A Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség kiadványa

Anyagvizsgálók Lapja

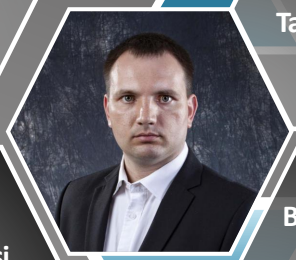
Az Ország vezető szaklapja



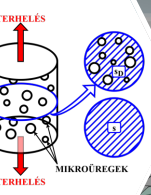
12. AGY Anyagvizsgálat a Gyakorlatban Konferencia

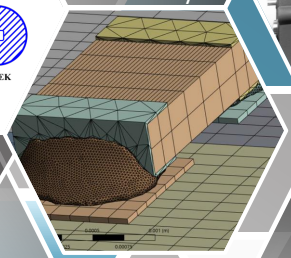
A lap kiemelt támogatója: M·A·E Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete

Interjú Takács Csabával

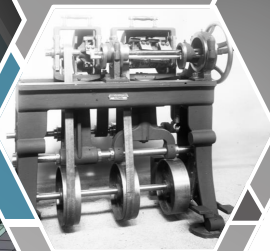


Szakmai cikkek:
- Forraszkötések vizsgálata
- Műszerezett keménységmérés
- DELISA-LTO projekt eredményei



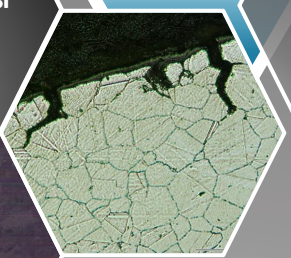


Technikatörténeti rovatunk: A régi Fegyvergyár képei I.

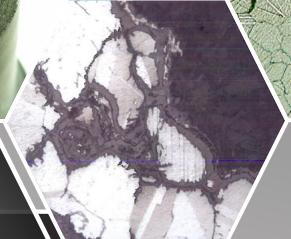


MOL Károsodási archívum 5. rész





Bridging the Gap - 2. rész: Miért aktuális ez a könyv most?



12. AGY – Anyagvizsgálat a Gyakorlatban Konferencia beszámolója

Anyagvizsgáló Szakmérnöki képzés a Debreceni Egyetemen





A végeselem modellezéstől a szimuláció tudományáig

2026/I-II. lapszám

A 12. AGY-konferencia résztvevői







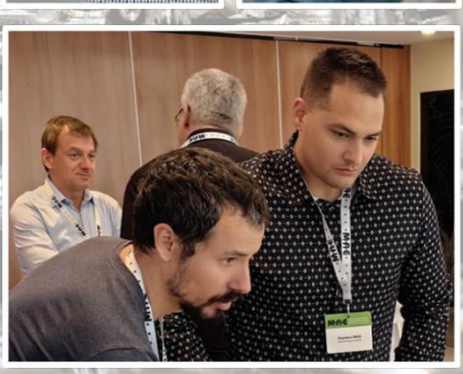













Előszó

Mélyen tisztelt Olvasóim!



Számtalanszor hivatkoztam közös nyelvünk szépségeire és a legkülönbözőbb élethelyzeteket gyönyörűen kifejező mondataira. Engedjék meg, hogy a lapszám tartalmának általános jellemzését most is egy ilyen mondattal kezdjem: „Az egyik szeme sír, a másik meg nevet”[1]. A lap felelős szerkesztőjeként most, amikor e mondatokat írom, teljes egészében átélem a magyarságra meghatározó módon jellemző pesszimizmust is, amelyet az idézett mondat is találóan jelez. Először a „bánattal” foglalkozunk, ha marad időnk akkor jöhet az „öröm” is! „Sír a szemem” azért, mert több igen remek módon összeállított előadást hallgathattam végig a ***12. Agy – Anyagvizsgálat a gyakorlatban*** konferencián ez év június elején. Ezek témái pedig olyanok voltak, amelyekre nagy szüksége van az iparunk szakembereinek. Jómagam szakmai tevékenységének emlékeit idéző helyszíni metallográfiai vizsgálatok apró „mesterfogásait” bemutató előadással is kezdhetném, de az igen széles körben a költséghatékonyan nagyon széles körben használható drónok szerepét taglaló előadással is folytathatnám, avagy akár a humán erőforrást megspóroló tömegszerű mechanikai vizsgálatok automatizálásának lehetőségeit, megoldásait felvázoló előadást említeném. A „könnycseppjeim” számát növelő témákat tovább sorolhatnám, de egyben nagyon bízom abban is, hogy következő lapszámainkban nyomdafestékjeink lenyomataként széles körben megismerkedhetnek hűséges olvasóink azon gondolatokkal, tapasztalatokkal, amelyeket az előadóktól hallhattunk, de most még nem olvashatjuk.

Jelen lapszámot olvasó szakemberek „nevető” szemeit pedig annak (is) köszönhetjük, hogy indul az ***Anyagvizsgáló szakmérnök*** (szakember) képzés a Debreceni Egyetem Műszaki Karának gondozásában, megjelenik a jelenleg St. Louis-ban élő Szabó Barna[2,3], világhírű professzor önálló cikke korunk műszaki tervezési területét meghatározó témakörben „a végeselemes modellezéstől a szimuláció tudományáig”[4], ill. a korábbi lapszámban elindított könyvismertetés is folytatódik. Technikatörténeti szempontból is figyelemre méltó áttekintést kínál rovatvezetőnk írása az 1891-ben alapított, műszaki életünkben meghatározó szerepet betöltő, közismerten „FÉG”[5] rövidítéssel emlegetett vállalat történetéről. Portré rovatunkban pedig egy elismert fiatal szakember eddigi szakmai életútját ismerhetik meg Olvasóink. Sorolhatnám a most megjelenő szakmai közleményeket, de nem teszem. Inkább Önök olvassák és kommentálják minél többször, hiszen legtöbbet a szakmai körben történő véleménycserékből nyerhetünk. Ekkor ugyanis az eltérő szempontokból indulva „járjuk körbe az adott témát”!

Végül, de – jelentőségét tekintve – nem utolsó sorban köszönet a Magyar Anyagvizsgálók Egyesületének (MAE), annak vezetőségének a lapszám megjelentetéshez való hozzájárulásért. Kérjük egyben a Tisztelt Olvasóinkat, hogy ötleteikkel, gondolataikkal járuljanak hozzá a 2026. év végéig mandátummal bíró elnökség összetételének kiválasztásához.

Tóth László
felelős szerkesztő

1 Magyar közmondások, szólások diákoknak. Puedlo Könyvkiadó. Szerk. Gerencsér F. (142. old)
2 Szabó B.: Ifjan-Éretten-Öregen. Beszélgetőtárs: Tóth L., 2022. https://mek.oszk.hu/23700/23757
3 B. Szabó: On being 85 years young, Interviewer: L.Tóth, 2022. https://mek.oszk.hu/23700/23758
4 Dudra J., Szávai Sz.: Könyvismertetés: Dr. Szabó B.: Bridging the Gap. Anyagvizsgálók Lapja, 47-48. old.2025/IV.
5 https://hu.wikipedia.org/wiki/fegyver és gázkészülékek gyára

ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA

A Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség (MAROVISZ) kiadványa,

az ország vezető szaklapja.
Alapítva: 1991-ben.

Országos, iparágakat átfogó, szakmai folyóirat a minőségért és biztonságunkért.

Kiadó:
Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség
cím: 1191 Budapest, Üllői út 206., B. ép. II. lh.
tel.: +36 1 / 278 0632;
fax: +36 1 / 278 0633;
e-mail: *marovisz@marovisz.hu*
felelős kiadó: *a MAROVISZ elnöke*

Szerkesztőség:
felelős szerkesztő: Dr. Tóth László
tel.: +36 30 932 2690
e-mail.: *info@anyagvizsgaloklapja.hu*
avilap.szerk@gmail.com

Szerkesztőbizottsági tagok:
Dr. Tóth László (felelős szerkesztő)
Dr. Dudra Judit (főszerkesztő)
Erdei Réka (digitális szerkesztő)

Hazai szerkesztőbizottsági tagok:
Dr. Divós Ferenc
Fodor Olivér
Kecskés Péter
Dr. Koncsik Zsuzsanna
Dr. Laczik Bálint
Lutor Attila
Dr. Mankovits Tamás
Dr. Németh Tibor
Skopál István
Dr. Somogyi Sándor
Dr. Spisák Bernadett
Szűcs Pál

Nemzetközi szerkesztőbizottsági tagok:
Dr. Bitay Enikő (Románia)
Dr. Djorde Dobi (Szerbia)
Dr. Dusza János (Szlovákia)
Dr. Kristián Máthis (Cseh Köztársaság)
Dr. Major Zoltán (Ausztria)

Az Anyagvizsgálók Lapja honlapja:
www.anyagvizsgaloklapja.hu

ISSN: 1215-8410

JEGYZET – NOTE

TÓTH László **3**
Jegyzet
Note

RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLATOK – NON DESTRUCTIVE TESTING

VARGA Dorottya, SZABÓ Péter János **5**
Forraszkötések termomechanikai degradációjának vizsgálata 3D röntgenmikroszkópiával és végeselemes szimulációval
Investigation of the thermomechanical degradation of solder joints using 3D X-ray microscopy and finite element simulation

MECHANIKAI VIZSGÁLATOK – MECHANICAL TESTING

KULCSÁR Benedek, SZÁVAI Szabolcs, DUDRA Judit **12**
A műszerezett keménységmérés eredményének kapcsolata hagyományos anyagjellemzőkkel
Correlation of instrumented indentation testing result curve with conventional material properties

ÁLLAPOTELLENŐRZÉS, ÉLETTARTAM GAZDÁLKODÁS – CONDITION CONTROLL, LIFE CYCLE MANAGEMENT

SZENTHE Indikó, SLONSZKI Emese, DUDRA Judit, SZÁVAI Szabolcs, HAARGITAI Balázs **21**
A DELISA-LTO projekt eredményei: integrált módszertan a VVER atomerőművek hosszú távú üzemeltetésének megalapozására
Results of the DELISA-LTO Project: An Integrated Methodology Supporting the Long-Term Operation of VVER Nuclear Power Plants

MINŐSÉGBIZTOSÍTÁS (MINŐSÉG, MEGBÍZHATÓSÁG) – QUALITY ASSURANCE (QUALITY, RELIABILITY)

SOMOGYI Sándor **25**
Eljárásvizsgálatok és személyzet tanúsítás – 4. rész
Qualification of procedures and personnel – Part 4

HÍREK – NEWS

TÓTH László **29**
Beszámoló a 12. AGY konferenciáról
Report on the 12th AGY Conference

GYÖNGYÖSI Szilvia, MANKOVITS Tamás **33**
Anyagvizsgáló szakmérnöki képzés a Debreceni Egyetem Műszaki Karán
Material testing engineer postgraduate program at the Faculty of Engineering of the University of Debrecen

PORTRÉ – PORTRAIT

SKOPÁL István **37**
Beszélgetés Takács Csabával
Interview with Csaba Takács

ÉRDEKESSÉGEK – POINT OF INTEREST

SZABÓ Barna **39**
A végeselemes modellezéstől a szimuláció tudományáig: A numerikus szimulációban rejlő lehetőségek kiaknázása
From Finite Element Modeling to Simulation Science: Unlocking the Power of Numerical Simulation

DUDRA Judit, SZÁVAI Szabolcs **42**
Bridging the Gap: Advancing Finite Element Analysis in Numerical Simulation – 1. rész: Miért aktuális ez a könyv most?
Bridging the Gap: Advancing Finite Element Analysis in Numerical Simulation – Part 1: Why Is This Book Relevant Now?

LACZIK Bálint **48**
A régi Fegyvergyár képei I.
Pictures of the old Weapon Factory I.

KOCSIS-GALUSKA Anna, JOÓ Gyula **53**
MOL Petrolkémia Zrt. Meghibásodási Archívuma – 5. rész
MOL Petrochemicals Ltd. Failure Archive – Part 5

Keresztrejtvény - Crossword **56**

Forraszkötések termomechanikai degradációjának vizsgálata 3D röntgenmikroszkópiával és végeselemes szimulációval

Investigation of the thermomechanical degradation of solder joints using 3D X-ray microscopy and finite element simulation

Varga Dorottya[a,c], Szabó Péter János[b]

[a]Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, PhD hallgató, varga.dorottya@edu.bme.hu
[b]Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Egyetemi tanár, szabo.peter.janos@gpk.bme.hu
[c]Robert Bosch Kft., Mérnök, dorottya.varga@hu.bosch.com

Kulcsszavak

forraszkötés,
röntgenmikroszkóp,
megbízhatóság,
végeselemes szimuláció,
roncsolásmentes anyagvizsgálat

Absztrakt

A forraszkötések termomechanikai megbízhatóságának vizsgálatához 0805 méretű, Innolot forraszanyaggal szerelt ellenállásokat hőciklusoknak tettünk ki. A degradáció nyomon követésére röntgenmikroszkópos felvételeket készítettünk, amelyek alapján a repedéshosszakat és egy új térfogati mérőszámot, a forraszkötés és a teljes térfogat arányát határoztuk meg. Az eredmények szerint a termikus ciklusok előrehaladtával a repedések növekedtek, míg a térfogati arány egy közel 500 ciklusos inkubációs szakasz után lineárisan csökkent. A röntgenfelvételekből létrehozott valós geometriájú végeselemes modell eredményei igazolják, hogy a röntgenmikroszkópos adatokon alapuló valós geometria alkalmazása a forraszkötések mechanikai viselkedésének pontosabb modellezését teszi lehetővé, és megfelelő alapot biztosíthat az élettartam-becsléshez.

Keywords

solder joint,
X-ray microscopy,
reliability,
finite element simulation,
non-destructive testing

Abstract

To investigate the thermomechanical reliability of solder joints, 0805 size resistors assembled with Innolot solder were subjected to thermal cycling. To monitor the degradation, X-ray microscopy images were taken, based on which crack lengths and a new volumetric metric, the solder/total volume ratio, were determined. According to the results, the cracks grew continuously, while the volume ratio decreased linearly after an incubation period of nearly 500 cycles. The results of the finite element model based on the real geometry reconstructed from X-ray images demonstrate that using the actual geometry derived from X-ray microscopy data enables a more accurate modeling of the mechanical behavior of solder joints and can provide a suitable basis for lifetime estimation.

1. Bevezetés

A forraszkötések kritikus szerepet játszanak az elektronikai eszközök megbízhatóságában, mivel ezek biztosítják a mechanikai és elektromos kapcsolatot az alkatrészek és a nyomtatott áramköri lap (NYÁK) között [1, 2]. A forraszkötések [3] tönkremenetelének megértése kiemelt feladattá vált, mivel tönkremenetelük akár végzetes kimenetelű baleesetet is okozhat. A forraszkötéseket érintő egyik kritikus tönkremeneteli mechanizmus a kisciklusú fáradás [4], amit a ciklikus terhelés vált ki, mivel a nyomtatott áramköri lap és a ráforrasztott alkatrész hőtágulási együtthatója eltérő. Az elmúlt két évtizedben a kutatók számos új módszert fejlesztettek repedések vizualizációjára és vizsgálatára [3, 5, 6], azonban számos esetben a módszer nem ad 3D információt a repedés morfológiájáról. A repedésterjedés vizsgálatára szolgáló hagyományos módszerek gyakran roncsolásos vizsgálatokat igényelnek, ami korlátozza a repedések előrehaladásának megfigyelését ugyanazon a mintán. Ezzel szemben a röntgenmikroszkópia (X-ray microscopy, XRM) egy hatékony, roncsolásmentes képalkotási technikát kínál, amely lehetővé teszi a forraszkötések belső szerkezetének és hibáinak nagy felbontású megjelenítését [7].

Számos cikkben [8-11] vizsgálnak forraszkötéseket röntgen-számítógépes tomográfia (computed tomography, CT) segítségével. Chang és munkatársai [12] röntgentomográfiai felvételekkel vizsgálták a kötésekben lévő üregek viselkedését elektromigráció során. Az elektromigrációs vizsgálat kezdeti szakaszában elkülönült üregek keletkeztek és jelentősen megnőttek. A vizsgálati fázis későbbi szakaszában ezek az üregek összeolvadtak nagyobb üregekké, ami jelentősen befolyásolta a forrasztási kötések mechanikai tulajdonságait. Hasonlóképpen, Kelly és munkatársai [13] röntgen-mikrotomográfiát (μCT) alkalmaztak az intermetallikus vegyületek (intermetallic compounds, IMC-k) és az üregek kialakulásának vizsgálatára az elektromigráció során. Eredményeik szerint az IMC-k a nagy szögű szemcsehatárok és ikerhatárok mentén növekedtek. Ezen felül az üregek disszociáltak a katód felületén, ami az egyes üregek térfogatának csökkenéséhez vezetett, miközben az üregek teljes száma gyorsan nőtt. Ezek a tanulmányok értékes betekintést nyújtanak a forrasztási kötések belső szerkezetébe, és igazolják, hogy az üregek eloszlása elemezhető és vizualizálható. Az említett tanulmányok azonban nem foglalkoznak azzal, hogy ezek az üregek hogyan viselkednek egy valódi forrasztási kötésben hőciklusok során.

Mivel a röntgentomográfia roncsolásmentes módszer [14, 15], hatékony eszköz lehet a repedésterjedés követésére is. Az irodalom áttekintése alapján a 3D-s képalkotó technológiákat alkalmazó, forrasztási kötések repedésterjedését vizsgáló kutatások száma korlátozott. A fejlett képalkotási technikák alkalmazásával célunk a repedések viselkedésének és az elektronikai eszközök megbízhatóságára gyakorolt hatásuknak a vizsgálata. A terület fejlődésével a repedésterjedés mechanizmusainak folyamatos kutatása elengedhetetlen lesz a megbízhatóbb elektronikai eszközök fejlesztéséhez.

A röntgenmikroszkópia alkalmazása azonban nem csupán a belső károsodások roncsolásmentes megfigyelését teszi lehetővé, hanem egyre nagyobb jelentőséggel bír a valós geometrián alapuló numerikus modellezésben is [16]. Az XRM-felvételekből rekonstruált háromdimenziós térfogati modellek [17] közvetlenül felhasználhatók végeselemes modellek létrehozására, amelyek a

hagyományos, számítógéppel támogatott tervezéssel (computer-aided design, CAD) létrehozott idealizált geometriákkal szemben a forraszkötések tényleges alakját, a gyártásból származó geometriai eltéréseket, az üregek eloszlását [18], valamint a már kialakult repedéseket is figyelembe veszik [19].

A jelen kutatás célja a forraszkötések termomechanikai terhelésből eredő tönkremenetelének roncsolásmentes követése. A röntgenmikroszkóp lehetővé teszi, hogy végig követhessük a belső tönkremenetelt, illetve reális kiindulási geometriát biztosít végeselemes szimulációkhoz.

2. Vizsgált anyagok és módszerek

A vizsgálatokhoz 0805-ös felületszerelt chipellenállásokat választottunk, mivel ezek széles körben alkalmazott elektronikai alkatrészek. Három ellenállást (K1, K2 és K3 azonosítóval) Innolot [20] forraszpasztával forrasztottunk fel a nyomtatott áramköri lapokra. A minták ezután hőciklusos terhelést kaptak, -40 °C és 125 °C között az IPC-9701B [21] szabványnak megfelelően. A fűtési és hűtési sebesség 10 °C/perc, a hőntartási idő 15 perc volt; a vizsgálat összesen 2000 ciklusból állt.

