat tárgyát homogénnek tekinthettük.

A körvizsgálatban 16 laboratórium vett részt,
közülük 2 résztvevőtől még további 1 - 1 db, ös-
szesen 18 db mérési eredmény érkezett. Ez a 2
labor kihasználta azt a lehetőséget, hogy a szer-
vezők egy helyről érkező több adat értékelését is
vállalták. A résztvevő laboratóriumok neve és
székhelye az 1. táblázatban olvasható.

Részvevő neve	Székhelye
AGMI ZRt.	1211 Budapest, Központi út 24-26.
Albera '97 Kft.	3532 Miskolc, Böngér u. 3/a.
BorsodChem ZRt.	3700 Kazincbarcika, Bolyai tér 1.
Csőszer Labor Kft.	1182 Budapest, Balogh Gábor út 15.
Debreceni Egyetem	Debrecen, Ótemető utca 2 – 4.
Gamma – Controll Kft.	6726 Szeged, Túzok út 8/a
Gázipari Gépgyár Kft.	8800 Nagykanizsa, Erdész út 28.
GIB Aktivitás Kft.	1213 Budapest, Borz utca. 7.
ISD-Dunaferr ZRt.	2400 Dunaújváros, Vasmű tér 1-3.
MINELL Kft.	1116 Budapest, Fehérvári út 130/a.
Paksi Atomerőmű ZRt.	7031 Paks, Pf. 71.
Powertest Kft.	1041 Budapest, Kassai u. 54.
Röntgen Kanizsa Kft.	8800 Nagykanizsa, Csengery út 43.
R.U.M. Testing Kft.	1163 Budapest, Batsányi János út 55.
Széchenyi István Egyetem	9026 Győr, Egyetem tér 1.
Tiszai Vegyi Kombinát NyRt.	3581 Tiszaújváros, Pf. 20.

1. táblázat. A résztvevők felsorolása

A szervezést a MAROVISZ Titkársága végezte,
a Körvizsgálatok Szabályzatában előírt módon. Az
adatforgalom a korvizsgalat@marovisz.hu elekt-
ronikus címen bonyolódott.

A résztvevők az értékelendő filmek mellé a mé-
rés eredmények rögzítésére szolgáló üres, Mérési
lapok nevű Excel fájlt kaptak. Ebben a fájlban a
hiányok lapja nevű munkalapon a hibák szabvá-
nyos rögzítését lehetett elvégezni, továbbá a hely-

típus nevű lapon az észlelt hibák típusonkénti bejelölésével, térképszerű ábrázolással kellett az értékelést segíteni.

Ugyancsak a mérés végrehajtását segítette az **Útmutató a körvizsgálati mérés elvégzéséhez** című mérési leírás, valamint a filmekben szereplő hegesztések adatait összefoglaló adatlap.

A részletes előkészítés, és a laboratóriumok gondos munkájának köszönhetően minden beküldött mérési eredmény értékelhető volt.

A JÁRTASSÁGI VIZSGÁLAT ÉRTÉKELÉSE

A mérési adatok értékelését a MAROVISZ Körvizsgálatok Szabályzatának **KV-SZ-01 M 02** jelű melléklete alapján készítettük. Ennek megfelelően a helyes észlelés valószínűségének és a téves detektálás valószínűségének meghatározásával, valamint ezen adatokból a vizsgálat teljesítőképességének számításával végeztük az ROC értékelést. Mivel a filmek elegendő számú különböző méretű és tulajdonságú hiányt tartalmaztak, az észlelés valószínűségének görbét is meghatároztuk.

A KONVENCIONÁLIS VALÓDI ÉRTÉK MEGHATÁROZÁSA

Minden körvizsgálat legfontosabb kérdése, hogy a vizsgált tulajdonságnak mit tekintünk a valós, más szóval helyes értékének. A metrológiai meghatározás szerint ezt az értéket nem is lehet meghatározni, csak az adott célnak megfelelő pontossággal megközelíteni. Ha a közelítő értékben megegyeztünk, akkor a konvencionális valódi értéket határoztuk meg. A roncsolásmentes vizsgálatoknál külön probléma, hogy csak körülményesen, más módszerekkel, esetleg roncsolással tudjuk meghatározni a hiányok valós értékét. A módszerek áttekintésével most nem foglalkozunk.

A körvizsgálatnál használt radiográfiai filmek digitalizálásának célja a jó minőségű másolatok készítése volt. Ezzel kívántuk elérni, hogy a körvizsgálat gyorsan lebonyolítható legyen, és az esetlegesen elvesző, vagy megsérült filmeket pótolni lehessen. A digitalizált képeken már egyszerű volt számítógépes támogatással elvégezni az értékelést, és meghatározni a valósnak tekintett adatokat. A képfeldolgozó szoftverek segítségével könnyű a kép fényességének és kontrasztjának megváltoztatása, ezzel a hiányok felismerhetőségének a napi gyakorlathoz képest jelentős mértékű javítása. Ugyancsak nagy segítség a kép pixelméretén alapuló hossz-mérettel a hiányok helyének és méreteinek meghatározása (300 dpi felbontású képen egy pixel mérete 0,085 mm).

Megfelelő szoftverrel könnyű a digitális képeken megmérni, hogy egy hiba képe pontosan mekkora feketedéssel különbözik környezetétől. A radiográ-

fiai filmek értékelésénél a hibák legfontosabb jellemzője ez a feketedés különbség, mert ennek alapján észleli a hiányt az értékelő személy, szemének érzékenysége és állapota függvényében.

A számítógépes támogatással készített értékelést többször ellenőriztük és módosítottuk, mert például a kontraszt javításával észlelt kis feketedés különbségű hiányok felfedezésének elvárása irreálissá tehetné volna a körvizsgálat eredményét.

A valódi értékek utolsó ellenőrzését a körvizsgálat vége előtt, a beérkező eredmények összevetésével végeztük. Kiderült, hogy a rendelkezésre álló adatok alapján az összeolvadási hiány (401) és a hiányos átolvadás (402) [4] bizonytalanul különböztethető meg. Ezeket a hiányokat, a repedések mintájára, összevontuk és egy csoportnak tekintettük, a valódi értékek és a mérési eredmények táblázataiban is.

A VALÓSZÍNŰSÉGEK MEGHATÁROZÁSA

A helyes észlelés valószínűségének és a téves detektálás valószínűségének meghatározásához a filmekben látható hegesztési varratokat 1 cm hosszú cellákra kellett osztani. A 20 darab filmen lévő 369 cellát a konvencionális valódi értékekkel való összehasonlítás alapján, az alább felsorolt csoportokba soroltuk:

- Pozitív Igaz cella (hiányt mutattak ki ott, ahol valóban volt hiány) jele: PI
- Negatív Igaz cella (nem mutattak ki hiányt ott, ahol valóban nem volt hiány) jele: NI
- Pozitív Hamis cella (hiányt mutattak ki ott, ahol a valóságban nem volt hiány) jele: PH
- Negatív Hamis cella (nem mutattak ki hiányt ott, ahol a valóságban volt hiány) jele: NH
- Az összes hiányt tartalmazó cella száma: $N1 = PI + NH$
- Az összes hiányt nem tartalmazó cella száma: $N2 = PH + NI$

A besorolás után elvégzett számítások:

Az észlelés valószínűségének (POD= Probability of detection) számítása:

$$POD = \frac{PI}{N1} = \frac{PI}{PI+NH}$$

A téves detektálás valószínűségének (PFC= Probability of False Call) számítása:

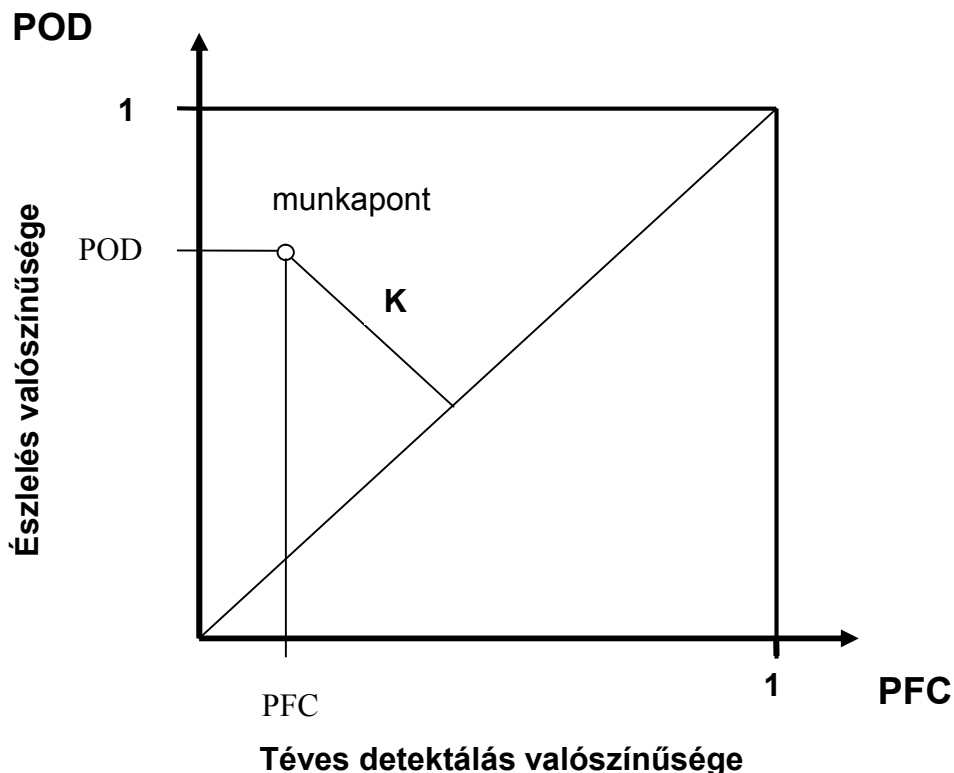
$$PFC = \frac{PH}{N2} = \frac{PH}{PH+NI}$$

A meghatározott valószínűségek a ROC diagramban az értékelés munkapontjának koordinátáit adják.

A MUNKAPONT ÉRTELMEZÉSE AZ ROC DIAGRAMON

Az ROC diagram (ROC = Reliability Operating Characteristic = megbízhatósági működési jelleg-görbe) x tengelyére a téves detektálás valószínű-

ségét (PFC), az y tengelyére a helyes észlelés valószínűségét (POD) mértük fel. Az összes cellára meghatározott valószínűségi értékek az értékelést jellemző munkapont koordinátái. Az értékelő teljesítőképességét a ROC diagramon a munkapontnak az átlótól mért távolságával arányos K értékkel jellemezzük. Értelmezése az 1. számú ábrán látható.



1. ábra. A munkapont értelmezése az ROC diagramon.

A vizsgálat teljesítőképességének számítása

A K értéket a következő módon számítjuk:

$$K = 1 - 2 \sqrt{(1 - \text{POD}) \times \text{PFC}}$$

ahol:

K: a vizsgáló teljesítőképessége

POD: észlelés valószínűsége

PFC: téves detektálás valószínűsége

A K értéke relatív szám, amely 0 (rossz teljesítmény) és 1 (jó teljesítmény) között változhat.

AZ ÉSZLELÉS VALÓSZÍNŰSÉGÉNEK (POD) GÖRBÉJE

Az észlelés valószínűségének görbét akkor lehet meghatározni, ha elegendő mennyiségű, különböző értékű jellemzővel rendelkező hiány van a mérési feladatban. A görbe az értékelő egyén észlelésének valószínűségét mutatja be, a hiány jellemzőjének függvényében. A hiány jellemzője

lehet annak hossza, mélysége, átmérője, stb. A görbe alakja függvénye a vizsgálati módszernek, a vizsgáló személynek és egyéb körülménynek is.

Mint azt a konvencionális valódi érték meghatározásánál már említettük, a digitális képeken megmérhető, hogy egy hiba képe pontosan mekkora feketedéssel különbözik környezetétől. A radiográfiai filmek értékelésénél a hibák legfontosabb jellemzője ez a feketedés különbség, mert ennek alapján észlel az értékelő személy. Az észlelés valószínűségének görbét a digitálisan mért feketedés függvényében határoztuk meg.

A VIZSGÁLAT EREDMÉNYEINEK MINŐSÍTÉSE

Az előzőekben felsorolt jellemzők megkövetelt értékeit a vizsgálat tárgya és körülményei alapján írhatjuk elő. Mivel a vizsgálat tárgyát a körvizsgálatban nem határoztuk meg, a közreműködők

eredményeit a gyakorlatban szokásos szigorú és közepes követelményekhez viszonyítottuk.

A megbízhatósági referencia értékek a [3] tanulmány 10.2 táblázata alapján:

Jellemző	Jel	Szigorú	Közepes
Az észlelés valószínűsége	POD	> 0,95	> 0,8
A téves detektálás valószínűsége	PFC	< 0,1	< 0,2
Az értékelő teljesítőképessége	K	> 0,86	> 0,6

1. táblázat. Megbízhatósági jellemzők referencia értékei

A RÉSZTVEVŐ LABORATÓRIUMOK VIZSGÁLATI EREDMÉNYEI

AZ ÉRTÉKELÉS FAJTÁI

Mint azt a konvencionális valódi érték meghatározásánál már említettük, a 401 és 402 típusú hibák összevetésénél felmerült az a gondolat, hogy a hibatípusok összekeverése más típusú hibáknál is előfordulhat. Ezért érdekes lehet az adatok olyan értékelése is, amikor csak azt vesszük figyelembe, hogy egy cellát hibásnak minősített-e az értékelő. E megfontolás alapján az adatokat kétféle módon értékeltük.

Hibatípus függő értékelésnek neveztük azt az értékelést, amikor a hibák fajtájának meghatározását figyelembe vettük. Ebben az esetben, például, ha valaki a gázzárványokat (201) nem olyan csoportba sorolta be, mint az a valódi értékeknél van, akkor azt téves riasztásnak minősítettük, és emiatt rosszabb eredményt ért el.

Az ilyen jellegű téves következtetések elkerülése érdekében végeztünk egy második értékelést is, amit **hibatípus független értékelésnek** nevezünk el. Ez annyiban különbözik az előző módszertől, hogy a hibák fajtájának meghatározását nem vettük figyelembe, csak azt, hogy az adott cellát hibásnak minősítette-e az értékelő.

A hibatípus független értékelés, nem veszi figyelembe, hogy az anyagvizsgáló a térképen (a **hely-típus** nevű munkalapon) melyik mezőbe, azaz milyen konkrét hibatípusba sorolta be a hibát.

Találatnak vettük, ha a cellában lévő hibát megjelölte, és nem vettük tévedésnek, ha nem a megfelelő típusba sorolta. Ez egy engedékenyebb elemzési kritérium, ami azonban nem befolyásolja a vizsgálat biztonságát, mert ha a cellában hibát észlelt, mindenképp beavatkozás szükséges, annak típusától függetlenül.

AZ ROC ÉRTÉKELÉS EREDMÉNYEI

A résztvevők ROC értékelési eredményei a 2. és 3. táblázatban láthatóak. A táblázatok a résztvevők azonosítási kódjához rendelve mutatják a filmértékelésnél elért eredményeket. A táblázatok fejlécében használt rövidítések jelentése (az eddig használt jelzéseknek megfelelően):

PI = Pozitív igaz cellák száma (hiányt találtak ott, ahol valóban volt hiány)

PH = Pozitív hamis cellák száma (hiányt találtak ott, ahol a valóságban nem volt hiány)

PFC = A téves detektálás valószínűsége

POD = Az észlelés valószínűsége

K = A vizsgáló teljesítőképességének jelzőszáma

A táblázatok könnyebb értékelhetősége érdekében az 1. táblázatban feltüntetett követelményeknek megfelelő eredményt színekkel jelöltük. A **szigorú** követelményeknek megfelelő értékeket **zöld** színnel, a **közepes** követelményeknek megfelelőket **sárga** színnel, és a **gyenge** értékeket **piros** színnel jelöltük.