2.1 Röntgenmikroszkópos vizsgálat

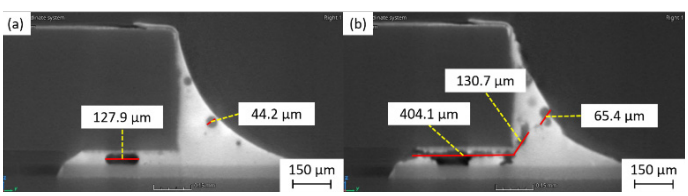
A forraszkötések öregítése előtt egy kiindulási felvétel készült, majd 500, 1000, 1500 és 2000 ciklus után készült felvétel.

A vizsgálatokat egy Zeiss Xradia Versa 620-as röntgenmikroszkóp segítségével végeztük el, a felvételek készítése során pedig 160 V-os gyorsító feszültséget és 25 W-os teljesítményt állítottunk be. A mintákat a mintatartóra rögzítettük, mivel a 3D-s felvételek elkészítéséhez 360°-os körbeforgatásra volt szükség. A képminőség javítása érdekében He1-szűrőt helyeztünk a röntgensugárforrás és a minta közé, és 4×-es objektívet alkalmaztunk. Egy felvétel elkészítése 3 órát és 20 percet vett igénybe, a végső voxelméret pedig 1,9 µm lett.

A felvételek feldolgozása VGStudio Max 2023.3 szoftver segítségével történt. A szoftver a forrasz térfogatát szürkeárnyalati értékek alapján szegmentálta, majd STL-fájlformátumban exportálta.

2.2 Kiértékeléshez használt mérőszámok

A 3D röntgenmikroszkópos felvételekből számos kiértékelési mérőszám határozható meg, legyen szó kétdimenziós mérőszámokról, például repedéshosszról, vagy háromdimenziós térfogati mérőszámokról.



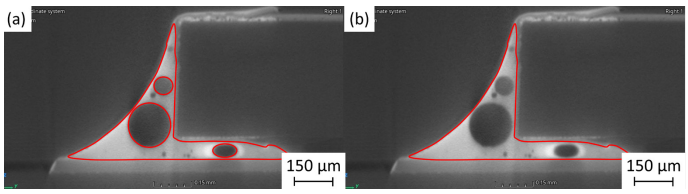
1. ábra: Repedéshosszak meghatározása a) kiindulási állapotban és b) 1500 ciklus után

2.2.1 Folytonossági hibák összesített hossza

Az egyik legfontosabb kiértékelési paraméter a forraszkötésen belüli folytonossági hibák összesített hossza volt, amely magában foglalta a repedéseket és az üregeket is. A repedéshosszak három különböző, egymással párhuzamos síkon is megállapításra kerültek, mivel a 3D-s felvételek lehetővé tették azt, hogy mindig ugyanazt a síkot vizsgáljuk a repedésterjedés során. A forraszkötés két oldalát külön-külön értékeltük ki, a repedéshosszak mérése pedig az 1. ábrán látható módon történt.

2.2.2 Forraszkötés és teljes térfogat aránya

A repedéshossz sok esetben hasznos mérőszám, azonban kétdimenziós információra korlátozódik. A kiválasztott sík sokszor véletlenszerű és nem feltétlenül reprezentálja a teljes kötés állapotát. Ennek a problémának a kiküszöbölésére vezettük be a forraszkötés és teljes térfogat arányát. Szürkeárnyalatos szegmentációt használtunk a forraszkötés térfogatának meghatározásához, míg a teljes térfogat meghatározásakor az üregeket és a repedéseket is figyelembe vettük (2. ábra).



2. ábra: a) Szegmentált forrasztérfogat és b) a teljes térfogat

2.2.3 Komponens elemelkedés

A termikus öregedés során, a forraszanyag degradációjával párhuzamosan, a komponens NYÁK-hoz viszonyított magassága folyamatosan változik. Ezt a változást mértük, mivel ez az érték ugyanúgy megkapható a végeselemes szimulációkból is, így alkalmas lehet a különböző modellek validálására. Mivel a szimulációk során csak egy mintát használtunk fel, ezért a kiértékelés során itt is csak a K1 minta adatait értékeltük ki.

2.3 Végeselemes szimulációk

A végeselemes szimulációk alapjául a K1 minta felvételeit használtuk fel. A szegmentálás után kimentett STL fájlokat beolvastuk az Ansys SpaceClaim szerkesztő programjába, ahol a geometrián különböző javításokat végeztünk: detektáltuk, majd javítottuk az önmetsző felületeket, a hibás éleket és a hibás felületeket. A komponens modellje az adatlapja, valamint a röntgenképen mérhető dimenziók alapján lett felépítve (1. táblázat és 3. ábra).



3. ábra: Komponens méretei

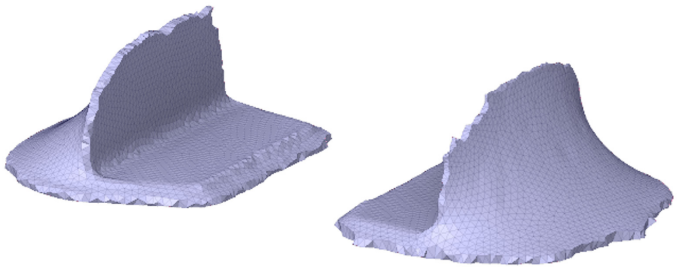
1. táblázat: Komponens névleges méretei

Hosszúság (mm)	Szélesség (mm)	Magasság (mm)	Ónozás szélessége (mm)	Ónozás magassága (mm)
2,0 ± 0,1	1,25 ± 0,1	0,55 ± 0,1	0,3 ± 0,2	0,3 ± 0,2

A forraszanyag, a komponens és a NYÁK csatlakozófelületének (pad) pontos illesztése érdekében geometriai műveleteket – többek között extrudálást és felületegyesítést – hajtottunk végre az érintkezési zónákban.

A megfelelő felületi minőség elérését követően a komponens és a pad pontos helyzetének meghatározása után, logikai kivonási művelettel (Boolean subtract) távolítottuk el az átfedésben lévő térfogatokat a forraszból, ezáltal biztosítva a geometriai átfedések megszüntetését és a megfelelő mechanikai illeszkedést a szimulációs térben.

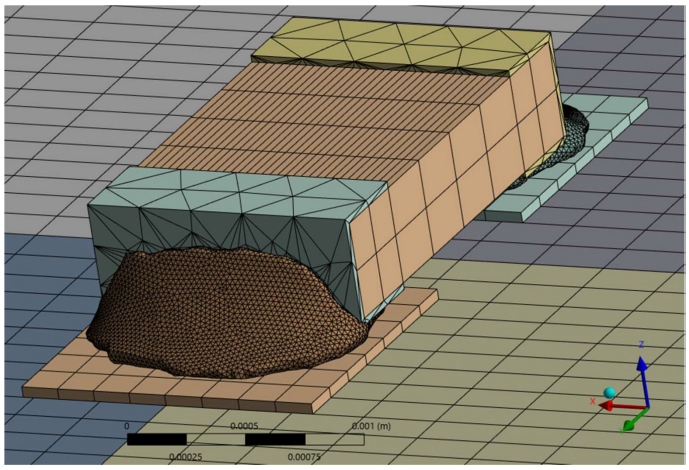
A geometriai modell optimalizálása a mechanikai és elektromos funkcióval nem rendelkező forraszmaradványok és az izolált anyagcseppek eltávolításával folytatódott. A visszamaradó felületi rendellenességek automatikus javítását követően a forrasz geometriáját egy zárt burkolófelület létrehozásával egységesítettük (paraméterek: 0,03 mm elsődleges és 0,1 mm másodlagos felbontás, 40°-os küszöbszög). Ez a lépés egy egyenletes, a további végeselemes hálózáshoz alapot biztosító felületet eredményezett (4. ábra). A vizsgálatokhoz elengedhetetlen térfogati testté történő konvertálás után a komponenst a forraszba illesztettük, végül definiáltuk az ellenállás és az ónozott csatlakozófelületek közötti mechanikai kontaktusokat.



4. ábra: Forraszkötések a burkolófelület létrehozása után

A következő fázisban önálló modellként megterveztük a nyomtatott áramköri lapot és a hozzá tartozó csatlakozó felületeket. A végeselemes háló megfelelő kialakítása érdekében definiáltuk az egyes térfogati testek közötti kapcsolatokat. Végül a kész NYÁK modellt beemeltük a fő szerelésbe és elhelyeztük rajta a forrasz-komponens részegységet. A teljes összeállítás (5. ábra) geometriai modelljének véglegesítésével lezárult az előkészítő szakasz, lehetővé téve a szimulációs vizsgálatok megkezdését.

A termomechanikai szimulációk elkészítése Ansys Mechanical környezetben történt. A számítási kapacitás optimalizálása céljából a nyomtatott áramköri lap kiterjedését a vizsgált komponens közvetlen környezetére korlátoztuk. A modell kinematikai megfogását a NYÁK felületén

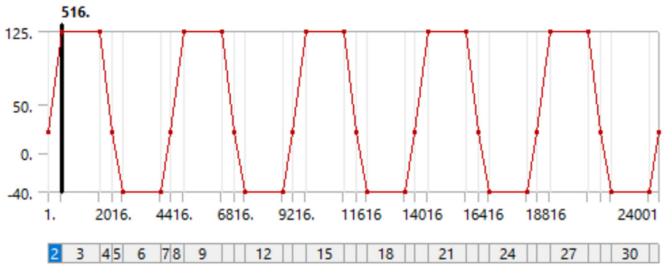


5. ábra: Teljes összeállítás

három ponton, statikailag határozott módon biztosítottuk (X-Y-Z, X-Z, és Z irányú gátlásokkal), elkerülve a hőtágulás akadályozásából fakadó feszültségeket.

A végeselemes háló felépítése során a reguláris térfogatokat (NYÁK, pad, komponens) hexaéderes, a forraszanyagot tetraéderes elemekkel diszkretizáltuk. A megfelelő konvergencia és a numerikus hibák csökkentése érdekében az érintkező felületek környezetében lokális hálósűrítést alkalmaztunk.

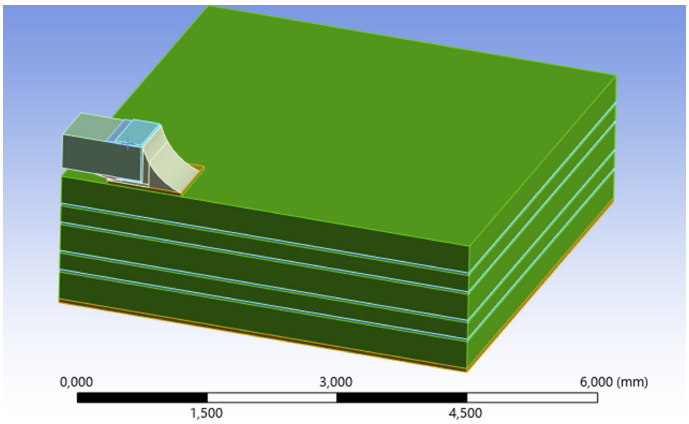
A modell öt ciklusból álló tranziens hőterhelést kapott, a terhelés 22 °C-os kezdeti hőmérsékletről indult, és -40 °C, illetve 125 °C szélsőértékeket tartalmazott, 15 perces hőntartási időkkel (6. ábra). A forraszanyag ciklikus termomechanikai fáradásának modellezésére hőmérsékletfüggő elasztoplasztikus anyagmodellt alkalmaztunk Chaboche-féle keményedési modellel. A megoldó fázis után kiértékeltük a teljes összeállítás globális és irányonkénti deformációit, valamint a forraszanyagban ébredő von Mises-egyenértékű feszültségeket és az akkumulált képlékeny alakváltozásokat.



6. ábra: Hőciklus az idő függvényében

2.4 Ideális modell

A két geometriai modell összehasonlíthatósága érdekében elkészítettük a beforrasztott alkatrész ideális modelljét is (7. ábra). A számítási idők csökkentésének érdekében elegendő volt egy negyedmodellt szimulálni, mivel a modell az x- és az y-tengelyre nézve is szimmetrikus. Az idealizált modellben ugyanazokat az anyagmodelleket, NYÁK-méreteket és hőciklus-paramétereket alkalmaztuk.



7. ábra: Ideális modell

2.5 Anyagállandók és anyagmodellek

A termomechanikai szimulációk során a különböző alkatrészekhez hőmérséklet- és irányfüggő anyagmodelleket alkalmaztunk. A szimulációban részt vevő alkatrészek legfontosabb, szobahőmérsékleten (22 °C-on) érvényes anyagállandóit a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat: A végeselemes vizsgálathoz felhasznált anyagállandók (22 °C-on)

Alkatrész/Anyag	Rugalmassági modulus (GPa)	Poisson-tényező (-)	Hőtágulási együttható (ppm/°C)	Anyagmodell típusa
Forraszanyag/ Innolot	44	0,36	21	Elasztoplasztikus (Chaboche-féle kinematikai keményedéssel)
Komponens	320	0,23	7	Izotróp lineáris elasztikus
NYÁK hordozó/ FR-4	22 (x/y irány) 7,8 (z irány	0,20	15	Ortotróp lineáris elasztikus
Érintkező felület (pad)/ Réz (Cu)	64	0,35	17	Izotróp lineáris elasztikus

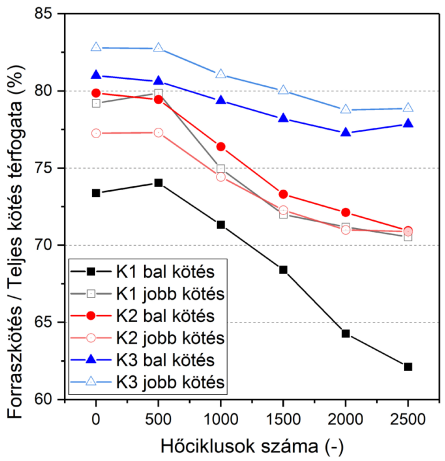
3. Eredmények

3.1 Repedéshossz

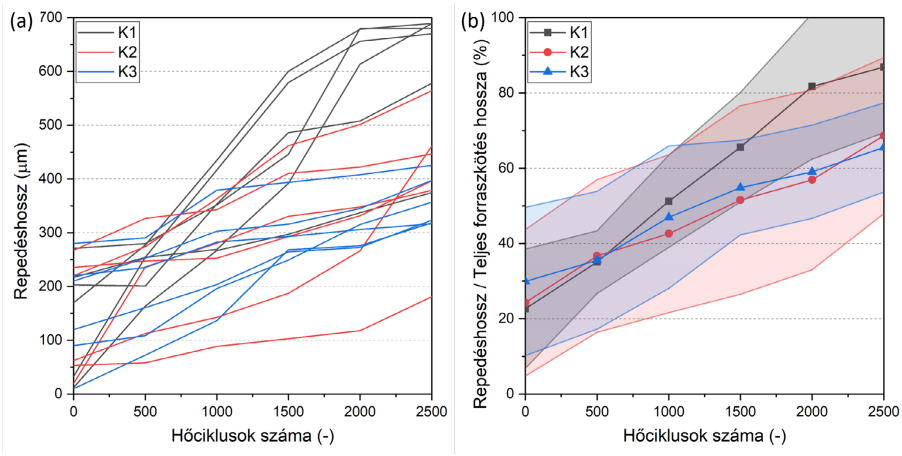
A termikus ciklusok előrehaladtával új repedések jelentek meg, miközben a meglévő repedések fokozatosan növekedtek. A repedések komplex morfológiával rendelkeznek, nehéz meghatározni, melyik repedés vezet a végső mechanikai és elektromos tönkremenetelhez. A 8. a) ábrán látható, hogy a három vizsgált komponens két forraszkötésében kiválasztott három síkban (összesen 6 görbe komponensenként) hogyan változnak a repedéshosszak a termikus ciklusok függvényében. A 8. b) ábrán pedig a mért repedéshosszakat a teljes kötéshosszra normáltuk, majd átlagoltuk, így kapjuk meg a százalékos repedéshosszváltozást.

3.2 Forraszkötés és teljes térfogat aránya

A 9. ábrán látható, hogy a hőciklusok függvényében hogyan változik a forraszkötés és a teljes térfogat aránya. A görbék egy kezdeti szakaszt követően közel lineárisan csökkennek a hőciklusszám növekedésével. Ez a közel lineáris tendencia arra utal, hogy a vizsgált időszakban a forraszkötés degradációjának üteme közel állandó, ami potenciálisan alkalmassá teheti a mérőszámot a hátralévő hasznos élettartam becslésének támogatására.



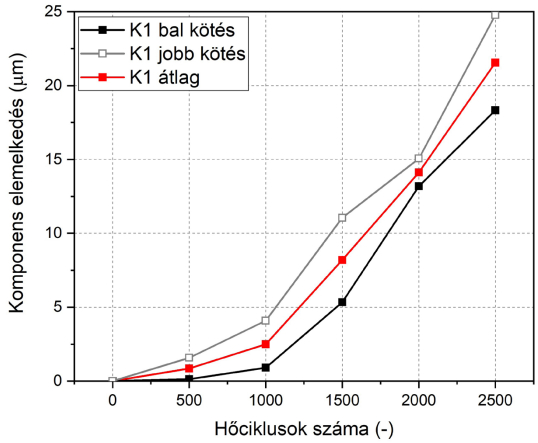
9. ábra: A forraszkötés és a teljes térfogat aránya a termikus ciklusok függvényében



8. ábra: a) Repedéshosszak és a b) repedéshossz teljes kötéshosszhoz viszonyított aránya szórási sávokkal a hőciklusok függvényében

További kulcsfontosságú megfigyelés a görbe kezdeti szakaszában – konkrétan megközelítőleg az 500. termikus ciklusig – mutatkozó plató jelenléte. Ez egy kezdeti inkubációs szakasz jelenlétére utalhat, amely során a vizsgált térfogati mérőszámban még nem jelentkezik számottevő változás. A degradációs folyamat láthatóan csak ezen kezdeti stabilizációs fázist követően indul meg vagy gyorsul fel.

Az inkubációs szakaszt követően, körülbelül az 500. és az 1500. ciklus között a térfogati arány közel lineárisan csökken, ami ebben az intervallumban

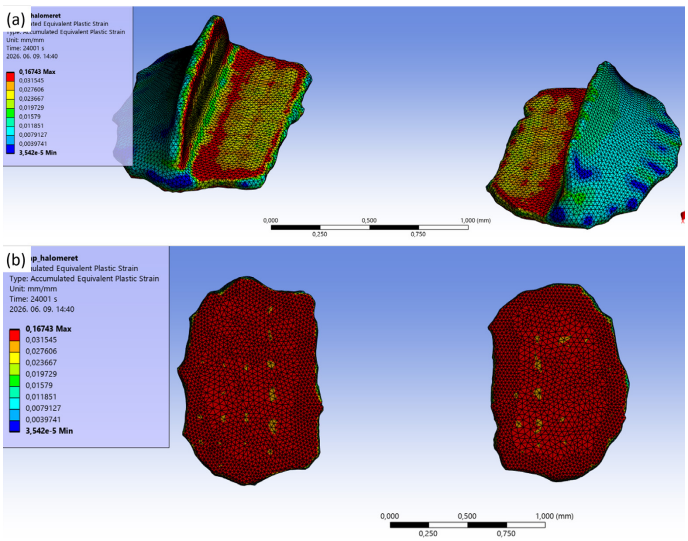


10. ábra: A komponens elemelkedése a hőciklusok függvényében

állandó degradációs ütemre utal. Ugyanakkor az 1500. és 2000. ciklus közötti utolsó szakaszban mindegyik görbe esetében törés figyelhető meg: a csökkenés üteme lelassul, a görbe meredekségének abszolút értéke csökken. Ez a jelenség arra utal, hogy egy bizonyos idő elteltével a degradációs folyamat sebessége mérséklődik, ami kulcsfontosságú tényező a hátralévő hasznos élettartam pontos előrejelzésében.