Hibatípus függő értékelés					
Vizsgáló kódja	PI	PH	PFC	POD	K érték
2010	54	75	0,0195	0,2523	0,7585
2020	134	71	0,0185	0,6262	0,8338
2030	154	23	0,0060	0,7196	0,9181
2040	135	81	0,0211	0,6308	0,8236
2050	119	37	0,0096	0,5561	0,8693
2060	151	24	0,0062	0,7056	0,9143
2061	143	31	0,0081	0,6682	0,8966
2070	120	50	0,0130	0,5607	0,8488
2080	154	77	0,0200	0,7196	0,8501
2090	137	62	0,0161	0,6402	0,8477
2100	98	47	0,0122	0,4579	0,8372
2110	176	23	0,0060	0,8224	0,9348
2111	115	100	0,0260	0,5374	0,7806
2120	131	91	0,0237	0,6121	0,8084
2130	138	83	0,0216	0,6449	0,8249
2140	168	61	0,0159	0,7850	0,8832
2150	104	21	0,0055	0,4860	0,8940
2160	102	104	0,0270	0,4766	0,7620

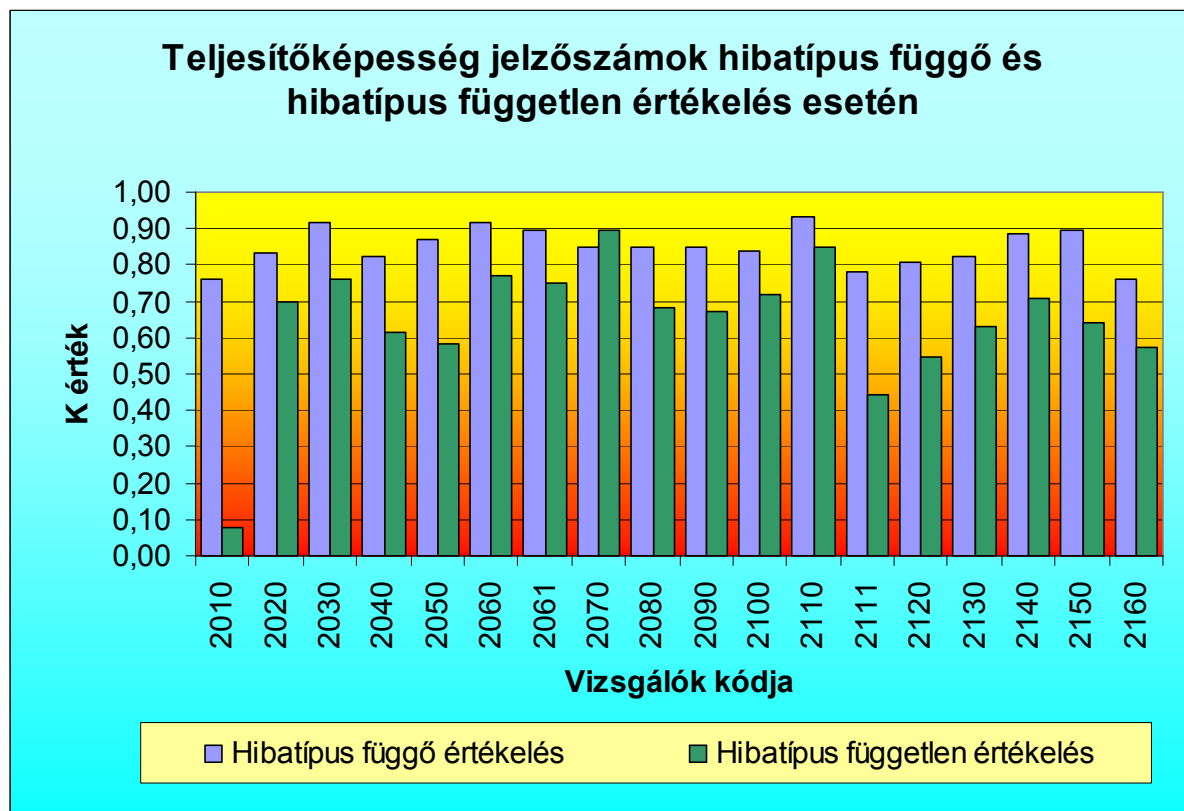
2. táblázat. Hibatípus függő értékelés eredményei a vizsgálók kódjai szerint

Hibatípus független értékelés					
Vizsgáló kódja	PI	PH	PFC	POD	K érték
2010	69	57	0,3276	0,3538	0,0798
2020	165	26	0,1494	0,8462	0,6968
2030	158	13	0,0747	0,8103	0,7619
2040	160	36	0,2069	0,8205	0,6146
2050	128	22	0,1264	0,6564	0,5831
2060	158	12	0,0690	0,8103	0,7712
2061	154	13	0,0747	0,7897	0,7493
2070	147	2	0,0115	0,7538	0,8936
2080	173	39	0,2241	0,8872	0,6820
2090	144	18	0,1034	0,7385	0,6710
2100	133	11	0,0632	0,6821	0,7164
2110	177	11	0,0632	0,9077	0,8472
2111	137	45	0,2586	0,7026	0,4453
2120	153	41	0,2356	0,7846	0,5494
2130	161	34	0,1954	0,8256	0,6308
2140	171	30	0,1724	0,8769	0,7087
2150	110	13	0,0747	0,5641	0,6391
2160	150	34	0,1954	0,7692	0,5753

3. táblázat. Hibatípus független értékelés eredményei a vizsgálók kódjai szerint

A 2. ábrán bemutatjuk a 2. és 3. táblázat adataiból a vizsgálók teljesítőképességének jelzőszámait a hibatípus függő és a hibatípus független értékelésnél. Az ábrán látható, hogy a vizsgálók K értékei a hibatípus figyelembe vétele nélkül készült értékelésben, egy kivétellel, kisebbek a hibatípu-

sokra is figyelő értékelésnél. Ez meglepő eredmény, mivel a hibatípus meghatározásának követelménye nehezebb feladatot feltételez. Ezt a feladatot azonban a körvizsgálat résztvevői jól megoldották.



2. ábra. A vizsgálók K értékei a hibatípus függő és hibatípus független értékelés esetén

A ROC EREDMÉNYEK ELEMZÉSE

A 4. táblázatban, az eddigi eredmények alapján, összesítettük a különböző jellemzők követelményeinek megfelelő vizsgálók számát. Megállapíthatjuk, hogy hibatípus függő értékelés esetén az értékelők teljesítményét jelző K érték szigorú követelményét heten, a közepes követelményét tizenegyen teljesítették. A résztvevők közül gyenge teljesítményt senki sem mutatott. Ez a megállapítás nem terjeszthető ki az észlelés valószínűségé-

re, mivel ebben a jellemzőben a résztvevők majdnem teljes létszáma csak gyenge eredményt ért el.

A táblázat adatainak további érdekessége, hogy az észlelés valószínűségének (POD) gyenge eredményét a téves detektálások (PFC) jó eredménye kijavította. Így lehetséges, hogy a kétféle valószínűségi eredmény a teljesítőképességet mutató K szám eredményeiben senkinél sem eredményez gyenge teljesítményt.

Jellemző	Jel	Szigorú	Közepes	Gyenge
Az észlelés valószínűsége	POD	0	1	17
A téves detektálás valószínűsége	PFC	6	6	6
Az értékelő teljesítőképessége	K	7	11	0

4. táblázat. A különféle szintű követelményeknek megfelelő vizsgálók száma a hibatípus függő értékelés esetén

Az 5. táblázatban látható összesítés a hibatípusokat figyelmen kívül hagyó értékelés eredményét mutatja. A táblázat a különböző jellemzők követelményeinek megfelelő vizsgálók számát mutatja be. Az értékelők teljesítményét mutató K szám a 4. táblázat adataihoz viszonyítva gyengébb eredmé-

nyeket mutat, annak ellenére, hogy a hibatípusokba való besorolás kényszerének elhagyása könnyítést feltételez. Ez az eredmény azt bizonyítja, hogy a résztvevők hibatípus meghatározó képessége kiváló.

Jellemző	Jel	Szigorú	Közepes	Gyenge
Az észlelés valószínűsége	POD	0	8	10
A téves detektálás valószínűsége	PFC	7	6	5
Az értékelő teljesítőképessége	K	1	12	5

5.táblázat. A különféle szintű követelményeknek megfelelő vizsgálók száma a hibatípus független értékelés esetén

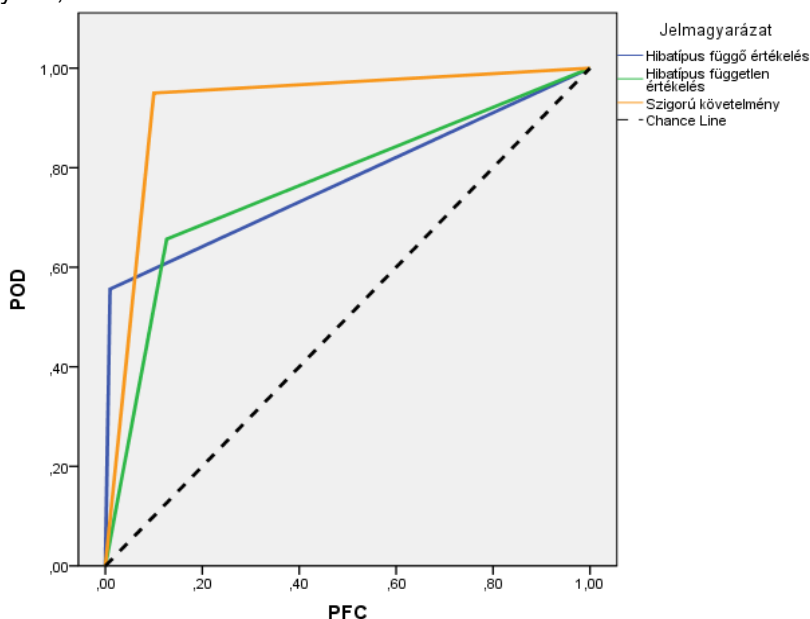
A ROC DIAGRAMOK

A 2. és 3. táblázat adataiból közelítőleg megrajzolhatók a vizsgálók ROC diagramja (ROC = Reliability Operating Characteristic = megbízhatósági működési jelleggörbe). Az előzőekben ismertetett módon, az X tengelyen a téves riasztás valószínűségét (PFC), az y tengelyen a találat, a helyes detektálás valószínűségét (POD) ábrázoltuk. Az ábra (0;0) pontjából az (1;1) pontjába húzott szaggatottal jelölt átló a véletlen valószínűség szintjét jelöli (Chance line), azaz amin a találat és a téves riasztás valószínűsége egyaránt 0,5 (50%). Tehát ez a véletlen találgatás szintje. Efölötti térrészben helyezkednek el a véletlennél jobb találati arányú értékelések, és alatta a véletlennél rosszabb arányúak, amire a résztvevők

között nincs példa. Egy jellemző diagramot mutat be a 3. ábra.

A három folytonos vonal közül a narancsszínű jelöli a szigorú megbízhatósági referencia értéket. Az 1. táblázat alapján a szigorú követelményt jelölő vonal a (0,1, 0,95) koordinátájú ponton megy át.

A diagramokon a kék színű görbe a hibatípus függő értékelés eredményét mutatja, míg a zöld színű a hibatípus független értékelés eredményét ábrázolja. Mind a referencia érték, mind a két értékelés görbéje valójában egy pont (a munkapont), és a két végpont összekötéséből jött létre, amelynek az oka, hogy a rendelkezésre álló adatokból pontosabb becslésre nem volt mód.



3. ábra. A 2050 kódszámú résztvevő ROC diagramja

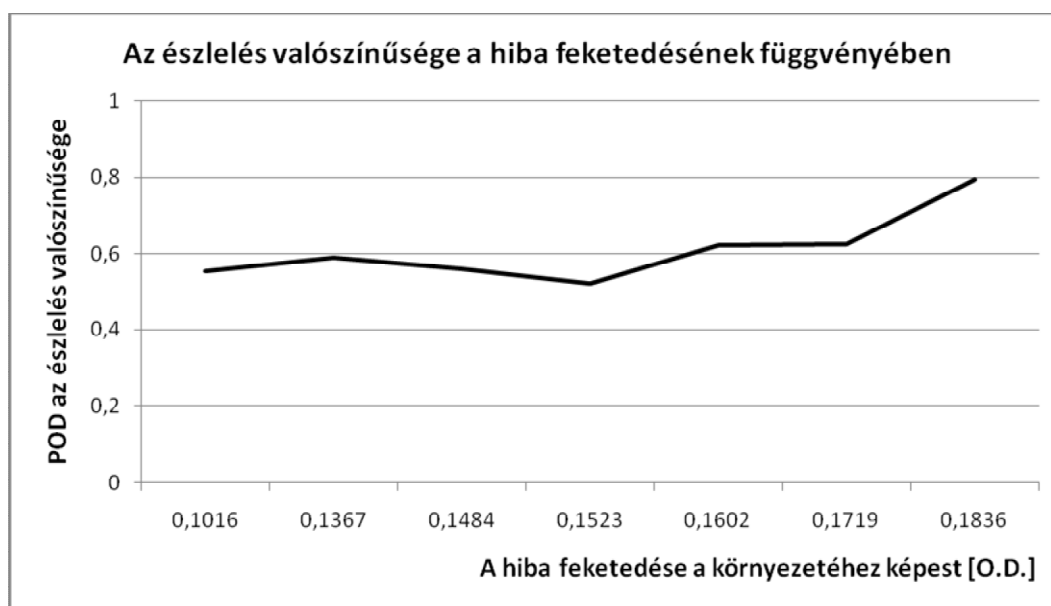
A hibatípus függő értékelés eredménye, a kék vonal, egy kivétellel, minden résztvevő esetén alacsonyabb észlelési valószínűség (POD) értéket jelöl, mint a zöld vonallal jelzett hibatípus független értékelés. Ugyanakkor a zöld vonalak mind nagyobb téves riasztás értékeket (PFC) jelképeznek, nagyobb észlelési valószínűséggel, szemléletesen mutatva, hogy a hibatípus független elemzés nem mutatott jobb eredményt.

A POD ÉRTÉKELÉS EREDMÉNYEI

Az észlelés valószínűsége (POD) megmutatja, hogy a radiográfiai film értékelője a hibákat milyen arányban vette észre. Ez a jellemző sok külső és a vizsgálotól függő belső körülménytől függ. A körvizsgálatban ezt a jellemzőt csak a

hibák egy tulajdonságának függvényében értékeltük.

Mint azt már leírtuk, a digitális képeken mértük, hogy a hibák képe mekkora feketedéssel különbözik környezetétől. A feketedést az ismert optikai denzitás (O.D.) mértékében határoztuk meg. Az észlelés valószínűségének görbáját a digitálisan mért feketedés különbség függvényében rajzoltuk meg. Az O.D. különbség tartományát 7 részre osztottuk és ezt vittük fel a POD diagram x tengelyére, ami jellemzi a hiba feketedését a környezetéhez képest. Az y tengelyen pedig az adott feketedési tartományba eső hibák észlelési valószínűségeit ábrázoltuk. Egy jellemző diagramot mutat be a 4. ábra.



4. ábra. A 2050 kódszámú résztvevő POD diagramja

A POD DIAGRAMOK ELEMZÉSE

Elméletileg elvárható lenne egy határozottan növekedő POD érték a növekvő feketedés különbség függvényében, mivel a környezettől jobban eltérő hibát könnyebb észrevenni a radiográfiai filmen. Azonban a 4. ábráról, és a többi résztvevő POD diagramjairól, elmondható, hogy némi ingadozással, egyénenként más – más, de mindegyik közel azonos értéket mutat. Csak néhánynak van rövidebb tartományokban, mint a 2050 kódszámú résztvevőnek is, a nagyobb feketedésű tartományban enyhén változó jellege. Összefoglalóan kijelenthetjük, hogy a vizsgálok észlelési valószínűsége nem függ a hiba és környezete közti feketedés különbségtől.