3.3 Komponens elemelkedés

A komponens elemelkedését a hőciklusok függvényében a 10. ábra mutatja be. Látható, hogy a mérési pontok gyorsuló, exponenciális jellegű növekedést mutatnak, tehát kezdetben lassan, majd a hőciklusok számának növekedésével egyre gyorsabban növekszik a komponens és a NYÁK közötti távolság. Ez a növekedés összhangban van a forraszkötés és teljes kötés térfogat arányának változásával, hiszen a térfogati arány csökkenésével a komponens egyre könnyebben mozdulhat el, ami végső soron az alkatrész tönkremeneteléhez, illetve a forraszkötés teljes leválásához vezethet.



11. ábra: A felhalmozódott egyenértékű képlékeny alakváltozás eloszlása a) felülnézetből és b) alulnézetből a forraszkötésekben a valós modellben

3.4 Szimuláció

A 2.3 fejezetben ismertetett módon öt hőciklust szimuláltunk, és az eredményeket az ötödik ciklus végén, szobahőmérsékleten, a forraszkötésre vonatkozóan értékeltük. Az összehasonlításhoz a teljes deformációt, von Mises-egyenértékű feszültséget és a felhalmozódott egyenértékű képlékeny alakváltozást használtuk fel.

A valós forraszgeometria alapján készült modell esetében látható, hogy a komponens alatti, komponens melletti, valamint a réz csatlakozófelülethez (padhez) kapcsolódó régióban alakult ki a legnagyobb felhalmozódott képlékeny alakváltozás (11. ábra). Ez összhangban van az XRM-felvételek alapján megfigyelt repedésindulási helyével, mivel a repedés a komponens alatti régióban indul meg és a komponens mellett terjed tovább.

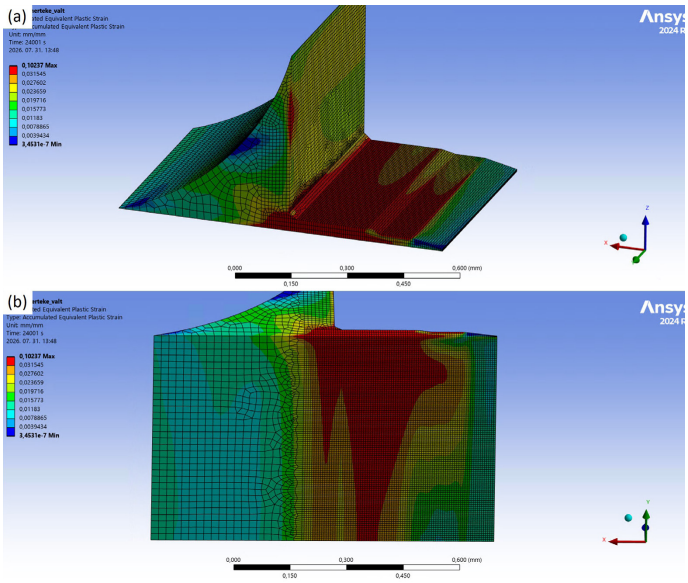
A teljes deformáció 0,76 µm volt, ami 62 %-kal magasabb, mint az ideális geometriájú modellben. A valós, szabálytalan felületen (pl. élesebb bemetszések, durvább felület) a termikus ciklusok során könnyebben és nagyobb mértékben lép fel lokális képlékeny alakváltozás. Mivel a képlékeny alakváltozás visszafordíthatatlan, ezek a lokális deformációk összegződve nagyobb globális maradó elmozdulást eredményeznek a ciklus végén. Különösen az Y-irányú növekedés utal arra, hogy a geometria ebben az irányban a legérzékenyebb a deformáció felhalmozódására. A 39 %-kal magasabb egyenértékű képlékeny alakváltozás (16,7 % vagy 0,167) a valós modellben egyértelműen jelzi, hogy a valós geometria mentén az anyag sokkal nagyobb mértékben deformálódott. Ez a paraméter fontos bemenő változó lehet a fáradásos élettartam-becslési modellekben, például a Coffin-Manson- vagy Darveaux-alapú megközelítésekben.

3.5 Az ideális (CAD-) modell szimulációs elemzése

Az analízis során a modellben fellépő maximális von Mises-egyenértékű feszültség elérte a 41,1 MPa-os értéket. Ez a magas, lokalizált feszültségcsúcs a geometria éles sarkaiban, különösen a forraszkötés és az alaplemez találkozásánál jelentkezett, ami feltehetően az idealizált geometria éles sarkaiban kialakuló feszültségkoncentráció következménye. A teljes deformáció maximális értéke ezzel szemben alacsony, 0,29 µm maradt.

A képlékeny alakváltozás szempontjából a legfontosabb eredmény a felhalmozódott egyenértékű képlékeny alakváltozás eloszlása, amelyet a 12. ábra szemléltet. Az ábrán látható, hogy a legmagasabb alakváltozás a forraszkötés geometriai szempontból kritikus területein koncentrálódik. A szimuláció végére a maximális felhalmozódott képlékeny alakváltozás elérte a 0,102 m/m értéket. A deformációs zóna eloszlása viszonylag homogén, ami a szabályos geometriára vezethető vissza és nem mutatja azokat a komplex, szabálytalan deformációs gócokat, amelyek a valós forraszkötés szabálytalan geometriai morfológiájából adódhatnak.

A numerikus modell felépítése során egy rendkívül sűrű, strukturált hálót alkalmaztunk, amely összesen 292 439 elemből állt. A nagy elemszám, bár biztosította a numerikus



12. ábra: A felhalmozódott egyenértékű képlékeny alakváltozás eloszlása a) felülnézetből és b) alulnézetből a forraszkötésekben az ideális modellben

pontosságot, jelentős számítási kapacitást igényelt, a szimuláció futási ideje meghaladta a 30 órát. Ez rávilágít arra a kompromisszumra, hogy az idealizált modellek pontosságának növelése a hálósűrítésen keresztül rendkívül számításigényes lehet.

3.6 Eredmények összehasonlítása és értékelése

A két végeselemes modell – a röntgenmikroszkópos felvételek alapján rekonstruált valós geometriájú, valamint az idealizált, CAD-alapú modell – eredményeinek összehasonlítása jelentős különbségeket tárt fel, rávilágítva a geometria egyszerűsítésének hatásaira. Az eredmények áttekintését 3. táblázat foglalja össze, amelyben a különbségeket a valós modellhez viszonyítottuk.

3. táblázat: A vizsgált paraméterek a valós és ideális modellekben, valamint a különbségük a valós modellhez viszonyítva

Paraméter	Valós modell	Ideális modell	Eltérés a valós modellhez képest (%)
Felhalmozódott képlékeny alakváltozás	0,167 m/m	0,102 m/m	-39 %
Teljes deformáció	0,76 µm	0,29 µm	-62 %
Maximális egyenértékű feszültség	15,3 MPa	41,1 MPa	169 %
Komponens elemelkedés	0,43 × 10^{-2} µm	3,15 × 10^{-2} µm	633 %
Elemek száma a teljes modellben	58 087 db	292 439 db	403 %
Elemek száma a forraszkötésben	47 112 db	74 251 db	58 %
Számítási idő	3,9 óra	30,0 óra	670 %

A valós geometriát használó modell lényegesen magasabb felhalmozódott képlékeny alakváltozást mutatott, ami az élettartam-becslés szempontjából kritikus paraméter. Ezzel párhuzamosan a teljes deformáció is több mint kétszeresére nőtt az ideális modellhez képest. Ezek az eredmények arra utalnak, hogy a valós geometria komplexitása és szabálytalanságai olyan helyi deformációs zónákat hoznak létre, amelyeket egy idealizált modell nem képes előrejelezni.

Érdekes módon az egyenértékű feszültség csúcsa az ideális modellben volt szignifikánsan magasabb. Ez valószínűleg az idealizált geometria éles sarkaiból vagy simított felületeiből adódó feszültségkoncentráció következménye. A valós modell ezzel szemben jobban eloszlatja a feszültségeket a komplexebb felületi morfológiának köszönhetően.

A legnagyobb különbség a komponens elemelkedésében figyelhető meg. Míg a valós modellben a komponens kis mértékben mozdul el 5 ciklus után, addig az ideális modell esetén ez az érték már számottevő. A valóságban a komponens szintén csak kis mértékben mozdul el, mégpedig 0,86 × 10^{-2} µm mértékben, ha csak az első 5 ciklusra vetítjük az elmozdulásokat. Ez az érték jóval közelebb esik a valós geometrián alapuló szimulációhoz.

Az eredmények azt mutatják, hogy a röntgenmikroszkópos felvételekből rekonstruált valós geometria alkalmazása jelentősen befolyásolja a forraszkötések numerikusan meghatározott mechanikai válaszát, ezért ígéretes alapot jelenthet az élettartam-becslési modellekhez. A jelen vizsgálatban alkalmazott idealizált modell a feszültségcsúcsok túlbecslését és a képlékeny alakváltozás alulbecslését eredményezte, ami az élettartam-becslés során nem konzervatív következtetésekhez vezethet.

4. Összefoglalás

A fent bemutatott eredmények alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:

- A termikus ciklusok előrehaladtával új repedések jelennek meg, és a meglévő repedések növekednek, miközben a forraszkötés és teljes térfogat aránya egy kezdeti (~500 ciklusos) inkubációs szakasz után közel lineárisan csökken.
- A valós geometrián alapuló modellben a legnagyobb felhalmozódott képlékeny alakváltozás a komponens alatti és melletti régiókban alakult ki, összhangban a kísérletileg megfigyelt repedésindulási helyekkel.
- Az ideális modell értéke kb. 39%-kal kisebb a valós modellénél (0,167 m/m) és 62 %-kal nagyobb teljes deformációt (0,76 µm) eredményezett, mint az idealizált CAD-modell.
- Az idealizált modell 169 %-kal magasabb maximális von Mises-feszültséget mutatott (41,1 MPa), ami feltehetően az idealizált geometria éles átmeneteiben kialakuló mesterséges feszültségkoncentrációkkal magyarázható.
- A komponens elemelkedésének mértéke a két modellben jelentősen eltért; a valós modell eredménye közelebb állt a mért elmozdulásokhoz.

- A valós geometria alkalmazása jelentősen eltérő és a kísérleti megfigyelésekhez jobban illeszkedő mechanikai választ eredményezett, miközben a számítási idő is jelentősen csökkent (3,9 óra vs. 30 óra).

Összességében a röntgenmikroszkópos felvételekből rekonstruált valós geometria a forraszkötések termomechanikai viselkedésének az idealizált CAD-modellnél részletesebb és a kísérleti megfigyelésekhez jobban illeszkedő numerikus leírását tette lehetővé.

Köszönetnyilvánítás

A KDP-IKT-2023-900-I1-00000957/0000003 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a KDP-2023 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Szeretném megköszönni a Robert Bosch Kft.-nek a kutatás szakmai támogatását.

Irodalomjegyzék

[1] K. Zeng, K.N. Tu, Six cases of reliability study of Pb-free solder joints in electronic packaging technology, Mater. Sci. Eng. R Reports 38 (2002) 55–105. https://doi.org/10.1016/s0927-796x(02)00007-4

[2] J.H. Lau, State of the Art of Lead-Free Solder Joint Reliability, J. Electron. Packag. 143 (2021). https://doi.org/10.1115/1.4048037.

[3] B. Bodi, V. Gonda, Characterization of Thermal Behavior of Lead-Free SAC305 Solder for Optimal Manufacturing in Soldering Processes, CANDO-EPE 2024 - Proc. IEEE 7th Int. Conf. Work. Obuda Electr. Power Eng. (2024) 323–329. https://doi.org/10.1109/CANDO-EPE65072.2024.10772927.

[4] W.W. Lee, L.T. Nguyen, G.S. Selvaduray, Solder joint fatigue models: Review and applicability to chip scale packages, Microelectron. Reliab. 40 (2000) 231–244. https://doi.org/10.1016/s0026-2714(99)00061-x.

[5] R.J. Coyle, K. Sweatman, B. Arfaei, Thermal Fatigue Evaluation of Pb-Free Solder Joints: Results, Lessons Learned, and Future Trends, Jom 67 (2015) 2394–2415. https://doi.org/10.1007/s11837-015-1595-1.

[6] S. Hamasha, Y. Jaradat, A. Qasaimeh, M. Obaidat, P. Borgesen, Assessment of Solder Joint Fatigue Life Under Realistic Service Conditions, J. Electron. Mater. 43 (2014) 4472–4484. https://doi.org/10.1007/s11664-014-3436-3.

[7] D.-P. Tran, T.-W. Lin, K.-C. Shie, C. Chen, Non-destructive micro analysis of electromigration failures in solder microbumps using 3D X-ray computed tomography, Mater. Charact. 194 (2022) 112404. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112404.

[8] Y. Su, J. Shi, Y.-M. Hsu, D.-Y. Ji, A.D. Suer, J. Lee, Volumetric nondestructive metrology for 3D semiconductor packaging: A review, Measurement 225 (2024) 114065. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.114065.

[9] Y. Su, W. Ma, Y. (Michael) Yang, Perovskite semiconductors for direct X-ray detection and imaging, J. Semicond. 41 (2020) 051204. https://doi.org/10.1088/1674-4926/41/5/051204.

[10] B.C. Wolz, C. Jaremenko, F. Vollnhals, L. Kling, J. Wrege, S. Christiansen, X-ray microscopy and automatic detection of defects in through silicon vias in three-dimensional integrated circuits, Eng. Reports 4 (2022). https://doi.org/10.1002/eng2.12520.

[11] C. Schmidt, 3-D X-Ray Imaging With Nanometer Resolution for Advanced Semiconductor Packaging FA, IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol. 8 (2018) 745–749. https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2827058.

[12] Y.W. Chang, Y. Cheng, F. Xu, L. Helfen, T. Tian, M. Di Michiel, C. Chen, K.N. Tu, T. Baumbach, Study of electromigration-induced formation of discrete voids in flip-chip solder joints by in-situ 3D laminography observation and finite-element modeling, Acta Mater. 117 (2016) 100–110. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.059.

[13] M.B. Kelly, S. Niverty, N. Chawla, Four dimensional (4D) microstructural evolution of Cu6Sn5 intermetallic and voids under electromigration in bi-crystal pure Sn solder joints, Acta Mater. 189 (2020) 118–128. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.02.052.

[14] T. Bubonyi, P. Barkóczy, Z. Gácsi, Comparison of CT and metallographic method for evaluation of microporosities of dye cast aluminum parts, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 903 (2020) 012038. https://doi.org/10.1088/1757-899X/903/1/012038.

[15] A. Kemény, B. Leveles, T. Bubonyi, I.N. Orbulov, Effect of particle size and volume ratio of ceramic hollow spheres on the mechanical properties of bimodal composite metal foams, Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 140 (2021). https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106152.

[16] E. Maire, P.J. Withers, Quantitative X-ray tomography, Int. Mater. Rev. 59 (2014) 1–43. https://doi.org/10.1179/1743280413Y.0000000023.

[17] S. Jónás, M. Tisza, Finite Element Modelling of Clinched Joints, Adv. Technol. Mater. 43 (2018) 1–6. https://doi.org/10.24867/ATM-2018-1-001.

[18] M.A. Dudek, L. Hunter, S. Kranz, J.J. Williams, S.H. Lau, N. Chawla, Three-dimensional (3D) visualization of reflow porosity and modeling of deformation in Pb-free solder joints, Mater. Charact. 61 (2010) 433–439. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.01.011.

[19] E. Padilla, V. Jakkali, L. Jiang, N. Chawla, Quantifying the effect of porosity on the evolution of deformation and damage in Sn-based solder joints by X-ray microtomography and microstructure-based finite element modeling, Acta Mater. 60 (2012) 4017–4026. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.03.048.

[20] M.R. Chowdhury, S. Ahmed, A. Fahim, J.C. Suhling, P. Lall, Mechanical characterization of doped SAC solder materials at high temperature, in: 2016 15th IEEE Intersoc. Conf. Therm. Thermomechanical Phenom. Electron. Syst., IEEE, 2016: pp. 1202–1208. https://doi.org/10.1109/ITHERM.2016.7517684.

[21] IPC-9701B Thermal cycling Test Method for fatigue Life Characterization of Surface Mount Attachments, 2022.

Anyagvizsgálók Lapja
2026/I-II. lapszám

A műszerezett keménységmérés eredményének kapcsolata hagyományos anyagjellemzőkkel

Correlation of instrumented indentation testing result curve with conventional material properties

Kulcsár Benedek[a], Szávai Szabolcs[b], Dudra Judit[c]

[a]Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet, doktorandusz, kulcsar.benedek.zsolt@student.uni-miskolc.hu
[b]Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet, egyetemi docens, szabolcs.szavai@uni-miskolc.hu
[c]AEMI Atomenergia Mérnökiroda Kft., vezető mérnök, dudra.judit@aemi-tech.hu

Kulcsszavak

műszerezett keménységmérés, szilárdsági jellemzők, kiértékelési modellek, irodalomkutatás

Absztrakt

A cikk a műszerezett keménységmérés eredményeiből származtatható anyagjellemzők meghatározásának módszertanát tekinti át. Összehasonlítja a rugalmassági modulus és a keménység számítására szolgáló klasszikus modellek. Emellett a cikk részletesen tárgyalja a folyáshatár, a szakítószilárdság és a törési szívósság becslési lehetőségeit, valamint a műszerezett keménységmérés eredményének kapcsolatát a kúszás és kifáradás jelenségeivel.

Keywords

instrumented indentation, strength properties, evaluation methods, literature research

Abstract

The article reviews the methodology for determining material properties derived from the results of instrumented hardness testing. Classic models for calculating elastic modulus and hardness are compared. In addition, the article discusses in detail the possibilities for estimating yield strength, tensile strength, and fracture toughness, as well as the relationship between the results of instrumental hardness measurement and the phenomena of creep and fatigue.

1. Bevezetés

Az Anyagvizsgálók Lapjának 2025/I-II. lapszámában megjelent cikkünkben [1] a műszerezett keménységmérés eredményének szerszám-geometriától függetleníthető kiértékelési módszerét mutattuk be. Ennek a munka alapú mérőszámnak az alkalmazása a hagyományos keménységértékek egzakt összehasonlítását teszi lehetővé. A vizsgálni kívánt anyagok pontos jellemzése túlmutat a keménység értékének ismeretén, mivel az anyagot terhelő különböző igénybevételekkel szembeni ellenállás más-más paraméterekkel írható le.

Ezen paraméterek ismerete a nemzetközi gyakorlatban elterjedt mérési eljárások alkalmazásának eredménye. A mérések eltérő követelményei komplikált vizsgálati mátrixot és jelentős felhasznált anyagmennyiséget eredményeznek egy új anyagminőség tulajdonságainak meghatározásakor. Emellett a mérések költségvonzata és lefolytatásuk időtartama sem elhanyagolható. Ideális esetben elegendő lenne egy olyan mérést elvégezni, amely eredményéből képezhetőek azok a mérőszámok, amelyek hagyományosan specifikus anyagvizsgálatokból nyerhetőek ki. Ehhez a mérőszámok közötti kapcsolat kutatása elengedhetetlen. Ilyen egyszerű, lineáris kapcsolat alapján készülnek a szakítószilárdság és keménység értékét megfeleltető táblázatok [2]. Az ilyen összefüggések nagy hányada komplexebb kapcsolatot ír le a lineáris összefüggésnél, így kutatásuk is nagyobb erőfeszítést igényel. Az előzetesen kiértékelt anyagjellemzők korrelációjánál teljesebb megoldásra vezethet az eredménygörbe felhasználása a kívánt paraméter meghatározásához. Erre a célra megfelelő a műszerezett keménységmérésből származó erő-elmozdulás görbe. Ez a tulajdonsága teszi a műszerezett keménységmérést kiemelkedően kutatott módszerré napjainkban is.

A meghatározott anyagjellemzők pontossága lendületesen fejlődik a méréstechnológia fejlődésének és a numerikus szimuláció szélesebb körű alkalmazásának eredményeként. Ennek a lendületnek adhat a jövőben új löketet a mesterséges intelligencia alkalmazása, amely nagy adatmennyiségek kezelése által képes összefüggéseket keresni a kívánt paraméterek és a mérési görbék adatpontjai között.

Ebben a cikkben a műszerezett keménységmérés eredményéből meghatározható anyagjellemzőket helyezzük a középpontba. Összehasonlítjuk a rugalmassági modulus és keménység meghatározásához alkalmazott kiértékelési módszereket, és ismertetjük azokat a kutatási eredményeket, amelyek a mérnöki gyakorlatban elterjedt anyagjellemzők kiértékelésével foglalkoznak.

2. A megfelelő anyagvizsgálat

A mérnöki gyakorlatban alkalmazott anyagjellemzők köre a rugalmas alakváltozás folyamataitól, a képlékeny alakváltozás vizsgálatán keresztül a rideg viselkedés leírásáig sok típusú mérőszámot foglal magába. Alap mérési eljárásnak – amely eredményéből ezek a paraméterek származtathatóak – olyan módszert érdemes választani, ahol a mérés során az igénybevétel több alakváltozási mechanizmust is eredményez a vizsgált anyagban. Emellett megfontolandó szempontok a mérés gazdaságossága, a kivitelezés egyszerűsége, gyorsasága és megismételhetősége, illetve az, hogy eredményül könnyen mérhető jellemzőket rögzítsünk, ezzel csökkentve a számítási modellek pontatlanságait. Ebből adódóan a műszerezett keménységmérés eljárását is szükséges elemezni a felsorolt követelmények szempontjából.

A keménységmérés kontinuummechanikai komplexitását már a 19. század végén is ismerték. A francia matematikus és fizikus, Boussinesq, a benyomó szerszám hatására a rugalmas féltérben ébredő feszültségek eloszlását vizsgálta 1885-ben publikált munkájában [3]. Ez a munka alapozta meg a későbbi kutatók elméleti munkáját, amelyekben az érintkező testek kontaktproblémáját tárgyalták. Felismerték, hogy a keménységmérés

kivitelezése során tisztán rugalmas, rugalmas képlékeny, illetve teljesen kialakult képlékeny alakváltozás is előidézhető a vizsgált testben. A hagyományos keménységmérés során ezek közül kizárólag a testben keletkező képlékeny alakváltozás nagyságát lehet vizsgálni a lenyomat nagyságának mérésével. A műszerezett keménységmérés azonban lehetőséget ad a további alakváltozási mechanizmus értékelésére.

Az eredmény kiértékelésére szolgáló elterjedt módszerek alapja is a rugalmas alakváltozás pontos leírása. A legtöbbször alkalmazott módszerek M. F. Doerner és W. D. Nix, illetve W. C. Oliver és G. M. Pharr neveihez kötődnek [4, 5]. A két módszer jelentősége maximális terhelésnél fennálló valódi kontaktfelület meghatározásában áll. A tényleges érintkező felület nagyságának meghatározása a pontos keménység és rugalmassági modulus számításának alapja.

Az említett mérőszámok mellett a műszerezett keménységmérés eredménye alkalmas további anyagjellemzők meghatározására is. A további fejezetekben ezeknek az anyagjellemzőknek a meghatározásával, kiértékelésük módszertanával és pontosságával foglalkozunk.

3. Anyagjellemzők meghatározási módszerei

3.1 Rugalmassági modulus

A műszerezett keménységmérés eljárásának kifejlesztésekor már az első kutatások is foglalkoztak a rugalmassági modulus meghatározásával. A vizsgált anyag rugalmassági modulusa hatással van a mérésből nyert keménység értékére is. A rugalmassági modulust minden kezdeti kutatás a maximális reakcióerő elérése után, az erő-elvételi szakasz alapján származtatta. Felismerték, hogy összefüggés van a visszaterhelési görbe meredeksége (vagyis a teljes rendszer merevsége) és az anyag rugalmassági modulusa között Bulychev és társai munkássága nyomán [6]. A merevséget az alábbiak szerint származtatja a Bulychev-Alekhin-Shorshorov egyenlet:

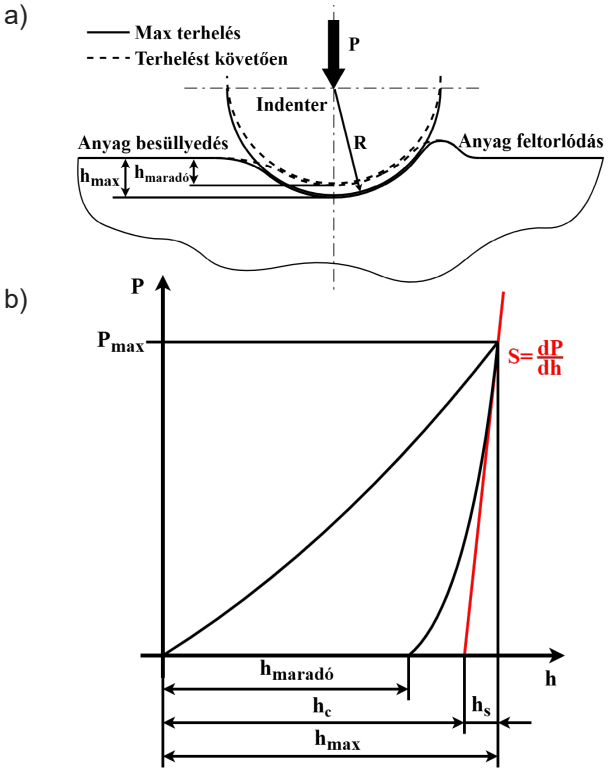
$$S = \frac{dP}{dh} = \frac{2\sqrt{A_c}}{\sqrt{\pi}} E_r \,. \qquad (1)$$

A képletben S a rendszer merevsége (a visszaterhelési görbeszakasz meredeksége), P a terhelőerő, h a benyomódási mélység, A_c a kontaktfelület nagysága, E_r pedig a redukált rugalmassági modulus, amely a benyomó szerszám és az anyag rugalmassági modulusának eredője.

Az E_r érték a következő képlet alapján számítható a benyomó szerszám Young-modulusa és Poisson tényezője (E_i és ν_i), valamint a vizsgált anyaganyagra vonatkozó azonos paraméterek értékeinek ismeretében:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \,. \qquad (2)$$

A bemutatott egyenletek alkalmazásához szükséges a visszaterhelési görbe meredekségének ismerete. Sík végű benyomó szerszámok esetében, mivel a kontaktfelület nagysága az erőelvétel következtében nem kezd el csökkenni, a visszaterhelési görbeszakasz kezdeti része



1. ábra: *a) Műszerezett keménységmérési eljárás sematikus rajza;*
b) A műszerezett keménységmérés eredményéhez kapcsolódó benyomódási mélység definíciók

lineáris kapcsolatot ír le. A Doerner-Nix modell arra a feltételezésre épül, hogy más szerszám geometriák esetében is alkalmazható a lineáris megközelítés. Modelljükben a kontaktfelület és a meredekség meghatározásához a visszaterhelési görbeszakasz első harmadára illesztett egyenessel közelítik a vizsgált meredekséget, majd ebből határozzák meg a kontakt felülethez tartozó benyomódási mélységet (h_c) a (3) egyenlet szerint [4]. Az egyenletben h_s az anyag besüllyedésének mélysége, amely szakaszon az anyag nem érintkezik a benyomó szerszámmal, h_{max} pedig a maximális mélység (1. ábra).

$$h_c = h_{max} - h_s \,, \qquad (3)$$

ahol a besüllyedés mélysége a Doerner-Nix modell alapján a következő szerint számítható:

$$h_s = P\frac{dh}{dP} \,. \qquad (4)$$

A lineáris modell, bár a benyomó szerszám geometriák széles skálájára alkalmazható, kis mértékű pontatlanságot eredményez a rugalmassági modulus meghatározásában. Ez a modell a kontakt felülethez tartozó benyomódási mélységet pontosan csak síkvégű szerszám alkalmazásakor, vagy teljesen képlékeny alakváltozás esetén képes meghatározni. Ezeket a megállapításokat támasztották alá kísérletekkel és analitikus számításokkal W. C. Oliver és G. M. Pharr. A róluk elnevezett modell a (4) egyenlet helyett, a benyomó szerszám geometriáját is figyelembe vevő egyenletet alkalmaz a besüllyedési mélység számításához [5]:

$$h_s = \varepsilon P \frac{dh}{dP}. \quad (5)$$

Egyenletüket Sneddon munkája alapján vezették le, amelyben ε egy geometriai konstanst jelöl [7]. A konstans értéke sík végű szerszám esetén $\varepsilon = 1$, kúpos szerszám esetén $\varepsilon = 0{,}72$, félgömb szerszám esetén pedig $\varepsilon = 0{,}75$.

A kontaktmélység ismeretében alkalmazható a benyomó szerszámra kísérleti úton meghatározott alakfüggvény, amely eredménye a benyomó szerszám és a próbatest közötti tényleges kontaktfelület. Tökéletes félgömb végű szerszám esetén az alakfüggvény a következő egyenlet szerint írható fel, amelyben *R* a félgömb sugara:

$$A_c(h_c) = 2\pi R h_c. \quad (6)$$

A mérési eredménygörbe adatai alapján alkalmazva az (1), (2), (3) és (6) egyenleteket, iteratív módon meghatározható a görbe lefutó szakaszára jellemző meredekség, a kontaktfelület nagysága és az anyag rugalmassági modulusa.

A rugalmassági modulus meghatározását nagy pontossággal lehet elvégezni a műszerezett keménységmérés eredményéből [8]. A bemutatott, széles körben elterjedt módszerek mellett további kutatásokat végeznek a pontosság növelése és az új modellek kidolgozása végett [9, 10].

3.2 Keménység

A keménység hagyományos definíciója szerint a vizsgálat során fellépő maximális reakcióerő és a mérés után mérhető lenyomat vetületi felszínének hányadosa adja a vizsgált anyag keménységét. A nem műszerezett módon végzett keménységmérés esetében nem választható el az anyag rugalmas és képlékeny alakváltozásának eredménye. A mért reakcióerő egy részét így a próbatest rugalmas alakváltozása nyeli el, a maradék része pedig a képlékeny alakváltozásból adódó, maradó lenyomatot hozza létre.

A műszerezett keménységmérés lehetőséget biztosít a maximális terhelőerő pillanatában fennálló tényleges kontaktmélység és ebből meghatározható kontaktfelület meghatározására. A 3.1. fejezetben bemutatott Oliver Pharr módszer alapján, a (6) egyenlettel számítható a teljes benyomódáshoz tartozó érintkezési felület nagysága. Ennek ismeretében számítható a vizsgált anyag keménysége (*H*):

$$H = \frac{P_{max}}{A_c}. \quad (7)$$

A műszerezett keménységmérés eredménygörbéje alapján megállapítható, hogy azonos szerszám-geometriával végzett különböző maximális reakcióerővel végrehajtott keménységmérések esetén a keménység és a reakcióerő nem állnak lineáris kapcsolatban. A keménység mérésének eredményei csak abban az esetben hasonlíthatóak össze a különböző anyagoknál, ha mérési körülmények azonosak a benyomó szerszám és reakcióerő tekintetében is. Ennek a problémának a megoldását segíti elő az Anyagvizsgálók Lapjának 2025/I-II. lapszámában megjelent cikkünkben [1] ismertetett munka alapú keménységi definíció.

3.3 Törési szívósság

A törési szívósság az anyag stabil repedésterjedéssel szembeni ellenálló képességét jellemzi. Az anyagjellemző hagyományos meghatározásához egy precízen kimunkált és előrepesztett próbatest roncsolásos vizsgálatát végzik el az ASTM E1820 szabvány előírásai alapján [19].

Mivel mind a törési szívósság vizsgálat, mind a műszerezett keménységmérés statikus vizsgálati eljárás, több kutatás is alkotott modelleket az eredmények összekapcsolása érdekében. Rideg anyagok esetén (kerámiák, természetes anyagok) a repedés benyomódás általi létrehozásához Vickers féle gúlát alkalmaznak. A megfelelő mélységű benyomódás lenyomatának sarkaiban a gúla éleinek meghosszabbításaként jönnek létre repedések. Ez a módszer a múltban széles körben elterjedt volt, azonban több kutatás is megkérdőjelezi a vizsgálat alkalmazhatóságát az eredmények pontatlansága és a kiértékelés során felmerülő problémák miatt [20, 21].

Acélok esetén benyomódással nem lehet megfelelő repedést létrehozni a vizsgálat során a vizsgálati próbatest képlékeny alakváltozási képességéből adódóan. Ezekhez az anyagokhoz a törésmechanika energia alapú elméletét alkalmazzák. A módszer lényege, hogy a törés megindulásához egy feszültségi-, nyúlás- vagy anyagszerkezeti kritériumot kötnek, amely kialakulását vizsgálják a szerszám benyomódása során.

A kiértékelési módszer alkalmazhatóságát támasztja alá, hogy a repedésfront előtti és a szerszám alatti térfogatban létrejövő feszültségmező nagyon hasonló [22]. Ezt az állítást bizonyította be J.-S. Lee és kutatócsoportja, akik a feszültség triaxialitását vizsgálták végeselemes modell alkalmazásával, kiértékelési elméletük megalkotásánál [23]. Korábban T. S. Byun, illetve F. M. Haggag és kutatócsoportjaik is a koncentrált feszültség- és alakváltozási mező hasonlóságának feltételezésével alkalmazták kifejlesztett modelljeiket [24, 25].

A J.-S. Lee és kutatócsoportja által alkalmazott számítási módszer alapja a Griffith nevéhez köthető energiamodell [23]. Az energiaelmélet alapján a törési szívósság egy $2a$ hosszúságú repedés esetén számítható a testben fellépő kritikus törési feszültség (σ_c), illetve a fél repedéshossz (a) ismeretében az alábbi egyenlet alkalmazásával [26]:

$$K_{Jc} = \sigma_c \sqrt{\pi a}. \quad (8)$$

A Griffith-féle elmélet a kritikus törési feszültséget az anyag rugalmassági modulusából (E), a fél repedéshosszból és a γ_0 energia értékből származtatja.

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_0}{\pi a}} \quad (9)$$

A γ_0 energia értéke az egyenletben a felületre vetített energia értékét jelzi, amely az egyes repedési felületek létrehozásához szükséges energia. Ez az érték képlékeny anyagok esetén azonban nehezen meghatározható [27].

A (9) egyenletet behelyettesítve a (8) egyenletbe, a törési szívósság a következő egyenlet szerint számítható:

$$K_{Jc} = \sqrt{2E\gamma_0}. \quad (10)$$

Az anyag rugalmassági modulusának ismeretében szükséges a γ_0 energia értékét a műszerezett keménységmérés benyomódási görbéjéből meghatározni. A mérés eredményeként kapott erő-elmozdulás görbe lehetőséget biztosít a γ_0 energia értékének becslésére a kontakt felületre vetített benyomódási erő ($P_{fajlagos}$) benyomódási mélység szerinti integrálása alapján. Ezt a modellt alkalmazza a J.-S. Lee és társai által közölt munka is [23]. Az alábbi képlet írja le a két mennyiség kapcsolatát félgömb végű szerszám esetén, ahol d a lenyomat átmérője.

$$2\gamma_0 = \lim_{h \to h^*} \int_0^h P_{fajlagos}\, dh \tag{11}$$

$$P_{fajlagos} = \frac{4P}{d^2\pi} \tag{12}$$

A törési szívósság meghatározásának T. S. Byun és kutatócsoportja által kifejlesztett modelljének alapja hasonló módon a (11) egyenlet. A képletben h^* azt a kritikus benyomódási mélységet jelzi, amely a feltételezett repedésterjedés megindulásához tartozik.

A kritikus benyomódási mélység meghatározásához kontinuummechanikai károsodási modellek alkalmazása szükséges. A Gurson nevéhez kötődő üreg térfogathányad fogalmának alkalmazásával lehet a tönkremenetel kritériumát felállítani [28]. A stabil repedésterjedés megindulásához tartozó kritikus üreg térfogathányad értékét $(f^*) = 0{,}25$ numerikus módon határozta meg képlékeny anyagok esetén Andersson, amelyet Tvergaard és Needleman is alkalmazott [29, 30].

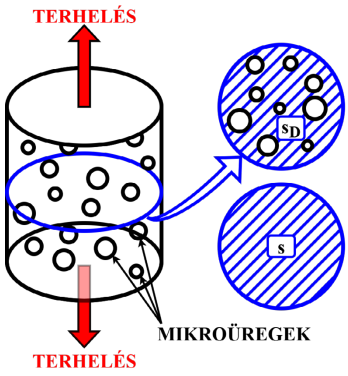
A kritikus üreg-térfogathányad értéke összeköthető a Kachanov által definiált károsodási paraméter értékével (D), amely a terhelt keresztmetszet (s) és az üregek által csökkentett tényleges keresztmetszet (s_D) arányát fejezi ki [31]:

$$D = \frac{S_D}{S}. \tag{13}$$

Az (s) és (s_D) keresztmetszetek értelmezését a 2. ábra szemlélteti.