Ugyanakkor a POD diagramok szemléletesen mutatják, amit a 2 táblázat POD oszlopában is észleltünk már. Megállapíthatjuk, hogy a szigorú

megbízhatósági referencia szinten elvárt minimum POD értéket, a 0,95 –öt (azaz hogy a hibák 95%-át észlelje az anyagvizsgáló), az összes övezetre együttesen, hibatípus függően nem érik el a vizsgált személyek.

Ha a körvizsgálat végrehajtásánál fennálló valós helyzetet vesszük figyelembe, az eredmények bemutatják, hogy a vizsgálok tudják, vizsgálat tárgyát képezik. Tehát kiegyenlített teljesítménnyel képesek észrevenni a kisebb és nagyobb feketedés különbségű hibákat a radiográfiai filmekben, de csak egy személy érte el a közepes megbízhatósági szintet.

ÖSSZEFOGLALÁS

A meghirdetett radiográfiai filmek értékelése járassági vizsgálatán 16 laboratórium vett részt. Két

résztevőtől még további 2 db, így összesen 18 db mérési eredmény érkezett értékelésre.

Az értékelés szerint sikeres volt a körvizsgálat, elsősorban azért, mert minden résztvevő értékelhető eredményt küldött be. Továbbá az összesített teljesítményt bemutató K érték szigorú követelményét a résztvevők több mint 1/3 -a (38 %) teljesítette, és a maradék 2/3 is elérte a közepes követelményt. Ezt a teljesítményt úgy érték el, hogy az észlelési valószínűség (POD) követelményét kevesen tudták jól teljesíteni, de ezt kompenzálta a jó, azaz a kis értékű tévesztési valószínűség (PFC). Az eredmények azt is bemutatják, hogy az értékelést végzők alaposan felkészültek körvizsgálati munkájukra, és tudatában voltak annak, hogy ellenőrzött munkát végeznek.

A szervezők véleménye szerint a radiográfiai értékelés megbízhatóságának növelése érdekében szükség lenne a filmértékelők részére néhány napos, kemény munkát igénylő, és több szempontból kiértékelt tréningek szervezésére.

HIVATKOZÁSOK

- [1] MSZ EN ISO/IEC 17025:2005 Vizsgáló és kalibrálólaboratóriumok felkészültségének általános követelményei
 - [2] MSZ EN 12517-1:2006 Hegesztett kötések roncsolásmentes vizsgálata. 1. rész: Acél, nikkelt, titán és ötvözetek hegesztett kötésein értékelése radiográfiával. Átvételi szintek
 - [3] Prof Tóth László – Dr Serge Crutzen: Roncsolásmentes vizsgálatok, azok megbízhatósága és következményei, Miskolci Egyetem 1999, TEMPUS S_JEP_11271 projekt
- Megtalálható: <http://mek.oszk.hu/01100/01189/> címen
- [4] MSZ EN ISO 6520-1:2008 Hegesztés és rokon eljárások. Fémek geometriai eltéréseinek besorolása. 1. rész: Ömlesztőhegesztés (ISO 6520-1:2007)

IPARI ANYAGVIZSGÁLÓ KÉPESÍTÉS, TANÚSÍTÁS ÉS GYAKORLATI KÉPZÉS

Szűcs PÁL

Hazánkban, ha valaki ipari anyagvizsgálóvá akarja kiképezni magát, két út között választhat: elvégzi az Országos Képzési Jegyzékben szereplő Ipari anyagvizsgáló szakképesítés megfelelő leágazásait, és akkor egy itthon használható szakma birtokába kerül; vagy az EN 473 szabványnak megfelelő tanúsítást szerez a megfelelő eljárásokból, és akkor ugyan szakmája nem lesz, de birtokolni fog egy, az EU-ban használható tanúsítást.

AZ IPARI ANYAGVIZSGÁLÓ SZAKKÉPESÍTÉS

Az Országos Képzési Jegyzék 365. sorában található meg az Ipari anyagvizsgáló szakképesítés (52-521-01-0000-00-00), amelynek tíz leágazása van. A szakképesítés megszerzését a 21/2007. (V. 21.) SzMM rendeletben kiadott szakmai és vizsgakövetelmény szabályozza. Ha valaki meg akarja szerezni egy vagy több kimenettel a szakképesítést, akkor két további modulból is vizsgát kell tennie:

- 0110-06 Általános gépészeti munka-, baleset-, tűz- és környezetvédelmi feladatok
- 0261-06 Általános anyagvizsgáló ismeretek

Az ipari anyagvizsgáló szakképesítés OKJ-ban megnevezett leágazásai:

- 0263-06 Akusztikus emissziós anyagvizsgáló
 - 0201-06 Folyadékbehatolásos anyagvizsgáló
 - 0200-06 Mágnesezhető poros anyagvizsgáló
 - 0198-06 Örvényáramos anyagvizsgáló
 - 0202-06 Radiológus anyagvizsgáló
 - 0219-06 Rezgéselemző
 - 0262-06 Roncsolásos anyagvizsgáló
 - 0218-06 Szemrevételezéses anyagvizsgáló
 - 0201-06 Folyadékbehatolásos anyagvizsgáló
 - 0199-06 Tömörségvizsgáló
 - 0253-06 Ultrahangos anyagvizsgáló
- A korábbi jegyzékhez képest hiányzik a színképelemző (SPT) és metallográfiai laboráns. A képzést törvények és rendeletek egész sora szabályozza, amelyek gyakran és sokszor lényegesen változnak. A jogi háttér a www.nive.hu illetve a www.tamop.nive.hu honlapokon naprakész és letölthető formában hozzáférhető.

TÖRVÉNY NEVE	MEGJELENÉS HELYE
1992. évi LXIII. törvény a személyes adatok védelméről és a közérdekű adatok nyilvánosságáról	MK 1992/116.
1993. évi III. törvény a statisztikáról (a végrehajtásról szóló 170/1993. (XII. 3.) Korm. rendelettel egységes szerkezetben)	MK 1993/60.
1993. évi LXXVI. törvény a szakképzésről	MK 1993/99.
2001. évi CI. törvény a felnőttképzésről	MK 2001/153.
2003. évi LXXXVI. törvény a szakképzési hozzájárulásról és a képzés fejlesztésének támogatásáról	MK 2003/131.
2009. évi XLIV. törvény a szakképzési hozzájárulásról és a képzés fejlesztésének támogatásáról szóló 2003. évi LXXXVI. törvény és az ezzel összefüggő egyes törvények módosításáról	MK 2009/79.
2010. évi XLII. törvény a Magyar Köztársaság minisztériumainak felsorolása	MK 2010/85.