A károsodási paraméter értéke a (13) egyenlet alapján kiszámítható egy testre, amelyben az r sugarú üregek egyenletesen l távolságra helyezkednek el egymástól:

$$D = \frac{\pi r^2}{l^2}. \tag{14}$$



2. ábra: A károsodási paraméter számításához használt keresztmetszetek értelmezése

Az üreg-térfogathányad értéke hasonlóan kifejezhető az előző egyenletben alkalmazott méretek alkalmazásával:

$$f = \frac{\frac{4}{3} r^3 \pi}{l^3}. \tag{15}$$

A (14) és (15) egyenletekből kifejezve az üreg sugarának értékét, a károsodási paraméter felírható az üreg-térfogathányad értékének függvényében a következő egyenlettel:

$$D = \frac{\pi f^{\frac{2}{3}}}{\left(\frac{4}{3}\pi\right)^{\frac{2}{3}}}. \tag{16}$$

A stabil repedésterjedés megindulásához tartozó kritikus üreg-térfogathányad értékének ($f^* = 0{,}25$) felhasználásával meghatározható a károsodási paraméter kritikus értéke (D^*).

A károsodási paraméter és az anyag rugalmassági modulusának (E) ismeretében számítható az üregképződés következtében károsodott rugalmassági modulus értéke (E_D) Lemaitre munkája nyomán az alábbi egyenlet szerint [32]:

$$E_D = E(1 - D). \tag{17}$$

A műszerezett keménységmérés során a benyomódási mélység növelésével növekszik az anyagban található mikroüregek térfogat részaránya a testben, amelyből adódóan az aktuális károsodási paraméter értéke is nő, ezzel csökkentve a károsodott rugalmassági modulus értékét. A kritikus benyomódási mélység abban a pontban található, amelynél az anyag aktuális károsodott rugalmassági modulusa eléri az anyagra jellemző kritikus értéket ($E_D = E_D{}^*$). Ez a benyomódási mélység a vizsgálat jellegéből adódóan jóval meghaladja a mérés során elérhető benyomódási mélységet, amelyből adódóan a (11) egyenlet számításához szükséges a szerszám által kifejtett, felületre vetített nyomóerő görbéjének extrapolációja.

A kritikus benyomódási mélység (h^*) ismeretében a (11) egyenlet szerint becsülhető a repedési felületek létrehozásához szükséges energia, ezt követően pedig a (10) egyenlet alapján a törési szívósság.

Egy másik megközelítést alkalmazott F. M. Haggag és kutatócsoportja a szénacélok törésmechanikai szempontból történő jellemzésére [25]. Javaslatuk szerint a hagyományos törési szívósság definíció helyett az anyagok repedésterjedéssel szembeni ellenállását egy műszerezett keménységmérésből roncsolásmentes úton meghatározott paraméterrel lehet jellemezni. Az általuk javasolt IEF (indentation-energy-to-fracture) paramétert szintén a műszerezett keménységmérés általgos felületi nyomásának görbéjéből határozták meg. Méréseik alapján feltételezték, hogy az erő-benyomódási görbe terhelési szakasza lineáris, valamint, hogy a húzó és nyomó igénybevételek eredményeként kapott feszültség-nyúlás görbék azonosak az általuk vizsgált atomerőművi anyagok esetén.

A számításuk alapja a (11) egyenlethez hasonló egyenlet, amely a felületre vetített benyomódási erő út szerinti

integráltja alapján számítja az *IEF* paramétert:

$$IEF = \int_0^{h^*} P_{fajlagos} dh \,. \tag{18}$$

Az alkalmazott modellben a terhelési szakasz linearitásából adódóan az (1) egyenlethez hasonlóan bevezethető a terhelési görbeszakasz meredeksége (M), amelyből számíthatóvá válik a terhelőerő értéke adott benyomódási mélység esetében: $P = M \cdot h$.

Emellett a lenyomat átmérőjét geometriai úton származtatták elhanyagolva a vizsgált anyag besüllyedését vagy kinyomódását:

$$d = 2\left(2Rh - h^2\right)^{0,5} . \tag{19}$$

Az egyenletben d a lenyomat átmérőjét ($d = 2 \cdot a_c$) jelzi. Az (1) és (19) egyenleteket alkalmazva, a (18) egyenlet integrálását elvégezve az *IEF* paraméter a következő egyenlet eredménye:

$$IEF = \frac{M}{\pi} \ln\left(\frac{2R}{2R - h^*}\right). \tag{20}$$

Az *IEF* paraméter összehasonlító vizsgálatokhoz alkalmas, illetve a rideg képlékeny átmeneti hőmérséklet vizsgálatára, meghatározására szolgál.

A T. S. Byun és kutatócsoportja által alkalmazott modell az előzőekben bemutatott két modell kombinációja, amely a műszerezett keménységmérés paramétereiből számítja a törési szívósság értékét [24]. Modelljük úttörő jelentőségű volt, azonban a vizsgált anyag paramétereinek meghatározásához még szükséges hagyományos törési szívósság meghatározási eljárások alkalmazása. Publikációjukban ezen szabványos törési szívósság vizsgálatok eredményét hasonlították össze a modelljük által számított értékekkel.

3.4 Folyáshatár, szakítószilárdság

A folyáshatár és szakítószilárdság vizsgálata esetén a műszerezett keménységmérés során tisztán rugalmas és rugalmas képlékeny alakváltozást is szükséges létrehozni a próbatestben. Az eltérő benyomó szerszám geometriák különböző feszültségeloszlást eredményeznek a próbatestben. A Berkovich és Vickers szerszám geometriák a csúcsban végződő kialakításuk eredményeként kis behatolási mélységek esetén is előidéznek képlékeny alakváltozást. Ezzel szemben a félgömb végződésű szerszám geometria kis benyomódás esetén tisztán rugalmas alakváltozást eredményez, ameddig a felületre vetített nyomóerő ($P_{fajlagos}$) kisebb, mint az anyag folyáshatárának (R_p) 110%-a ($P_{fajlagos} < 1{,}1 \cdot R_p$) [11, 12]. Erre a kezdeti állapotra alkalmazhatóak a Hertz által ismertetett rugalmas érintkezési probléma egyenletei [13]. A teljesen képlékeny alakváltozás esetén a felületre vetített nyomóerő felső határa a folyáshatár háromszorosa ($P_{fajlagos} \sim 3 \cdot R_p$).

Ezek ismeretében a folyáshatár és szakítószilárdság vizsgálatakor előnyös a félgömb végű benyomószerszám alkalmazása. Az anyagban a nyomóerő hatására kialakuló feszültségmező és a szilárdsági jellemzők kapcsolata a reprezentatív feszültség és nyúlás kapcsolata által írható le. A két paraméter felhasználásával ábrázolható feszültség-nyúlás diagram a szilárdsági jellemzők műszerezett keménységmérésből történő származtatásának alapja. A következő hatványfüggvény a műszerezett keménységmérés során fennálló feszültség-nyúlás kapcsolatot írja le:

$$\sigma_r = K \cdot \varepsilon_r^n \,. \tag{21}$$

A függvényben σ_r a reprezentatív feszültség, ε_r a reprezentatív nyúlás, K a szilárdsági együttható, n pedig az anyag keményedési kitevője. A szilárdsági tulajdonságok meghatározásánál a műszerezett keménységmérés görbéjéből nyerhető információk felhasználásával szükséges feszültség-nyúlás értékpárokat számítani. Ezekre a pontokra görbeillesztéssel határozzák meg a K és n paramétereket, amelyek a vizsgált anyagra jellemzőek.

A feszültség meghatározásának értelmezésében összhangban vannak a témában közölt régebbi és újabb kutatások, mivel a számítás a Johnson által meghatározott feszültségi kritériumok felhasználásával adódik az alábbi egyenletek szerint [12].

$$P_{fajlagos} = \frac{P}{A_c} \tag{22}$$

Johnson munkája alapján a képlékeny alakváltozás esetén:

$$\frac{P_{fajlagos}}{R_p} = \frac{P_{fajlagos}}{\sigma_r} \cong 3 = \psi \,. \tag{23}$$

A (23) képletben ψ egy konstans a felületre vetített nyomóerő és a reprezentatív feszültség arányának leírására. A (22) és (23) egyenletek alapján a reprezentatív feszültség a (24) egyenlet alapján számítható a benyomódás képlékeny szakaszának pontjaiban.

$$\sigma_r = \frac{1}{\psi} \cdot P_{fajlagos} = \frac{1}{\psi} \frac{P}{A_c} \tag{24}$$

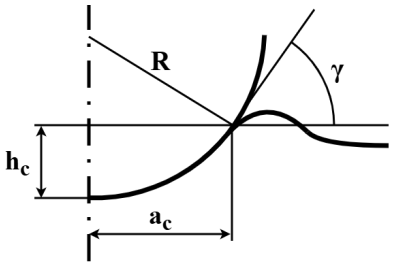
A teljes benyomódási és visszaterhelési görbeszakasz leírására alkotott modellt J. S. Field és M. V. Swain, amely egyaránt alkalmas az egy, valamint a több terhelési ciklusból álló mérések jellemzésére is [14].

A reprezentatív nyúlás számítására két modellt alkalmaztak a műszerezett keménységméréssel foglalkozó kutatások. Az egyik megközelítés a Tabor által javasolt számítás, amely az alábbiak szerint felírható tapasztalati képlet [15]:

$$\varepsilon_r = 0{,}2 \cdot \frac{a_c}{R} = 0{,}2 \sin\left(\gamma\right). \tag{25}$$

Az egyenletben szereplő értékek értelmezését a 3. ábra szemlélteti. A benyomószerszám átmérőjét R, a kontakt mélységhez tartozó lenyomat sugarát a_c, a szerszám és a próbatest felületeinek érintkezési pontjában a felületek között bezárt szöget γ jelöli.

Az egyenlet jól alkalmazható kis benyomódási mélységek esetén a nyúlás és a benyomódási mélység kapcsolatának leírására, azonban a szinusz függvény sajátosságai miatt nem alkalmas a nagy alakváltozási képességű képlékeny anyagok vizsgálatához. Erre megoldásul javasolt J.-H. Ahn és D. Kwon egy olyan egyenletet, amely a



3. ábra: A benyomószerszám és a próbatest felületének találkozását jellemző paraméterek

benyomódás geometriáját a tangens függvény alkalmazásával köti össze a reprezentatív nyúlással az alábbiak szerint [16, 17].

$$\varepsilon_r = 0{,}14\tan(\gamma) \tag{26}$$

Ez az egyenlet lehetővé teszi a nagyobb alakváltozással járó vizsgálatok eredményeinek kiértékelését. A reprezentatív feszültség és nyúlás értékeinek számítása a mérés adott pontjaiban lehetővé teszi az anyag folyásgörbéjének ábrázolását a (21) egyenlet paramétereinek görbeillesztéssel történő meghatározását követően. A feszültség-nyúlás görbe ismeretében, a vizsgált anyag rugalmassági modulusának felhasználásával határozható meg a 0,2%-os nyúláshoz tartozó folyáshatár, illetve a szakítószilárdság értéke.

A grafikus kiértékelés helyett alkalmazhatóak egyenletek is az anyagjellemzők meghatározásához, amelyek az alábbi formában írhatóak fel:

$$R_{p0,2} = K\left(0{,}002\right)^n, \tag{27}$$

$$R_m = K(n)^n. \tag{28}$$

A műszerezett keménységmérés egy gyakran alkalmazott roncsolásmentes anyagvizsgálat a szilárdsági jellemzők meghatározásánál. Mivel a (25) és (26) egyenletekben szereplő konstansok empirikus módon meghatározott értékek, így a kutatások ezen képletek megfelelő alkalmazási területének körülhatárolására és a pontosság növelésére koncentrálnak [18].

3.5 Kúszás

A kúszás az anyagok folyáshatáránál kisebb, hosszú ideig tartó állandó terhelés hatására bekövetkező képlékeny alakváltozása. A kúszás az alakváltozási sebesség idő szerinti függvényével jellemezhető. Hagyományos jellemzéséhez nagy anyagmennyiség szükséges, a szakítóvizsgálatok elvégzési ideje pedig jelentős lehet. A műszerezett keménységmérés ebből adódóan vonzó megoldás lehet a folyamat jellemzésére, amelyet már a 20. század közepén felismertek.

A kúszás és a terhelés tartási idejének összefüggését vizsgálta T. O. Mulhearn és D. Tabor 1960-ban [33]. Kutatásukat – amely során hagyományos módon optikai úton határozták meg az anyag keménységét – félgömb végű benyomó szerszám segítségével végezték. Méréseik során azt tapasztalták, hogy a keménység értéke a következő egyenlet szerint csökken a terhelés tartási idejének növekedésével.

$$H^{-(n+0{,}5)} = Cte^{-\frac{Q}{RT}} \tag{29}$$

Az egyenletben n a vizsgált anyag keményedési kitevője, C egy anyagi konstans, t a terhelés tartási ideje, Q a kúszás aktivációs energiája, T a vizsgálati abszolút hőmérséklet, R pedig az egyetemes gázállandó.

A félgömb végű benyomó szerszám mellett más geometriák alkalmazását is vizsgálták a korai kutatások. Kiemelkedő munka ezek közül S. N. G. Chu és J. C. M. Li kutatása, akik sík végű, kör keresztmetszetű benyomószerszámmal kísérleteztek a kúszás paramétereinek meghatározása érdekében [34]. A sík végű szerszám alkalmazása a kúszási paraméterek meghatározásához előnyös, mivel a próbatestben ébredő feszültségmező jóval egyszerűbb más geometriák által létrehozott feszültségmezőhöz képest.

A műszerezett keménységmérés alkalmazásának elterjedése új lehetőségeket teremtett a próbatest időfüggő jellemzőinek vizsgálatára. A legtöbb esetben az ilyen vizsgálatokat Berkovich geometriájú szerszámmal végzik, amelynél a mérés során az átlagos feszültség, illetve a nyúlási sebesség értékeit a következő egyenletekkel számítják [35].

$$\sigma \propto \mathrm{H} = \frac{P_{\max}}{A_c} = \frac{P_{\max}}{\xi h_c^2}, \tag{30}$$

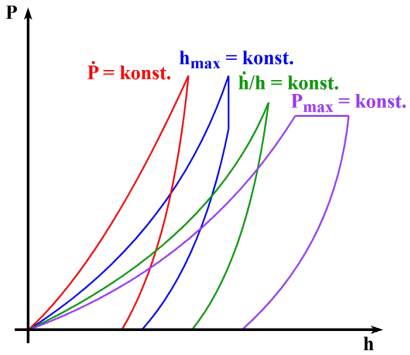
$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{h}\frac{dh}{dt} = \frac{\dot{h}}{h}. \tag{31}$$

A (30) egyenletben a kontaktfelület számítását a Berkovich típusú szerszám alakfüggvényének alkalmazásával lehet közelíteni, amelyben ξ konstans értéke ennél a szerszám geometriánál $\xi = 24{,}56$.

Az 1980-as évek óta négy különböző mérési módszert dolgoztak ki a kúszás jelenségének vizsgálatára. Az első módszer a konstans elmozdulás módszere, amely során a maximális terhelőerő elérését követően a benyomódási mélység értékét rögzítik és így monitorozzák a terhelőerő csökkenését az idő előrehaladtával ($h_{\max} = konst.$). A második módszer a konstans benyomódási sebesség alkalmazása ($\dot{P} = konst.$). A harmadik eljárás az alakváltozás sebességét rögzíti ($\dot{h} / h = konst.$), míg a negyedik a maximális terhelőerő elérését követően rögzíti a terhelőerő nagyságát és monitorozza a benyomódási mélység növekedését ($P_{\max} = konst.$). Ezeket a módszereket mutatja be a 4. ábra.

A felsorolt eljárások közül kiemelkedően népszerű a konstans benyomóerő alkalmazása, tekintve, hogy ez áll legközelebb a műszerezett keménységmérés szabványos kivitelezési folyamatához.

Azonban a kúszási folyamat műszerezett keménységmérés általi jellemzése kihívásokat is magában hordoz. A nehézségek közül megemlíthető, hogy az egytengelyű húzásnál fellépő feszültségmező jóval egyszerűbb a keménységmérés alatt kialakuló feszültségmezőnél. Emellett problémát jelent, hogy a műszerezett keménységméréssel végzett kúszásvizsgálat néhány perces



4. ábra: A kúszási folyamat jellemzésére kifejlesztett mérési eljárások

tartási ideje jóval rövidebb az egytengelyű kúszásvizsgálat esetén alkalmazott akár több ezer órás terhelési időnél. Ez azt eredményezi, hogy a vizsgált állandósult (másodlagos) kúszási jelenség kisebb hatással van a végleges eredményre, mint a hagyományos kúszásvizsgálatok esetében, amely félrevezető lehet az eredmények kiértékelésénél.

A kivitelezéssel kapcsolatos kérdések mellett az alkalmazott benyomó szerszám alakja is fontos kérdéseket vet fel. A benyomódás során az anyag nyúlása a (26) egyenlet szerint a benyomó szerszám és a vizsgált anyag felülete által bezárt szög függvénye. Ez a szög gömb alakú szerszámnál a mérés során dinamikusan változik, azonban Berkovich típusú gúla alkalmazása esetén állandó értéket vesz fel a teljes mérési időtartam alatt. Ennek eredményeként a nyúlás konstans értéket vesz fel, amely meghiúsítja a kúszás jelenségét jellemző nyúlás-idő függvény kiértékelésének eredményességét.

Mindemellett szükséges figyelmet fordítani a szerszám hegyével kapcsolatos szingularitási problémára, valamint a szerszám alatti térfogatban ébredő kiemelkedően nagy feszültségre, amely eltér a szakítógéppel végzett kúszásvizsgálat feszültségmezőjétől.

A felsorolt kihívásokból adódóan szükséges kutatásokat végezni a műszerezett keménységméréssel végzett kúszási paraméter meghatározása területén. A témával foglalkozó kutatások új megközelítéseket alkalmaznak, mint például a műszerezett keménységmérésből meghatározott nyúlás (26) egyenlet szerinti definíciójának átalakítása, vagy eltérő megközelítés alkalmazása a nyúlás és idő kapcsolatának leírására. Ezek a megoldási lehetőségek és kutatási irányok több publikációban is részletesen kifejtésre kerültek [33, 36].

3.6 Kifáradási határ

A ciklikusan ismétlődő igénybevételnek kitett szerkezetek nagy részarányát képezik az ipari berendezéseknek, gépeknek. Ebből adódóan fontos a kifáradás jellemzését szolgáló feszültség-ciklusszám diagram ismerete. Ideális esetben a szerkezet gyártását megelőzően a releváns kifáradási adatok rendelkezésre állnak, azonban a dokumentáció hiányában a meglévő szerkezetet vizsgálva lehet információt gyűjteni. A hagyományos kifáradás vizsgálat során nagy mennyiségű próbatest felhasználása szükséges a teljes kifáradási görbe megalkotásához [40]. Ez a tulajdonság kis anyagmennyiség rendelkezésre állása esetén ellehetetleníti az ilyen típusú eredmény meghatározását.

A műszerezett keménységmérés folyamata végezhető ciklikus terhelés mellett, különböző terhelőerő szintek alkalmazásával. Ezáltal a mérés alkalmas a feszültség és a ciklusszám meghatározására, amelyből megalkotható a jellegzetes kifáradási görbe. A mérés alkalmassága ellenére a ciklikus terheléssel végzett kutatások nagy része nem tért ki a műszerezett keménységmérés és a hagyományos Wöhler-görbe kapcsolatának vizsgálatára. Egyes kutatások a ciklikus terhelés hatására történő benyomódási mélység növekedést állapították meg, amelyet a fáradásos repedésterjedés mechanizmusához hasonlítottak [37]. A felületi keménység és a fáradási tulajdonságok kapcsolatát vizsgálta A. Çelik és kutatócsoportja, amely során megállapították a fáradási szilárdság növekedését az anyag felületi keménységének növekedésével [38]. B. Xu és kutatócsoportja a hagyományos Wöhler-görbe egyenletéhez hasonló összefüggést javasoltak a kifáradás műszerezett keménységmérés által meghatározható értékekkel történő leírására [39].