A felvázolt szabályozás részletekig menő, a képző intézetek személyi és tárgyi (beleértve az épület, a vizsgáló berendezések, a gyakorló

darabok) feltételeit, a vizsgaközpont pontos tevékenységét és az SZVK-en keresztül a számonkérés rendszerét is szabályozza.

okl. fizikus, ORSZAK BT. www.orszak.hu
A VII. RAKK-on (2011, Eger) elhangzott előadás
nyomtatott változata

RENDELET NEVE	MEGJELENÉS HELYE
1/2006. (II. 17.) OM rendelet az Országos Képzési Jegyzék-ről és az Országos Képzési Jegyzékbe történő felvétel és törlés eljárási rendjéről	MK 2006/11.
2/2010. (II. 16.) SzMM rendelet a felnőttképzési tevékenység megkezdésének és folytatásának részletes szabályairól	MK 2010/9.
7/2002. (XII. 6.) FMM rendelet a felnőttképzést folytató intézmények és a felnőttképzési programok akkreditációs eljárási díjának mértékéről és felhasználásának szabályairól	MK 2002/15.
8/2006. (III. 23.) OM rendelet a szakképzés megkezdésének és folytatásának feltételeiről, valamint a térségi integrált szakképző központ tanácsadó testületéről	MK 2006/32.
10/2006. (IX. 25.) OKM rendelet a szakirányú továbbképzés szervezésének általános feltételeiről	MK 2006/116.
13/2008. (VII. 22.) SzMM rendelet a szakképzési hozzájárulásról és a képzés fejlesztésének támogatásáról szóló 2003. évi LXXXVI. törvény végrehajtásáról.	MK 2008/107.
15/2007. (IV. 13.) SzMM rendelet a Munkaerőpiaci Alap képzési alaprészből felnőttképzési célra nyújtható támogatások részletes szabályairól.	MK 2007/46.
15/2009. (VII. 27.) SzMM rendelet a saját munkavállalók részére szervezett képzés költségei a szakképzési hozzájárulás terhére történő elszámolásáról	MK 2009/103.
16/2009. (VIII. 14.) SzMM rendelet az Országos Képzési Jegyzékről és az Országos Képzési Jegyzékbe történő felvétel és törlés eljárási rendjéről szóló 1/2006. (II. 17.) OM rendelet módosításáról.	MK 200/106.

RENDELET NEVE	MEGJELENÉS HELYE
19/2008. (VII. 19.) OKM rendelet az Országos szakértői, az Országos vizsgáztatási, az Országos szakmai szakértői és az Országos szakmai vizsgálónői névjegyzékről, valamint a szakértői tevékenységről szóló 31/2004. (XI. 13.) OM rendelet módosításáról.	MK 2008/106.
19/2008. (XII. 4.) SzMM rendelet a szakmai vizsgáztatás általános szabályairól és eljárási rendjéről szóló 20/2007. (V. 21.) SzMM rendelet módosításáról	MK 2008/171.
20/2007. (V. 21.) SzMM rendelet a szakmai vizsgáztatás általános szabályairól és eljárási rendjéről	MK 2007/65.
22/2004. (II. 16.) Korm. Rendelet a felnőttképzést folytató intézmények és a felnőttképzési programok akkreditációs szabályairól.	MK 2004/16.
37/2003. (XII. 27.) OM rendelet az Országos Képzési Jegyzékről	MK 2003/156.
133/2010. (IV. 22.) Korm. Rendelet az Országos Képzési Jegyzékről és az Országos Képzési Jegyzék módosításának eljárásrendjéről.	MK 2010/59.

Csak egy példa: a vizsgáztató milyen módon van jelen az egyes vizsgafázisokban

- felügyelet nélkül,
- csoportos felügyelet mellett,
- vizsgáztatói csoportos felügyelet mellett,
- csoportos vizsgáztatói megfigyelés mellett,
- egyéni vizsgáztatói megfigyelés mellett,
- vizsgáztató közreműködése mellett,
- vizsgáztató irányítása mellett,
- vizsgabizottsági tag jelenlétében,
- vizsgabizottsági tag közvetlen megfigyelése mellett.

Az OKJ ilyen mélységig lett kidolgozva, sajnos az ellenőrzés itt sem megoldott. A másik nagy

probléma a gyakorlati oktatás. Bár a TISZK részére jelentős értékű eszköz került beszerzésre, de szakképzett gyakorlati oktatóknak híján vannak. Erre akar megoldást hozni napjainkban a Nemzetgazdasági Minisztérium és a MKIK megállapodása a 1214/2010. (X. 12.) kormányhatározat alapján. Mivel az OKJ-ben szereplő ipari anyagvizsgáló képesítés sem az EN 473 szerinti 1. szintű tanúsítást, sem a 2. szintű tanúsítást nem elégíti ki maradéktalanul, **az OKJ-ből nincs átjárás az EN 473 szerinti tanúsítás felé.** Ha az MHTÉ kiállítana részbizonyítványt is, akkor a 2. szintű tanúsítványt nyújtó rendelkező miután sikeresen levezgázott a 0110-06 és 0161-06 modulokból, megkaphatná a szakképesítést is. Tehát az **EN 473 szerinti tanúsításból lenne átjárás az OKJ felé.**

AZ MSZ EN 473 SZABVÁNY SZERINTI TANÚSÍTÁS

Jelenleg a roncsolásmentes vizsgálatot végző személyzet minősítését és tanúsítását az EN 473 szabvány szabályozza. Mivel a szabvány magyar fordításban is megjelent, nincs értelme részletesen ismertetni.

Kevésbé ismert az **MSZ CEN/TS 15053:2006** „Roncsolásmentes vizsgálatok. Előírások a vizsgadarabok folytonossági hiányainak típusaira” című szabvány, amely termékterületenként sorra veszi a vizsgadarabok számát, fajtáit, a bennük lévő hiba legkisebb méretét, a felületi minőséget és a törzslap tartalmát, ami segítségével majd a gyakorlati vizsga értékelésre kerül.

Ez a szabvány a képzők számára is fontos, mivel támpontot ad a gyakorló darabok összeállításához. A tanúsítónak meg a bibliája - kéne hogy legyen!

A **CEN ISO/TR 25108:2006** „Non-destructive testing. Guidelines for NDT personnel training organizations” és **CEN ISO/TR 25107:2006** „Non-destructive testing. Guidelines for NDT training syllabuses” az OKJ-s elvárásokhoz képest nem tartalmaz további lényeges elvárásokat a képzőkkel szemben.

A GYAKORLAT MA

Hosszabb ideje OKJ-s tanfolyam és vizsga nincs. A képzés az EN 473 szabvány szerint folyik. A képzők betartják a szabványok megszabta minimális óraszámot, ismertetik az előírt témákat. A jelöltek nagy része „sikeresen” levezgázik. Ezek szerint minden rendben van?

JÁRTASSÁG ÉS GYAKORLAT

A tanfolyamra érkezők sokszor ott és akkor találkoznak először az eljárással, bár munkáltatójuk és egy 2. vagy 3. szintű tanúsítással rendelkező gyakorló anyagvizsgáló igazolt számukra 1-3-6 hónapos gyakorlatot. Miként lehetne ezt a gyakorlati időt komollyá tenni?

Ki kéne jelölni laboratóriumokat, ahol a jelöltek eltölthetnék az előírt gyakorlati időt. A **szakmai szervezetnek** kellene minősíteni ilyen laboratóriumokat, ahol 1,5 – 2,0 –szeres minimálbérnek megfelelő díj befizetése ellenében eltölthetnék a jelöltek a gyakorlati időt., amiről igazolást kapnak. Persze a szakmai szervezetnek azt is ellenőriznie kellene, hogy a folyadékbehatolásos gyakorlatra jelentkezőt nem röntgensegítőnek használták. És ha kiderül a laboratórium alkalmatlansága, le kell venni a listáról.

NYELVTUDÁS

A szabványok jelentős része jóváhagyó közleményes formában jelenik meg. Nyelvtudás hiányában az anyagvizsgálók képtelenek alkalmazni azokat. Mi a megoldás? Meg kéne követelni a 3. szintű anyagvizsgálóktól valamely idegen nyelv (német, francia, angol) tudását, amit oly módon lehetne mérni, hogy a 3. szintű tanúsítványok meghosszabbításakor illetve újratanúsításakor a vizsga helyszínén kellene elkészíteniük egy idegen nyelvű vizsgálati utasítást. Ezt a gyakorlatot mindaddig fenntartani, amíg érezhetően nem javul az anyagvizsgálók szabványismerete. Így elérhető lenne, hogy minden laboratóriumban legyen legalább egy, a szabványokat értő anyagvizsgáló. És persze az oktatásban sem fordulna elő, hogy az angol nyelvű magyar szabványokat „átlépik”.

A KÖVETELMÉNYRENDSZER ÁTLÁTHATÓSÁGA

Az MHE honlapján áttekinthető és értelmes formában hozzáférhető kell hogy legyen a követelményrendszer. Ha nekem van egy PT-1 tanúsításom MM (c, w) termékterületi és ipari szakterületi kiterjesztéssel és PT-2 EM (c, f, w) tanúsítást szeretnék elérni, akkor a honlapról világos eligazítást kell hogy kapjak. Ez ma közel sincs így! De hasonló a helyzet az Rm ipari szakterület értelmezésével is.