A felsorolt kutatások mellett az utóbbi években kezdték el vizsgálni annak a lehetőségét, hogy a mért értékek milyen módon kapcsolhatóak össze a kifáradási görbével. A keménységméréssel végzett kifáradásjellemzés alapja, hogy az anyag merevsége (E) – amely meghatározásával a 3.1 fejezet foglalkozik – közvetlen kapcsolatban áll a feszültségamplitúdó (σ_a) értékével [40, 41]. Ezt az összefüggést ciklikus terhelésnek alávetett próbatest vizsgálatával ismerték fel. A próbatest merevségét – ciklusonként számítva a visszaterhelési görbeszakasz alapján – a benyomódási ciklusszám függvényében ábrázolják. Ez alapján a merevség értékének csökkenése tapasztalható a ciklusszám növekedésével.

4. Összefoglalás

A műszerezett keménységmérés információhordozó képességének bemutatása céljából ismertetésre kerültek a mérés eredményéből leggyakrabban meghatározott anyagi paraméterek. Az anyagvizsgálat eredményeként kapott erő elmozdulás görbe a vizsgált anyag terhelésre adott komplex válaszát írja le. Ezáltal a keménység értékén kívül meghatározhatóak az anyagra jellemző statikus anyagvizsgálati mérőszámok és jellemzők, mint a rugalmassági modulus, a szakítószilárdság, a folyáshatár, a törési szívósság, kúszási paraméterek, valamint a kifáradási görbe is. A cikk során ezen jellemzők meghatározásának módszertanát ismertettük, bemutatva az alkalmazott számítási eljárások előnyeit és határait is.

A vizsgálat innovatív lehetőségei már az 1980-as években foglalkoztatta a kutatókat, azonban az eredmények precíz kiértékelése napjainkban is népszerű kutatási terület. A mérés előnye, hogy nem kizárólag a teljes szerkezet, hanem lokális paraméterek – akár bevonatok, vagy felületkezelésből adódó változások – is vizsgálhatóak a benyomódás méretéből adódóan.

A műszerezett keménységmérés eredményének mély tartalma, illetve a meghatározott anyagjellemzők széles skálája bizonyítja a mérés kiemelkedő alkalmazhatóságát a vizsgált anyag karakterizálásában. A kivitelezés nagy fokú precizitást igényel a vizsgálati berendezés kialakításánál és a mérés kivitelezésénél egyaránt. Az irodalomkutatás során bebizonyosodott, hogy a vizsgálati módszer és a meghatározható eredmények területén is szükséges további kutatásokat végezni a benyomószerszám alatt kialakuló komplex feszültségmező pontosabb modellezése érdekében.

Köszönetnyilvánítás

A cikk megvalósulását az Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program és a Kooperatív Doktori Program keretein belül támogatta a Kulturális és Innovációs Minisztérium, valamint a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap.

Irodalomjegyzék

[1] Kulcsár Benedek, Szávai Szabolcs: Keménység, mint alakítási munka, Anyagvizsgálók Lapja, 2025/I-II. lapszám, pp. 18-24.
[2] Pavlina, E. J., Van Tyne, C. J.: Correlation of yield strength and tensile strength with hardness for steels. Journal of Materials Engineering and Performance, 17, 2008, pp. 888-893. https://doi.org/10.1007/s11665-008-9225-5
[3] Boussinesq, J.: Applications des Potentiels a l'Etitude de l'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques. Gauthier-Villiars, Imprimeur-Libraire, 1885. Paris
[4] Doerner, M. F., Nix, W. D.: A method for interpreting the data from depth-sensing indentation instruments. Journal of Materials Research, 1, 1986, pp. 601-609.
[5] Oliver, W. C., Pharr, G. M.: An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. Journal of Materials Research, 7, 1992, pp. 1564-1583.
[6] Borodich, F. M., Keer, L. M.: Evaluation of elastic modulus of materials by adhesive (no-slip) nano-indentation, Proceedings of the Royal Society A, 460, 2004, pp. 507-514.
[7] Sneddon, I. N.: The relation between load and penetration in the axisymmetic boussinesq problem for a punch of arbitrary profile, International Journal of Engineering Science, 3, 1965, pp. 47-57.
[8] Hay, J.: Introduction to instrumented indentation testing, Experimental Techniques, 33, 2009, pp. 66-72.
[9] Cagliero, R., Barbato, G., Maizza, G., Genta, G.: Measurement of elastic modulus by instrumented indentation in the macro-range: Uncertainty evaluation, International Journal of Mechanical Sciences, 101-102, 2015, pp. 161-169.
[10] Peng, G., Liu, Y., Xu, F., Jiang, H., Jiang, W., Zhang, T.: On determination of elastic modulus and indentation hardness by instrumented spherical indentation: influence of surface roughness and correction method, Materials Research Express, 10, 2023, 086503
[11] Hay, J. L., Pharr, G. M.: Instrumented Indentation Testing, ASM Handbook, 8: Mechanical testing and evaluation, 2000, pp. 232-243.
[12] Johnson, K. L.: Contact mechanics, Cambridge University Press, 1985
[13] Hertz H.: On the contact of rigid elastic solids and on hardness, Journal für die reine und angewandte Mathematik, Macmillan and Co., New York, 1882
[14] Field, J. S., Swain, M. V.: A simple predictive model for spherical indentation, Journal of Materials Research, 8, 1993, pp. 297 306.
[15] Tabor, D.: The hardness of metals, Clarendon Press, Oxford, 1951
[16] Kim, J.-Y., Lee, K.-W., Lee, J.-S., Kwon, D.: Determination of tensile properties by instrumented indentation technique: Representative stress and strain approach, Surface & Coatings Technology, 201, 2006, pp. 4278 4283.
[17] Ahn, J.-H., Kwon, D.: Derivation of plastic stress–strain relationship from ball indentations: Examination of strain definition and pileup effect, Journal of Materials Research, 16, 2001, pp. 3170-3178.
[18] Scales, M., Anderson, J., Kornuta, J. A., Switzner, N., Gonzalez, R., Veloo, P.: Accurate Estimation of Yield Strength and Ultimate Tensile Strength through Instrumented Indentation Testing andChemical Composition Testing, Materials, 15, 2022, 832.
[19] American Society for Testing and Materials – ASTM E1820-22, 2022
[20] Kruzic, J. J., Kim, D. K., Koester, K. J., Ritchie, R. O.: Indentation techniques for evaluating the fracture toughness of biomaterials and hard tissues, Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 2, 2009, pp. 384-395.
[21] Quinn, G. D., Bradt, R. C.: On the Vickers Indentation Fracture Toughness Test, Journal of the American Ceramic Society, 90, 2007, pp. 673-680.
[22] Li, J., Zhang, T., Wang, S., Cheng, J., Wang, W.: Mechanism and method of testing fracture toughness and impact absorbed energy of ductile metals by spherical indentation tests, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 36, 2023, 108.
[23] Lee, J.-S., Jang, J.-I., Lee, B.-W., Choi, Y., Lee, S. G., Kwon, D.: An instrumented indentation technique for estimating fracture toughness of ductile materials: A critical indentation energy model based on continuum damage mechanics, Acta Materialia, 54, 2006, pp. 1101 1109.
[24] Byun, T. S., Kim, J. W., Hong, J. H.: A theoretical model for determination of fracture toughness of reactor pressure vessel steels in the transition region from automated ball indentation test, Journal of Nuclear Materials, 252, 1998, pp. 187-194.
[25] Haggag, F. M., Byun, T. S., Hong, J. H., Miraglia, P. Q., Murty, K. L.: Indentation-energy-to-fracture (IEF) parameter for characterization of DBTT in carbon steels using nondestructive automated ball indentation (ABI) technique, Scripta Materialia, 38, 1998, pp. 645 651
[26] Griffith, A. A.: The phenomena of rupture and flow in solids, Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, 221, 1921, pp. 163-198.
[27] Blumenauer, H., Pusch, G.: Műszaki törésmechanika, Műszaki Könyvkiadó, 1987, Budapest
[28] Gurson, A. L.: Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I – Yield criteria and flow rules for porous ductile media, Journal of Engineering materials and technology, 99, 1977, pp. 2-15.
[29] Andersson, H.: Analysis of a model for void growth and coalescence ahead of a moving crack tip, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 25, 1977, pp. 217 233.
[30] Tvergaard, V., Needleman, A.: Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar

[31] Kachanov, L. M.: Rupture time under creep conditions, Izvestia Akademii Nauk SSSR, 8, 1958, pp. 26 31.
[32] Lemaitre, J.: A course on damage mechanics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996
[33] Choi, I.-C., Yoo, B.-G., Kim, Y.-J., Jang, J.-I.: Indentation creep revisited, Journal of Materials Research, 27, 2012
[34] Chu, S. N. G., Li, J. C. M.: Impression creep; a new creep test, Journal of Materials Science, 12, 1977, pp. 2200 2208.
[35] Raman, V., Berriche, R.: An investigation of the creep processes in tin and aluminum using a depth-sensing indentation technique, Journal of Materials Research, 7, 1992, pp. 627-638.
[36] Prach, O., Minnert, C., Johanns, K. E., Durst, K.: A new nanoindentation creep technique using constant contact pressure, Journal of Materials Research, 34, 2019, pp. 2492 2500
[37] Li, J. C. M., Chu, S. N. G.: Impression fatigue, Scripta Metallurgica, 13, 1979, pp. 1021 1026.
[38] Çelik, A., Arslan, Y., Yetim, A. F., Efeoglu, I.: Fatigue behaviour of duplex treated AISI 316L stainless steel, Kovove Materialy, 45, 2007, pp. 35 40.
[39] Xu, B., Yonezu, A., Chen, X.: An indentation fatigue strength law, Philosophical Magazine Letters, 90, 2010, pp. 313 322.
[40] Santos, L. S., Bruck, H. A.: „New method for fatigue characterization via cyclical instrumented indentation testing", Experimental Techniques, 47, 2023, pp. 679 688.
[41] Li, X., Bhushan, B.: Nanofatigue studies of ultrathin hard carbon overcoats used in magnetic storage devices, Journal of Applied Physics, 91, 2002, 8334.
[42] Hościło, B., Molski, K. L.: Application of instrumented indentation procedure in assessing the low-cycle fatigue properties of selected heat-treated steels, Materials, 17, 2024, 2375.
[43] Ma, Q.-P., Basterrech, S., Halama, R., Omacht, D., Měsíček, J., Hajnyš, J., Platoš, J., Petrů, J.: Application of instrumented indentation test and neural networks to determine the constitutive model of in-situ austenitic stainless steel components, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 24, 2024, 129.



A DELISA-LTO projekt eredményei: integrált módszertan a VVER atomerőművek hosszú távú üzemeltetésének megalapozására

Results of the DELISA-LTO Project: An Integrated Methodology Supporting the Long-Term Operation of VVER Nuclear Power Plants

Szenthe Ildikó[a], Slonszki Emese[b], Dudra Judit[c], Szávai Szabolcs[d], Hargitai Balázs[e]

[a, b, e]HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratórium,
[a]szenthe.ildiko@ek.hun-ren.hu, [b]slonszki.emese@ek.hun-ren.hu, [e]hargitai.balazs@ek.hun-ren.hu
[c, d]AEMI Atomenergia Mérnökiroda Kft., műszaki divízió, [c]dudra.judit@aemi-tech.hu, [d]szavai.szabolcs@aemi-tech.hu

Kulcsszavak

DELISA-LTO,
VVER,
hosszú távú üzemeltetés,
termikus öregedés,
sugárzás okozta duzzadás,
roncsolásmentes vizsgálat,
öregedéskezelés,
korlátozott időtartamra érvényes elemzések (TLAA)

Absztrakt

A DELISA-LTO (Description of the extended LIfetime and its influence on the SAfety operation and construction materials performance – Long-Term Operation with no compromises in the safety) Euratom projekt, mely 2022-ben indult és napjainkban zárult, a VVER atomerőművek hosszú távú üzemeltetésének (LTO) anyagtudományi és szerkezetintegritási kérdéseit vizsgálta. A projekt középpontjában a termikus öregedés és a reaktorbelső szerkezetei elemek sugárzás okozta duzzadása állt, a kísérleti anyagvizsgálatok, a roncsolásmentes vizsgálatok, a numerikus modellezés és a szabályozási gyakorlat integrált értékelésével. A záró D5.5 jelentés a projekt eredményei alapján integrált, bizonyítékalapú öregedésértékelési megközelítést és továbbfejlesztési ajánlásokat fogalmazott meg. A vizsgálatok igazolták, hogy az öregedési viselkedés erősen anyag- és komponensfüggő: több ausztenites primerköri alapanyag és hegesztett kötés 60 évnek megfelelő termikus öregítés után is nagy szerkezeti stabilitást mutatott, miközben egyes VVER 1000 reaktorkarima-kötőelemeknél jelentős ridegedést mértek. A duzzadás értékelésében a 2D/3D modellek és benchmarkok jó egyezést mutattak, ugyanakkor a VVER 1000 reaktorbelső szerkezeti elemekre további kísérleti adatok és megbízhatósági kritériumok szükségesek. A projekt fontos eredménye továbbá a korszerű örvényáramos gőzfejlesztőcső-vizsgálatok összehasonlító validálása, valamint a szabványok és öregedéskezelési programok továbbfejlesztésére megfogalmazott ajánlásrendszer.

Keywords

DELISA-LTO,
VVER,
long-term operation (LTO),
thermal ageing,
irradiation induced swelling,
non-destructive testing (NDT),
ageing management,
time limited ageing analysis
(TLAA)

Abstract

The DELISA-LTO Euratom project (2022–2026) investigated materials science and structural integrity aspects of the long-term operation (LTO) of VVER nuclear power plants. The project focused on thermal ageing and irradiation induced swelling of reactor internals by integrating experimental materials testing, non-destructive examination, numerical modelling and the review of regulatory practices. The final D5.5 report consolidated an integrated, evidence-based approach to ageing assessment and recommendations for further development, based on the project's findings. The results confirmed that ageing behaviour is strongly material- and component-dependent: several austenitic primary-circuit base materials and weldments retained high structural stability after thermal ageing equivalent to 60 years of operation, while selected VVER 1000 reactor flange fasteners exhibited significant embrittlement. For swelling assessment, validated 2D and 3D models and benchmark exercises showed good consistency, although additional experimental data and failure criteria are still required for VVER 1000 reactor internals. Further key outcomes include the round-robin validation of advanced eddy-current techniques for steam-generator tubes and recommendations for future development of codes, standards and ageing-management programmes.

1. Bevezetés

Az európai atomerőművi blokkok jelentős része elérte vagy megközelíti az eredetileg figyelembe vett tervezési üzemidőt, sőt egyes esetekben már a kiterjesztett üzemidő végéhez közelednek. A hosszú távú üzemeltetés műszaki megalapozása ezért egyre kevésbé tekinthető egyszeri élettartam-hosszabbítási feladatnak: olyan folyamatos mérnöki tevékenységgé vált, amelyben az öregedéskezelés, a szerkezetintegritási számítások, az üzemközi vizsgálatok és időszakos karbantartások, az anyagvizsgálatok és az új tudományos eredmények egymásra épülnek. A biztonsági funkciók fenntarthatóságát nem elegendő a tervezési tartalékokra hivatkozva igazolni; a hosszabbított üzemidő alatt a tényleges anyagállapotot és annak várható változását is megfelelő bizonyossággal kell ismerni.

A DELISA-LTO projekt erre a kihívásra adott összehangolt európai választ. A 101061201 számú támogatási megállapodás keretében, a HORIZON-EURATOM-2021-NRT-01 felhívásban megvalósult projekt 2022. június 1-jétől 2026. július 31-ig, 50 hónapon keresztül futott. A kilenc partnert egyesítő konzorcium, öt ország – Csehország, Szlovákia, Magyarország, Finnország és Ukrajna – kutatóintézeteiből, műszaki támogató szervezeteiből és egyetemi/ipari kutatási szereplőiből állt; koordinátora a csehországi Centrum Výzkumu Řež volt. A projekt a VVER-technológiára koncentrált, ugyanakkor a kidolgozott mérnöki elvek és módszerek jelentős része más könnyűvizes reaktortípusokra is átvihető.

A projekt indulásakor az Anyagvizsgálók Lapja már bemutatta a DELISA-LTO célkitűzéseit és munkacsomagjait [1]. A jelen cikk célja a lezárult projekt fő műszaki eredményeinek összefoglalása, elsősorban a záró D5.5 jelentés [2] alapján. A hangsúlyt nem az egyes munkacsomagok részletes ismertetésére helyezzük, hanem arra, hogy a kísérleti, modellezési, NDT (roncsolásmentes vizsgálat) és szabályozási eredmények milyen közös következtetésekhez vezettek a 60 évet elérő, illetve meghaladó üzemidő műszaki megalapozásában.

2. A projekt megközelítése és a kritikus szerkezetek azonosítása

A DELISA-LTO alapgondolata szerint az öregedési állapot megbízható értékelése nem alapozható egyetlen mérési vagy számítási módszerre. A projekt ezért három, egymást kölcsönösen támogató információforrást kapcsolt össze: a roncsolásos és mikroszerkezeti anyagvizsgálatokat, a roncsolásmentes vizsgálatokat, valamint a numerikus modellezést. Ezeket egészítette ki a nemzeti szabályozási gyakorlatok, öregedéskezelési programok és korlátozott időtartamra érvényes elemzések (time limited ageing analysis, TLAA) áttekintése. A végső módszertan

lényege a keresztvalidálás: egy mérnöki következtetés megbízhatóságát az növeli, ha azt eltérő fizikai elven működő, független vizsgálati és számítási eredmények egyaránt alátámasztják.

A részt vevő országok gyakorlatának felmérése alapján a termikus öregedés szempontjából kiemelt szerkezetek közé a reaktortartály, a gőzfejlesztő és annak hőátadó csövei, a térfogatkompenzátor, a primerköri csővezetékek és hegesztett kötéseik, valamint egyes szivattyú- és kötőelemek tartoznak. A sugárzás okozta duzzadás ezzel szemben elsősorban a reaktorbelső szerkezeti elemek – különösen a VVER 1000 zónapalástja, a VVER 440 aktívzóna-kosara, továbbá a tartó- és rögzítőelemek – öregedési mechanizmusa.

A projekt egyik lényeges következtetése, hogy a „kritikus” minősítés nem pusztán a biztonsági osztályból vezethető le. A prioritást a biztonsági jelentőség, az üzemi környezet, az anyag degradációs érzékenysége, a gyártási és hegesztési előélet, a neutronfluencia, a hozzáférhetőség és a korábbi vizsgálati eredmények együttesen határozzák meg. Ebből következik a fokozatos, kockázat- és bizonyítékalapú öregedéskezelés: a vizsgálati gyakoriságot és az elemzési mélységet a tényleges degradációs potenciálhoz célszerű igazítani.

3. Termikus öregedés – kísérleti eredmények és következtetések

A projekt kísérleti programja üzemi előélettel rendelkező, leszerelt blokkokból és működő VVER-egységekből származó anyagokból, valamint összehasonlító „as-received” állapotú anyagokból épült fel. A mesterséges termikus öregítést egységesen 450 °C-on végezték; az idő–hőmérséklet megfeleltetést Arrhenius-alapú összefüggésekkel határozták meg. A vizsgálati mátrix alapanyagokat, hegesztési varratokat és hőhatásövezeteket egyaránt tartalmazott. A mechanikai vizsgálatok között keménységmérés, szakítóvizsgálat, Charpy-vizsgálat, Small Punch vizsgálat és törésmechanikai vizsgálatok szerepeltek; ezeket optikai és elektronmikroszkópos, transzmissziós elektronmikroszkópia (TEM), pozitronannihilációs spektroszkópia (PAS), atomerő-mikroszkópia (AFM) és további mikroszerkezeti módszerek egészítették ki. Az ODIN (Online Data & Information Network of the European Commission) európai adatbázis kezelő rendszer MatDB adatbázisába 1189 mechanikai vizsgálat került, a mikroszerkezeti vizsgálatok száma pedig nagyságrendileg ezer volt.

A legfontosabb eredmény az anyagot alkotó fázisoktól való függőség egyértelmű igazolása. A vizsgált ausztenites primerköri alapanyagok – különösen a 08H18N12T és 08H18N10T acélok – és hegesztett kötéseik a 60 évnek megfelelő termikus öregítésig általában nagy szerkezeti stabilitást mutattak. A folyáshatár és szakítószilárdság változásai többnyire a mérési szóráson belül maradtak; egyes anyagoknál 2-14 % közötti eltéréseket mértek. A felső határ (upper shelf) ütőmunka csökkenése alapanyagoknál és varratoknál jellemzően mérsékelt volt, a projekt összegző jelentése szerint mintegy 14-20 %-os csökkenéssel. A VVER 1000 reaktor főhűtőköri, 10GN2MFA jelű csővezetékanyag rideg-képlékeny átmeneti hőmérséklet eltolódása legfeljebb mintegy 20 °C, az upper shelf energia csökkenése 5-15 J volt, míg a „Mestergörbe” referencia-hőmérséklet változása statisztikailag nem volt jelentős, jellemzően 5,2 °C alatt maradt.

Ezzel élesen szemben állt egyes ferrites VVER 1000 reaktorkarima-kötőelemek viselkedése. A vizsgált tőcsavaroknál körülbelül 40 °C-os átmeneti hőmérséklet-eltolódást és 49-68 °C-os „Mestergörbe” referencia-hőmérséklet-változást mutattak ki; az anyáknál az átmeneti hőmérséklet változása megközelítette az 50 °C-ot, a felső határ energia pedig számottevően csökkent. Ezek az értékek meghaladták a D5.5-ben hivatkozott PNAE G-7-002-86 30 °C-os kritériumát. A projekt ezért e komponenseket a hosszú távú üzemeltetés során kiemelt figyelmet igénylő elemek közé sorolta, amelyeknél célzott anyagállapot-követés, törésmechanikai újraértékelés, illetve szükség esetén beavatkozási vagy cserestratégia indokolt.

A kísérleti program azt is megmutatta, hogy egyetlen anyagjellemző nem tekinthető univerzális öregedési indikátornak. A keménységváltozás több esetben nem követte megfelelő érzékenységgel a szívósság vagy törési ellenállás változását. A makroszkopikus mechanikai tulajdonságok és a PAS, AFM, Mössbauer-spektroszkópia, SEM/TEM eredmények együttes értelmezése ezért lényegesen nagyobb bizonyosságot ad az öregedési folyamat megítélésében.

4. Sugárzás okozta duzzadás és a reaktorbelső szerkezet elemek modellezése

A sugárzás okozta duzzadás a reaktorbelső szerkezeti elemek speciális, hosszú távon geometriai és feszültségi következményekkel járó öregedési mechanizmusa. Az ausztenites acélok neutronbesugárzás hatására térfogatváltozást és besugárzási kúszást szenvedhetnek, ami csökkentheti a szerkezeti hézagokat, megváltoztathatja az érintkezési viszonyokat, a hűtőközeg áramlását és a helyi feszültségállapotot. A projektben ezért a duzzadási törvények, a termohidraulikai terhelések és a szerkezeti válasz összekapcsolására 2D és 3D numerikus modelleket fejlesztettek és benchmark elemzéseket végeztek.

A benchmarkokban a résztvevők jól megalapozott, egymással jó egyezést mutató eredményeket kaptak, ami megteremtette az összetettebb 3D értékelések alapját. A VVER 440 esetében a projekt összegzése szerint a duzzadás nem jelentett meghatározó biztonsági korlátot, és a kosár-tartály, illetve kosár-fűtőelem hézagok elfogyása nem volt azonosítható élettartam-korlátozó problémaként. A VVER 1000 esetében ugyanakkor a számítások lényegesen nagyobb érzékenységet jeleztek: a vizsgált modellben a legnagyobb hőmérséklet mintegy 384 °C volt a zónapalást harmadik gyűrűjében, ahol a 80. kampány után a maximális térfogati duzzadási alakváltozás megközelítette a 9 %-ot, az egyenértékű kúszási alakváltozás pedig a 3 %-ot. A palást és a zónaköpeny közötti hézag elfogyása a számítások szerint már a 30. kampánytól megkezdődhet. Hazai vonatkozásban az eredmény ambivalens, mivel jó hír a jelenleg üzemelő blokkok további

üzemidő hosszabbításának tekintetében, ugyanakkor erősen felhívja a figyelmet arra, hogy az építés alatt lévő két VVER 1200-as blokk esetében is szükségszerű lenne ellenőrző számításokat végezni, mivel ez a károsodási folyamat jelentősen korlátozhatja az eredetileg 60 évre tervezett élettartamot.

A jelentés ugyanakkor hangsúlyozza a modellbizonytalanságokat is. A legfontosabb korlát az erősen besugárzott 08H18N10T acélra rendelkezésre álló kísérleti adatok szűkössége, valamint a besugárzásnak kitett reaktorbelső elemek duzzadásra és alakváltozásra vonatkozó, egyértelmű meghibásodási kritériumainak hiánya. A projekt következtetése ezért nem pusztán a modellek további finomítása, hanem új, jól dokumentált kísérleti adatok gyűjtése, a modellvalidáció, érzékenységvizsgálat és bizonytalanságkezelés szabályozott beépítése a jövőbeli értékelési eljárásokba.

5. Roncsolásmentes vizsgálatok és a gőzfejlesztőcsövek állapotértékelése

A DELISA-LTO egyik gyakorlati fókusza a VVER 440 gőzfejlesztő hőátadó csöveinek örvényáramos vizsgálata volt. A körvizsgálat (round-robin test, RRT) 36 valós csőszakaszt tartalmazó SGT-VUJE-2023/1 próbatesten hasonlította össze a különböző vizsgálati rendszereket és kiértékelési eljárásokat. A résztvevő csapatok eredményei között tapasztalt eltérések elsősorban az alkalmazott eljárásokból, mérési módszerekből és indikáció-detektálási határból adódtak, ami közvetlenül rámutatott a minősítés és a harmonizált kiértékelés fontosságára.

A projekt eredményei alapján a hagyományos bobbin szondás vizsgálatot célszerű forgó szondás technikával kiegészíteni. A bobbin szonda gyors és hatékony teljes csőhosszas szűrésre, de korlátozottabb lehet a cső-csőfal átmenetnél és a kerületi repedések jellemzésében. A forgó, illetve irányított szondák ezekben a kritikus zónákban növelik a detektálási és a méretmeghatározási képességet. A zárójelentés külön kiemeli a minősített berendezés, az egységes eljárás, a képzett és tanúsított személyzet, valamint a többszintű adatkiértékelés szerepét. A körvizsgálatok alkalmazása nemcsak a módszer érzékenységét igazolja, hanem a reprodukálhatóságot és a szabályozói elfogadhatóságot is erősíti.

Ez a megközelítés jól példázza a projekt „korai figyelmeztetés” koncepcióját. A korszerű roncsolásmentes vizsgálatok önmagukban nem váltják ki a hagyományos integritásértékelést, hanem olyan nagy minőségű állapotinformációt szolgáltat, amely visszacsatolható az öregedési modellekbe, a karbantartási és csődugózási döntésekbe, valamint az ellenőrzési periódusok optimalizálásába.

6. A projekt fő ajánlásai

Az eredményeket összefoglaló zárójelentés alapján, a projekt egyik legfontosabb tanulsága, hogy a kutatási eredményeket nem önálló vizsgálati eredményekként, hanem a szabványok, irányelvek és öregedéskezelési gyakorlat továbbfejlesztésére alkalmas ajánlásrendszerként értelmezi. A felülvizsgált nemzeti gyakorlatok alapelvei nagyrészt közösek: minden részt vevő ország alkalmaz öregedéskezelési programokat, kijelöli a korlátozott időtartamra érvényes elemzések alá eső berendezéseket, és az üzemidő hosszabbítást megalapozó elemzések alapvető elvei az IAEA ajánlásaival összhangban állnak. A gyakorlati megvalósítás ugyanakkor eltérhet, például az időszakos biztonsági jelentésre (IBJ) vagy a licensz megújításra (üzemelési engedély megújítására) irányuló eljárás hangsúlyában.

A szabályozási és szabványosítási továbbfejlesztéshez a projekt több irányt jelölt ki. Ilyen a keménység és mechanikai tulajdonságok közötti, reaktoranyag-specifikus korrelációk kísérleti újraigazolása; az Arrhenius-alapú gyorsított termikus öregítés harmonizált módszertana; az alapanyagok, hegesztési varratok és hőhatásövezetek eltérő öregedési viselkedését figyelembe vevő anyagspecifikus kritériumok; a VVER 1000 duzzadásértékelési mérési és modellezési eljárásainak részletesítése; továbbá a modellvalidáció, érzékenységvizsgálat és bizonytalanságkezelés követelményeinek erősítése.

Különösen fontos a monitoring és a modellezés közötti „zárt visszacsatolási kör” kialakítása. A korszerű öregedéskezelésben az üzemközi vizsgálat nem pusztán megfelelőség-ellenőrzés: a mért állapotadatoknak vissza kell hatniuk a prediktív modellekre, a modelleknek pedig támogatniuk kell a következő vizsgálat helyének, módszerének és időpontjának megválasztását. Ezzel az öregedéskezelés a reaktív hibakereséstől fokozatosan a prediktív, állapot- és kockázatalapú döntéstámogatás felé mozdulhat el.

A végkövetkeztetések hangsúlyos eleme a nyomon követhetőség is. A hosszú távú üzemeltetésre vonatkozó mérnöki döntések akkor tarthatók fenn évtizedeken keresztül, ha a vizsgálati adatok, anyagjellemzők, modellfeltételezések, bizonytalanságok és végső következtetések közötti kapcsolat dokumentált és később újraértékelhető. Ez nem adminisztratív többlet, hanem a bizonyítékalapú öregedéskezelés egyik műszaki feltétele.

7. Összegzés és további kutatási irányok

A DELISA-LTO projekt fő tanulsága, hogy a hosszú távú üzemeltetés műszaki megalapozásában nem létezik egyetlen „mindent eldöntő” vizsgálati módszer vagy modell. A megbízható állapotértékelés a szabályozási követelmények, az üzemeltetési tapasztalat, a roncsolásmentes vizsgálatok, a mechanikai és mikroszerkezeti anyagvizsgálatok, a numerikus szimulációk és a szerkezetintegritási elemzések egymásra épülő, keresztvalidált alkalmazását igényli. A projekt e különböző információforrásokat egységes mérnöki keretbe rendezte.

A termikus öregedési vizsgálatok alapján a vizsgált ausztenites primerköri anyagok és hegesztett kötések jelentős része 60 évnek megfelelő állapotig kedvező stabilitást mutatott, ugyanakkor a ferrites reaktorkarima-kötőelemek példája igazolta, hogy az azonos üzemi idő nem jelent azonos öregedési kockázatot. A duzzadási benchmarkok megerősítették a 2D/3D modellezés alkalmazhatóságát,

1. táblázat: A projekt néhány számszerű eredménye

Terület	Eredmény	Mérnöki jelentőség
Kísérleti program	1189 mechanikai vizsgálat és ~1000 mikroszerkezeti vizsgálat	Széles, több módszerrel keresztvalidált adatbázis
VVER 1000 tőcsavar	TT-eltolódás ~40 °C; Master Curve T_0-változás 49 - 68 °C	Kiemelt LTO-figyelmet igénylő termikus ridegedés
VVER 1000 anya	TT-változás közel 50 °C; USE-csökkenés	A 30 °C-os hivatkozott kritérium meghaladása
Fő hűtőköri csővezeték	TT-eltolódás ≤20 °C; USE-csökkenés 5 -15 J; T_0-változás <5,2 °C	A termikus öregedés hatása a vizsgált anyagokra korlátozott
VVER 1000 duzzadási modell	max. T ~384 °C; max. térfogati duzzadás ~9 %; kúszás ~3 % a 80. kampány után	A geometriai hézagok és a feszültségállapot modellezése LTO-ban kritikus, VVER-1200 blokkos elemzése is szükséges
Gőzfejlesztőcső RRT	36 valós csőszakasz; bobbin + forgó szonda kombináció	Minősített, kombinált ECT javítja a detektálást és jellemzést

de egyúttal megmutatták, hogy a 60 éven túli extrapoláció bizonytalansága csak új kísérleti adatokkal és validációval csökkenthető, felhívták a figyelmet az épülő blokkoknál is vizsgálandó öregedési mechanizmusra. A gőzfejlesztőcsövek körvizsgálata pedig a korszerű, kombinált örvényáramos vizsgálati technikák és a minősítés gyakorlati jelentőségét demonstrálta.

A projekt előkészítésekor a 60 éves üzemidő jelentette az elsődleges célhorizontot. Az elvégzett munka eredményei már arra hívják fel a figyelmet, hogy egyes VVER-üzemeltetők 80 éves üzemidőt is vizsgálnak; ezért a projekt eredményeinek 80, illetve akár 100 éves időtávra történő kiterjesztése önálló kutatási feladat. Kiemelt kérdés marad a termikus öregedési modellek 60 év feletti prediktivitása – különösen a Charpy-energia, az átmeneti hőmérséklet és a Master Curve T_0 előrejelzése –, továbbá a duzzadási modellekhez szükséges besugárzott anyagadatok bővítése.

Összességében a DELISA-LTO nem egy új, minden meglévő szabályt felváltó eljárást hozott létre. Eredménye inkább egy rugalmas, továbbfejleszthető mérnöki filozófia: a meglévő öregedéskezelési és integritásértékelési gyakorlatok megerősítése validált kísérleti adatokkal, benchmarkolt modellekkel, minősített NDT-technikákkal és következetes bizonytalanságkezeléssel. Ez a megközelítés a VVER blokkok 60+ éves biztonságos üzemeltetésének megalapozása mellett más könnyűvizes reaktorok élettartam-gazdálkodásában is hasznosítható.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány a DELISA-LTO projekt eredményeire épül. A projekt az Európai Unió Euratom kutatási és képzési programjának támogatásával, a 101061201 számú támogatási megállapodás keretében valósult meg. A közölt nézetek és következtetések a szerzők szakmai összefoglalását tükrözik.

Irodalomjegyzék

[1] Szávai S., Dudra J.: DELISA-LTO projekt: Description of the extended lifetime and its influence on the safety operation and construction materials performance – Long term operation with no compromises in the safety. Anyagvizsgálók Lapja, 2022/IV, 72–74.
[2] DELISA-LTO: D5.5 – Final report on the analysis of the guidelines. Work Package 5, Task 5.3, final version, 31.07.2026.
[3] DELISA-LTO: Description of Action / Technical Description, HORIZON-EURATOM-2021-NRT-01, Grant Agreement No. 101061201.
[4] Dubyk, Y. et al.: D3.3 Benchmark of swelling evaluation. DELISA-LTO Project, 2024.
[5] Zarazovskii, M. et al.: Report on Thermal Ageing Evaluation and impacts on LTO. D3.5, DELISA-LTO, 2025.
[6] Szenthe, I. et al.: Report on the thermal ageing evaluation based on the experimental data obtained within T4.2 and T4.4. D4.5, DELISA-LTO, 2026.
[7] Benak, M. et al.: Report on the Test Results. D4.6, DELISA-LTO, 2026.
[8] Slugen, V. et al.: Report from non-destructive testing. D4.8, DELISA-LTO, 2025.

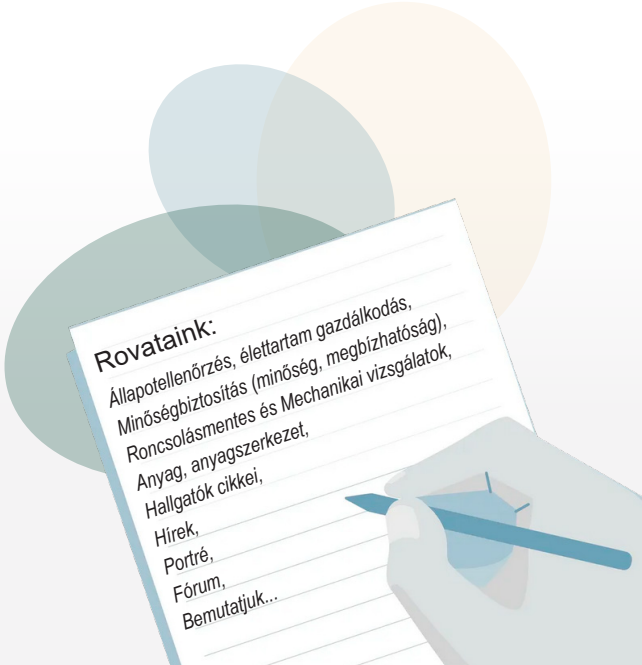
ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA

ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA
PUBLIKÁLJON NÁLUNK!

Írjon szakmai vagy általános témájú cikket
az
Anyagvizsgálók Lapjába!

Részletekért látogasssa meg honlapunkat,
vagy írjon az alábbi email címre:

avilap.szerk@gmail.com
www.avilap.hu



Eljárásvizsgálatok és személyzet tanúsítás – 4. rész

Qualification of procedures and personnel – Part 4

A „tevékenységorientált” minőségbiztosítási programok létrehozása, tervezése és megvalósítása során különösen fontos a tervezett tevékenységekre vonatkozó műszaki követelmények figyelembevétele. A programnak biztosítania kell a minőséget befolyásoló tevékenységek megtervezését és szabályozott körülmények közötti végrehajtását.