A KÖVETELMÉNYRENDSZER KÖVETKEZETES ALKALMAZÁSA

Sajnos a NAT csak formai ellenőrzéseket végez, ennek következménye, hogy az MHE is a formai követelmények betartására (milyen alakú legyen az órarend, hány jelentkezési lapot, látogatási igazolást adjunk le...) helyezi a hangsúlyt. Ha a NAT egyszer azt ellenőrizné, hogy a 8 fős vizsgán volt-e 10 darab hegesztési varrat vizsgadarab, azokban a hiba legalább 5 mm hosszú volt-e, van-e róluk törzslap, a jelölt a vizsgálati jegyzőkönyvében olyan típusú, helyzetű és méretű hibát tüntetett-e fel, amilyen a törzslapban szerepelt. Mondjam tovább? De e helyett egy 5 napos tanfolyamon a műszaki könyvtár meglétét firtatják. Persze az is benne van a szabványban.

A gyakorlati vizsgán a tanúsító személynek a jelölt mellett kell állnia, hiszen különben nem tudja kitölteni az értékelő lap (EN 473 szabvány D melléklet) 2. részét, ami 1. szintnél az össz pontszám 35 %-a, 2. szintnél 20 %-a. Ha nincs jelen a gyakorlati vizsgánál, akkor ennek a 35. ill. 20 pontnak a megítélése formális.

Nem véletlenül idéztem az OKJ-s vizsgarendből, hogy hányféle módon vehet részt a vizsgázató a vizsgán!

Az elméleti vizsgán a tesztek értékelheti a jegyző egy sablonnal, és a tanúsító szűrőpróbaszerűen ellenőrizheti az értékelés helyességét. De a gyakorlati vizsgán jelen kell lennie és jegyzetelnie kell, hogy érdemben tudja értékelni a vizsgázó teljesítményét.

Az értékelő lap 3. részénél pedig törzslap nélkül nem lehet érdemben értékelni a teljesítményt.

ÖSSZEGZÉS

A fenti vázlatos áttekintésből is az következik, hogy a szakmai szervezetnek, az akkreditáló testületnek, a képzőknek és nem utolsósorban a roncsolásmentes anyagvizsgáló társadalomnak (laboratóriumoknak és anyagvizsgálóknak) együtt kell működniük, ha azt akarjuk, hogy hazai képzésű, hazai tanúsítású anyagvizsgálóinkat továbbra is elfogadják az EU és a nagyvilág piacán.

VII. RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLÓ KONFERENCIA ÉS KIÁLLÍTÁS, EGERBEN 7TH NDT CONFERENCE AND EXHIBITION IN EGER

Április 12. és 14. között a MAROVISZ immár hetedik alkalommal rendezte meg a Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Konferenciát és Kiállítást, folytatva ezzel az 1999-ben elindított és azóta hagyománnyá érett szakmai találkozók sorozatát. A szakmai eseményt ezúttal is Egerben rendezték, a korábban megszokott konferencia helyszínén, a felújított és átalakított Hotel Flórában.

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



Vjera Krstelj az EFNDT elnöke előadást tart

A rendezvény keretében tartotta a konferencia résztvevői számára nyilvános, éves tudományos ülést az ACADEMIA NDT INTERNATIONAL, lehetőséget teremtve arra, hogy a hazai szakemberek bepillantást kapjanak a legjelentősebb nemzetközi fejlődési irányokba és alkalmazási területekre. A konferencia ezen utóbbi részén több ismert tudós személyiséggel képviseltette magát a Magyar Tudományos Akadémia Anyagtudományi és Technológiai Bizottsága.

Köszönjük az ACADEMIA NDT INTERNATIONAL-nak és a Magyar Tudományos Akadémia Anyagtudományi és Technológiai Bizottságának, hogy rendezvényével, ill. részvételével megtisztelte és komoly elismerést, rangot adott konferenciánknak.

MTA, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet, 1121 Budapest, Konkoly-Thege út 29-33.
e-mail: riesz@mfa.kfki.hu



Kroó Norbert az MTA alelnöke és Giuseppe Nardoni az Academia NDT International elnöke a konferencián

A konferencia megnyitó szekciójában került sor a MAROVISZ Díj átadására. A kuratórium a Díjat 2011-ben egyhangú döntéssel Kecskés Péternek, a KETECH Kft. ügyvezető igazgatójának, a MAROVISZ alelnökének adományozta. A Díjat, méltató, értékelő szavak kíséretében Prof. Dr. Tóth László a kuratórium elnöke adta át.



MAROVISZ díj átadása Kecskés Péternek

Az elhangzott előadások általában a konferencia kiemelt témaköreiben hangzottak el, de volt érdekes előadás a hazai energiastratégiáról és a roncsolásmentes anyagvizsgálatok nem-ipari alkalmazásának tapasztalatairól is (pl.: szobrok restaurálása).



A hallgatóság, előtérben a német küldöttség

Az előadók - többek közt - képet adtak a roncsolásmentes vizsgálatok technológiájának a műszaki diagnosztika és a vizsgáló eszközök a fejlődéséről, szolgálva a konferencia mottójaként választott műszaki biztonság ügyét.

Az anyagvizsgáló berendezések kiállítása az eddigieknél kedvezőbb körülmények között került megrendezésre.

A konferencia feszes programját vacsorával egybekötött kulturális műsor lazította, amelyen a Bihari együttes szórakoztatta magas színvonalú táncos zenés műsorával a résztvevőket.

A kevés szabadidőben a résztvevők lazíthattak a hotel wellness részlegében vagy a híres Törökfürdőben.

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

Szalay Károly MAROVISZ irodavezető

KÖNYVISMERTETÉS

„FÉMEK KIFÁRADÁSA – A FELÜLET ÁLLAPOTA ÉS A KÖLCSÖNHATÁSAI” CÍMŰ KÖNYVRŐL

Az Ukrán Tudományos Akadémia G.Sz. Pisarenko Szilárdság Problémái Intézetének kiadásában egy könyvsorozat második eleme jelent meg Kijevben 2009-ben „**Fémek kifáradása – A felület állapota és a kölcsönhatásai**”. A könyv szerzői: **V.T. Troshhenko, G.V. Cübanev, B.A. Grjaznov, Ju.Sz. Nalimov**. A sorozat szerkesztője és egyben az ismertető munká szerkesztője az intézet jelenlegi vezetője, a 81. életévét betöltött, világszerte jól ismert V. T. Troshhenko. A 10 kötetes tervezett sorozatot az intézetet alapító G. Sz. Pisarenko születésének 100. születésnapjára (2010) dedikálják a szerzők, akik tulajdonképpen mindnyájan és büszkén tekintik magukat G.Sz. Pisarenko tanítványainak.

A kifáradás jelenségét először 1839-ben publikálták a Harz hegységben használt bányakötelek titokzatos törésével kapcsolatban. A vasúti közlekedés általánossá válásával az ilyen törések száma ugrásszerűen megemelkedett és számos emberi életet követelő katasztrófát (legnevezetesebb a Versaille-ben 1842-ben bekövetkezett több mint 60 életet követelő esemény volt) követően a szakemberek tömegesen fordultak a jelenség megismerése felé. Maga „kifáradás” szó is csupán az 1850-es években lett használatos a jelenség összefoglaló jelelemzésére. Annak ellenére, hogy statisztikai adatok szerint napjainkban is naponta 10-15 publikáció jelenik meg a kifáradással kapcsolatban szerte a világon a mai napig is ez okozza az ipari káresetek meghatározó hányadát. Így nyugodta mondhatjuk azt, hogy „sokat tudunk a jelenségről, de még messze vagyunk a pontos megismerésétől”.

A 661 oldal terjedelmű mű négy fejezetre tagozódik úgy, hogy minden egyes lényegében különálló rész külön tartalmazza az irodalmi hivatkozásait és újra kezdi az ábrák, táblázatok számozását. Ez abból is adódhat, hogy az egyes részek összefogása a szerzők egyikének feladat volt, mint ahogy erre utalás is olvasható a könyv bevezetésében. A könyv szerzője és szerkesztője, V.T. Troshhenko akadémikus azonban kiváló munkát végzett, így nehezen vehető észre a szövegezésben a többszerzős könyvekre általában jellemző, az egyes fejezetek különböző hangvételű fogalmazása, az ismertített jelenségek eltérő szemléltetése, leírásának didaktikai különbségei.

Az **első**, a 196 oldal terjedelmű **fejezet** 388 irodalmi hivatkozásra támaszkodva az anyagok kifáradására vonatkozó alapvető ismeretek összefoglalását tartalmazza. A megértést 84 ábra és 24 táblázat segíti. A tárgyalásmód logikája már az alfejezetek címeiben is világosan tükröződik, hiszen a kifáradás jelenségét, annak megismerését, tárgyalását az alábbi három témakör mentén tárgyalja:

- A kifáradás általános törvényszerűségei
- A fémek és ötvözetek kifáradási károsodásainak szóródása, ill. a
- A kifáradási károsodások lokalizálódása.

Az első rész a jelenség értelmezésével, a kis és nagyciklusú fáradás jelentőségével, a repedéskeletkezés és terjedés sajátosságaival, a Wöhler görbék analitikus közelítésével, a felület sajátosságainak ismertetésével, a bemetszések – mint felületi jellemzők és feszültséggyűjtő helyek – hatásával foglalkozik. Ennek kapcsán bemutatja, összefoglalja mindazon ismereteket, tapasztalatokat, amelyek e témakörhöz kapcsolódóan felhalmozódta a széleskörű, nagy volumenű szakmai irodalomban. A külső, vagy lokális terhelés növekedésével helyileg nem csupán tiszta rugalmas, hanem nem-rugalmas alakváltozás is felléphet az anyagban lejátszódó csillapodás miatt. Ennek – mint a rezgések csillapodásának – mértéke is szerepet játszik a kifáradási, károsodási folyamatokban, különösen a nagyciklusú igénybevétel esetén. E tény adja annak alapját, hogy korrelációt lehessen keresni az anyagok kifáradási határa és a belső csillapításának mértéke között. Ezt lehet egyaránt energetikai vagy alakváltozási kritériumokra alapozni. A károsodások lokalizációja meghatározó módon a törést okozó, u.n. főrepedés környezetében lejátszódó viszonyok leírására koncentrálódik. Ekkor már makroszkopikus jelenségekkel van dolgunk, amelyek kontinuummechanikai megfontolásokkal is tárgyalhatók. Ennek pedig gyakorlati jelentősége van, hiszen alapvetően a repedészerű anyagfolytonossági hiányokat tartalmazó mérnöki szerkezetek megbízhatóságának megítéléséhez kötődő ismereteket kellő mélységű ismereteket. A repedésterjedés folyamatának mérnöki ismeretei alapvetően három szakaszra bontható, úgymint a megindulás környezete, a stabil

terjedés tartománya, ill. a gyorsuló, a törést megelőző utolsó szakasz. Ezek mindegyikének megvannak a sajátosságai, amelyek tárgyalásra is kerülnek.

A **második fejezet** 65 oldal terjedelemben, 58 irodalmi hivatkozást felsorakoztatva a kifáradási anyagjellemzők kísérleti meghatározásának módszereivel, sajátosságaival foglalkozik. A jobb megértést 45 ábra és 4 db. táblázat segíti. A fejezet döntően két témakört ölel fel a vizsgálatok közül; az un. rezonancia módszert és az érintkezési fárasztóvizsgálatot (fretting - fáradás vizsgálatát). Külön rövid fejezet foglalkozik az autóiparban alkalmazott kötések, elemek kifáradási jellemzőinek meghatározásával, annak speciális, sajátos módszereivel. A mindenképpen gazdaságos rezonanciafárasztás kapcsán áttekintést kapunk a különböző igénybevételek (egytengelyű és többtengelyű, hajlítás, csavarás, húzás-nyomás), a külső körülmények (hőmérséklet és korrozív közeg), a kötés típusának (ragasztott), valamint a szerkezeti elem (fog, bűtyök, turbinalapát) sajátosságait figyelembe vevő konkrét vizsgálati eljárásokról.

A **harmadik**, 228 oldal terjedelmű **fejezet** a felületi viszonyoknak a kifáradás folyamatára gyakorolt hatásával foglalkozik. Tekintettel arra, hogy a műszaki esetek döntő többségében a katasztrofális, nagy anyagi kihatású töréseket előidéző repedések meghatározóan a felületeken keletkeznek, nem mindegy, hogy milyen alakváltozásai, feszültségi, hőmérsékleti viszonyok alakulnak ki a felületi rétegekben a termékek készre gyártása során. A mű e fejezetében a felületi réteg jellemzése a felületi hibák szerepe, a gyártás során kialakuló maradó feszültségek nagysága és eloszlása játszik meghatározó szerepet. Az ismeretek gyakorlati hasznossága a titánötvözetekből készült gázturbina lapátok kifáradási viselkedésének vizsgálatával lett folyamatosan demonstrálva. Itt tárgyalásra kerülnek a különböző előkészítő és befejező megmunkálások hatásának, a hegesztés technológiai paramétereinek elemzése is ugyanúgy, mint a lapátok javítástechnológiai lehetőségei is. A 137 irodalmi hivatkozást felsorakoztató fejezetben közölt eredmények 77 db. ábrán és 32 táblázatban kerültek összefoglalásra.

A **negyedik**, és egyben utolsó **fejezet** a felületek kölcsönhatása következtében lejátszódó un. érintkezési fáradás folyamatával, annak sajátosságaival foglalkozik, ezt veszi górcső alá 109 ábra, 38 táblázat és 248 irodalmi hivatkozás felhasználásával. Egy meglehetősen összetett folyamat eredményezi azt, hogy két, ismételten érintkező felület igen vékony rétegében ébredő alakváltozási, feszültségi viszonyok ahhoz vezetnek, hogy az érintkezés viszonyai az idő (igénybevételi szám) függvényében megváltoznak. A szakirodalom azt a folyamatot fretting-fáradásnak nevezi. A felületi rétegben lejátszódó folyamatokat igen sok paraméter befolyásolja, kezdve az érintkező felületek geometriai paramétereitől, a terhelés sajátosságain át az érintkező anyagok kiinduló tulajdonságain keresztül azoknak az üzemeltetés közben végbemenő változásáig, ill. az érintkező felületek közé bevitt anyagok (kenő) ugyancsak számos paraméterrel jellemezhető tulajdonságáig. E folyamatok szimulációjára és mérésére vonatkozó ismeretek is összefoglalásra kerülnek a könyv e fejezetében. A fejezetet egy a, fellépő nyomás, a határállapotokat leíró viszonyok zárja oly módon, hogy az élettartam növelésének lehetőségeire is hasznos ismeretek szerzésére nyílik lehetőség.

Összefoglalva, az ismertetett könyv egyrészt nagyon jó áttekintést nyújt a mérnöki szerkezetek megbízhatóságának megítélésére leggyakrabban alkalmazott kifáradással kapcsolatos általános ismeretekről, másrészt számos, alapvetően az érintkező felületek környezetében lejátszódó folyamatokról. Ebből adódóan jó szívvel ajánlom az ismertetett munkát a műszaki szakemberinknek, mind a felkészülés fázisában levő egyetemi hallgatóknak, mind pedig a gyakorlati életben dolgozóknak, azoknak, akik napról napra találkoznak az életünket át- és átszövő kifáradásra visszavezethető károsodásokkal. A könyv rendkívül hasznos ismeretanyag hasznosításához azonban szükség van az orosz nyelv ismeretére, amelynek korábbi kötelező voltát követően a jelen mindennapi haszna mára már egyértelmű.

Tóth László
egyetemi tanár