4. rész Roncsolásmentes anyagvizsgáló személyzet minősítése

A roncsolásmentes vizsgálati rendszerek minősítésével foglalkozó korábbi cikkemben már megfogalmaztam, hogy a vizsgálatok megbízható és ismételhető módon történő elvégzéséhez alapkövetelmény a berendezés-vizsgálati technológia-személyzet együttes alkalmassága. A személyzet minősítési- és tanúsítási rendszerének szükségességét a berendezések gyártói viszonylag hamar elfogadták és ma már természetesnek tekintik, nem úgy, mint a berendezések és a vizsgálati technológiák megfelelőségének minősítését. A roncsolásmentes anyagvizsgálók (továbbiakban: RMV személyzet) képzésével és vizsgáztatásával a szabályzatokon és direktívákon kívül, számtalan szabvány és irányelv foglalkozik, cikkek, publikációk százai jelentek meg. A képzéssel és/vagy tanúsítással foglalkozó szervezetek számát nem tudom. Ezek lehetnek akkreditált ellenőrző és/vagy tanúsító szervezetek, oktatási intézmények, de akár önállóan tevékenykedő harmadik fokozatú anyagvizsgálók is.

Honnan indultunk?

Amióta az őseink elkezdtek szerszámokat készíteni fontos szerephez jutott a szemrevételezés. Kezdődött az alapanyag kiválasztásával. Mielőtt nekiálltak a pattintott kőbalta megmunkálásához, ki kellett választani a megfelelő követ, megkeresni a repedéseket, megállapítani azok irányát, ezután jött a „gyártás”, majd a félkész termék szemrevételezése és a döntés. Megfelel vagy selejt? A kész balta átvétele ugyancsak szemrevételezéssel történt.

A folydékbehatolásos vizsgálat sem igazán új módszer. A rómaiak kétezer évvel ezelőtt már olajat és lisztet használtak a márványban lévő repedések kimutatására (felületi repedésvizsgálat). Kis túlzással, az akusztikus emissziós vizsgálat elődjének tekinthető a vasúti kerekek kalapácsos ellenőrzése (kerékkopogtatás). Ez egy hagyományos, de ma is alkalmazott diagnosztikai módszer a kerekek épségének vizsgálatára. A vizsgáló a keletkező hang alapján következtet a kerék állapotára; a tiszta hang azt jelenti, nincs repedés, a kerék ép, a tompa hang jelzi a repedést. Hasonló módszereket (kalapácsos ellenőrzés, olaj és mészporos vizsgálat) alkalmaztak a kazánok vizsgálatára még a múlt században is.

A képzés és vizsgáztatás kezdete

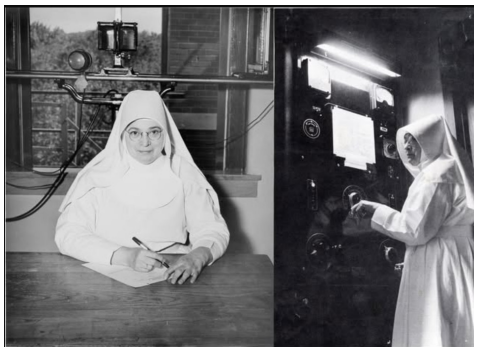
A roncsolásmentes vizsgálatokat kezdetben ’betanított munkások’ végezték. A vizsgálókat pár óra, esetleg nap alatt megtanították egy adott vizsgálati feladatra, majd lényegesen később a vizsgálati eredmények kiértékelésére is. Általános gyakorlat volt az önellenőrzés, ami a szemrevételezés esetén ma is nagyon fontos. Vegyük például a hegesztőket. Hegesztés közben, legalább varratrétegenként a hegesztő ellenőrzi a varrat felületét, a beolvadást, felületi hibákat, eltávolítja a salakot (ha van), majd ugyanezt megismétli a kész varratnál is, különös tekintettel a varratalakra, a felület minőségére és a szegélybeolvadásra. A feltárt hibákat a varrat készre jelentése, illetve az előírt roncsolásmentes vizsgálatok előtt a hegesztőnek ki kell javítania. Már itt szeretném megjegyezni, hogy a roncsolásmentes vizsgálatok megkezdése előtt a vizsgálónak is meg kell (kellene) győződnie arról, hogy nincsenek látható és javítandó felületi hibák. Nagyon sok röntgenfilmet találtam ilyen hibákkal, úgy szerelésvezető koromban, mint később, az auditok során.

A Wilhelm. C. Röntgen 1895-ben fedezte fel a róla elnevezett röntgen sugárzást, majd alig egy évvel később 1896-ban Becquerel felfedezte a radioaktivitást. 1898-ban Marie és Pierre Curie rátalált a rádiumra, ami nagyon intenzív természetes sugárforrásként fontos szerepet játszott a radioaktivitás megismerésében. Ezek együttesen vezettek az ipari radiográfia létrejöttéhez. Meglepően gyorsan megkezdődött a röntgen orvosi alkalmazása. Pár év késéssel kezdődött az ipari alkalmazás, először a belső anyaghibák feltárására. Az acélok röntgen vizsgálata csak a nagyobb teljesítményű (100-200 kV) vákuumcsöves röntgengépek megjelenésével indulhatott el. 1931-ben a General Electric 1000 kV-os röntgen gépe már vastagabb acélok vizsgálatát is lehetővé tette. Az American Society of Mechanical Engineers (ASME) ezzel egyidőben engedélyezte a nyomástartó berendezések hegesztési varratainak röntgenvizsgálatát. A második világháború idején ugrásszerűen megnőtt az ellenőrzések volumene, de csak 1946-ban váltak elérhetővé a rádium kiváltására alkalmas mesterséges izotópok (Cobalt-60 és Iridium-192), melyek áttörést jelentettek az ipari radiográfia területén.

Sorra alakultak a radiológiai intézetek és szervezetek, a világon elsőként 1897-ben Angliában az X-Ray Society (Röntgen Society). Nem sokkal ezután 1900-ban alakult meg az American Röntgen Ray Society, majd 1905-ben Németországban a Deutsche Röntgengesellschaft (DRG). Természetesen ezek a szervezetek tovább fejlődtek, átalakultak, és az újabb tevékenységi körüknek megfelelő nevet változtattak, vagy esetleg megszűntek.

Amikor rádöbbentek a radioaktivitás egészségkárosító hatására, sürgetővé vált a röntgengép kezelők szervezett képzése, igaz ekkor még főleg munka- és egészségvédelmi megfontolások alapján. A képzési és minősítési rendszerek létrehozása, a képzés szabványosításának elindítása a fentiekben említett szervezeteknek vagy utódaiknak köszönhető.

1920-ban a Radiological Society of North America (RSNA) négy tagja javaslatot készített a röntgenberendezések kezelőinek minősítésére. Az American Röntgen



1. ábra: *M. Beatrice Merrigan nővér az Oklahomai St. Anthony Kórház radiológiai osztályán*[3]

Ray Society-vel együttműködve ez a két szervezet 1922-ben létrehozta az radiológusok nyilvántartó rendszerét (és hivatalát) a képzés egységesítése érdekében. Ez lett az American Registry of Radiologic Technologists (ARRT), amely ma a világ legnagyobb képesítő és minősítő szervezete az orvosi képalkotás és sugárterápia területén. A megalakulásuk első évében, 1922-ben már 89 minősítést adtak ki, amelyek közül az elsőt M. Beatrice Merrigan nővér kapta Oklahoma Cityből[1]. Az első ARRT vizsgát 1922. november 17-én tartották, a vizsgázónak tíz, az emberi testről – az arcüregtől a térdig különböző helyekről – általa készített röntgenfilmet kellett bemutatnia a bizottságnak, továbbá 20 elméleti vizsgakérdést kellett 45 perc alatt megválaszolnia[2]. A New Yorki egészségügyi hatóság 1922-től már engedélyhez kötötte a radiológusok foglalkoztatását.

A roncsolásmentes anyagvizsgálók szervezett képzésének és tanúsításának kialakulása

Ismereteim szerint a roncsolásmentes anyagvizsgálók képzése a 20. század derekán az ipari radiológusok munkahelyi betanításával kezdődött, hasonlóképpen az orvosi radiológusokhoz, főleg munka- és sugárvédelmi szempontok alapján. A betanítás munkahelyi környezetben, munka közben (on-the-job training = OJT) történt és inkább a készség fejlesztését, mint az elméleti ismeretek átadását jelentette. Ennek az előnye, hogy a jelölt az adott művelethez valóban szükséges ismereteket sajátította el. Hátránya viszont, hogy a betanítást minden új vizsgálati feladatnál meg kellett ismételni. Ezekről a formális képzésekről általában nem adtak semmilyen tanúsítványt, jobb esetben dokumentálták. Munkahely változásnál újabb betanításra volt szükség.

A második világháborús hadiipari termelés felfutása a roncsolásmentes vizsgálatok volumenének hirtelen megnövekedéséhez vezetett, ami már indokolta a szervezett képzés és tanúsítás bevezetését. Erre azonban még várni kellett, az ötvenes-hatvanas évekig.

A német Deutsche Röntgengesellschaft (DRG), később Gesellschaft zur Förderung der Zerstörungsfreien Prüfverfahren (GFZfP) utódszervezete, az 1930-as években alapított Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) által szervezett, rendszerbe foglalt képzés és minősítés kezdete az 1960-as évek elejére tehető.

1966-ban jelent meg az American Society for Nondestructive Testing (ASNT) irányelve a RMV személyzet minősítése és tanúsítására SNT-TC-1A[4] elnevezéssel. A dokumentum elnevezése onnan ered, hogy az ASNT akkori neve – még 1968-ig – "SNT", a dokumentumot kidolgozó Műszaki Bizottság (Technical Committee = TC) száma pedig "1A" volt. A dokumentum célja az volt és maradt, hogy iránymutatást adjon a munkáltatóknak az RMV személyzet minősítési és tanúsítási programjának létrehozásához, és három képesítési szintet (I., II. és III.) határozott meg. Az eredeti dokumentum öt vizsgálati eljárásra vonatkozott (radiográfia, mágnesporos, ultrahang, penetrációs és örvényáramú vizsgálatok) de megengedte más eljárásokra való kiterjesztését is. Az eljárások száma folyamatosan bővült, mára elérte a tizenhatot.

A hazai képzés történetét dr. Karsai István és dr. Réti Pál kiválóan összefoglalták egy 1996-ban megjelent cikkben[5]. 1948-ban néhány, az akkori Híradástechnikai Tudományos Egyesületben tevékenykedő, főleg röntgen vizsgálattal foglalkozó szakember – látván, hogy az ipari röntgenvizsgálat helyzete sem szakember-ellátottság, sem berendezések szempontjából nem kielégítő – hozzálátott a megfelelő hazai szabványok és röntgenberendezések kérdésének rendezéséhez. Ez a munka szervezetten a Gépipari Tudományos Egyesület (GTE) 1952-ben alapított Anyagvizsgáló Szakosztályának szakbizottsági keretei között folyt, majd végül 1995-ben a Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Szakosztály megalakulását eredményezte. A szervezett oktatás kezdettől fogva országosan a GTE Roncsolásmentes Anyagvizsgálati Szakbizottság irányítása és ellenőrzése mellett, a szakbizottsági tagoknak, mint tanfolyami előadóknak a részvételével folyt, melynek kereteit 1959-től miniszeri rendeletekben szabályozták. A hetvenes évek közepétől kezdve a képzés minisztériumi hatáskörbe az Ipari Szakmai Továbbképző Intézethez (ISZTI) került. A 90-es években még az Ipari és Kereskedelmi Minisztérium Humánpolitikai Főosztálya engedélyezte a tanfolyamokat, kijelölte a vizsgabizottságot, ellenőrizte a vizsgákat és kiadta a bizonyítványokat.

A rendszerváltozás utáni deregulációs folyamat átrendezte a szakképzés jogi hátterét, majd az RMV személyzet minősítésére vonatkozó MSZ-EN 473:1994 szabvány hatálybalépése és a nemzeti akkreditációs rendszer létrejötte után 1995-ben megkezdődött a minősítő- és

[1] The History of the American Registry of Radiologic Technologists, ARRT Bulletin 2022

[2] Wonderful things: The World's First Radiologic Technologist Was…: https://thomaslmcdonald.wordpress.com/2013/01/24/the-worlds-first-radiologic-technologist-was/ (Megtekintés dátuma: 2026.09.24.)

[3] SSM Health poszt M. Beatrice Merrigan nővérről: https://www.facebook.com/ssmhealth/posts/this-womenshistorymonth-we-honor-sister-beatrice-merrigan-osf-a-pioneer-in-compa/1375376841300584/ (Megtekintés dátuma: 2026.09.24.)

[4] ASNT Recommended Practice No. SNT-TC-1A Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing, The American Society for Nondestructive Testing, Inc.

[5] I.Karsai, P. Réti A magyar roncsolásmentes anyagvizsgáló szervezet rövid története, Anyagvizsgálók Lapja, 1996/II. lapszám, 66-69. o.



2. ábra: *Az Ipari és Kereskedelmi Minisztérium által kiadott bizonyítványok*

tanúsító szervezetek megszervezése és tevékenysége. 1996-ban a Magyar Hegesztéstechnikai Egyesület (MHtE) felvette a tevékenységi körébe az anyagvizsgálatot is, és nevet is változtatott Magyar Hegesztéstechnikai és Anyagvizsgálati Egyesülés lett. 1997-ben megalakult a Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség (MAROVISZ).

Változatok a RMV személyzet képzésére és minősítésére

A roncsolásmentes vizsgálat – beleértve a RMV személyzet képzését és minősítését – ma is jelentős üzletet jelent úgy a hazai, mint a nemzetközi piacon. A tevékenységet szabályozó nemzeti és nemzetközi előírások, szabványok és útmutatók elfogadása, harmonizációja komoly kihívást jelentett és jelent ma is a szabályozó hatóságok, szabványosító szervezetek és nem utolsó sorban az azokat alkalmazó vállalatok számára. A dokumentumok lehetnek regionális pl. európai szintűek, mint a nyomástartó berendezések irányelvei (PED), vagy nemzetköziek, mint a Nemzetközi Szabványügyi Szervezet (ISO) és a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (International Atomic Energy Agency, IAEA) vonatkozó dokumentumai.

A globalizációs folyamat „terméke” az International Committee for Non-Destructive Testing (ICNDT), amely a harmonizációs törekvések élharcosává vált. Az ICNDT-t 1955-ben alapították az európai országok, az USA, Japán, Kína, India és a Szovjetunió. Eredeti célkitűzése a roncsolásmentes vizsgálatokkal foglalkozó tudósok és szakemberek fórumának létrehozása volt, ahol megoszthatják a vizsgálatok alkalmazása és fejlesztése során szerzett tapasztalataikat. Az ICNDT javaslatokat és irányelveket készít és jelentet meg a RMV személyzet képzés és tanúsítás harmonizációjának elősegítéséhez. Az első ilyen irányelv 2004 júniusában, a Roncsolásmentes Vizsgálatok 16. Világkonferenciáján (16th WCNDT), Montreálban jelent meg „ICNDT Guide to Qualification and Certification of Personnel” címmel. Az irányelv legújabb, 2024-es kiadása[6] a RMV személyzettanúsítás „legjobb gyakorlatait ismerteti az ISO 9712 szabvány alapján”, tartalmazza a tanúsító testületekre vonatkozó követelményeket, a munkáltató felelősségét és az ICNDT többoldalú kölcsönös elismerési megállapodás kereteit. Külön mellékletekben foglalkozik az ASME központi tanúsítási rendszerekkel kapcsolatos álláspontjával, a roncsolásmentes vizsgálatok európai helyzetével, a PED és az Egyesült Királyság Nyomástartó Berendezések (Biztonsági) Szabályzatával (UK Pressure Equipment Safety Regulations,(PESR)).

Az ICNDT irányelv „Tanúsító testületek jegyzéke” című 6. függeléke összefoglalja az ISO 9712 szerinti tanúsítást végző személyzet-tanúsító testületek adatait, (a dokumentum szerkesztésekor ismert formában). Hazai szervezet nem szerepel a listán.

Természetesen a munkáltató általi minősítés és tanúsítás nem szűnt meg. Az Amerikai Egyesült Államokban és a világ számos országában – elsősorban a nyomástartó berendezéseket az ASME szabályzatok szerint gyártó szervezetek – továbbra is az ASNT SNT-TC-1A jelű javasolt gyakorlatban foglalt irányelveket követik. Mint már említettem, e dokumentum célja az volt és maradt, hogy iránymutatást adjon a munkáltatóknak a RMV személyzet minősítési és tanúsítási programjának kidolgozásához. Az SNT-TC-1A bevezetőjében hangsúlyozzák, hogy ez csupán egy iránymutatás, és azt az RMV személyzet munkáltatójának kell a saját, vagy megbízója tevékenységi köréhez igazítania. A minősítés és tanúsítás a berendezés gyártójának hatás- és felelősségi körébe tartozik, független attól, hogy a RMV személyzet munkáltatója a berendezések gyártója, vagy annak alvállalkozója.

Teljesítőképesség-alapú minősítés és tanúsítás

Az ASME nukleáris szabványosító bizottsága a 70-es évek elején fogadta el az SNT-TC-1A irányelvet. Pár évvel az irányelv bevezetése után azonban megállapították, hogy a roncsolásmentes vizsgálatok megbízhatósága ettől nem javult, a munkáltatók nem egységesen értelmezték és alkalmazták az irányelvet. A folyamat kvázi szabványosítása érdekében az ASME a 70-es évek második felében kiadott egy szabályzatmódosítást, amely előírta, hogy az SNT-TC-1A irányelvet minimum követelményként kell alkalmazni.

A Nine Mile Point atomerőműben 1982-ben történt az első, bizonyítottan kristályközi feszültségkorróziós repedés (IGSCC) okozta meghibásodás, amely vízválasztó eseménynek bizonyult; bevezették az IGSCC minősítő vizsgát. Ez már egy teljesítő képesség alapú minősítő vizsga volt, hasonló a hegesztő munkapróbához. A vizsga során az atomerőművi berendezéseket reprezentáló próbadarabokban található kristályközi feszültségkorróziós repedéseket kellett felismerni, meghatározni azok helyzetét, irányát és méretét. A munkáltató által az SNT-TC-1A irányelv szerint minősített és tanúsított RMV személyzet kezdeti sikeres vizsgáinak aránya mindössze 19 % volt. A sikeres vizsgák aránya a háromévente előírt munkapróbák bevezetése után az évek során kissé javult, de végül 50 % körül megállt[7,8].

Többféle megoldás kívánkozott, válaszul az SNT-TC-1A irányelv alkalmazásának kiküszöbölésére.

[6] ICNDT Guide to Qualification and Certification of Personnel for NDT 2023 version 1 February 2024

A Nuclear Regulatory Commission (NRC) javaslatára az ASME szabályzat atomerőművek üzem közbeni ellenőrzésére vonatkozó XI. kötet[9] VIII. függelékében[10] teljesítőképesség-alapú vizsgálatminősítési rendszert vezetett be, amely érintette a RMV személyzet minősítését is. Az ASNT mintegy erre válaszként 1991-ben közzétette az ASNT/ANSI CP-189[11] szabványt, amely kötelezővé tette az ASNT/ANSI CP-105[12] szabványban leírt képzési tematika alkalmazását, de a minősítést és tanúsítást továbbra is a munkáltatóra bízta. A szabványt az ASME XI. kötet és a hagyományos nyomástartó berendezés szabályzatok (ASME I, IV, VIII kötet) szabványosító bizottságai is elfogadják, de érdekes módon a nukleáris berendezések gyártására vonatkozó ASME III. kötet bizottsága nem. Úgy remélték, hogy ezek a módosítások javítani fogják a roncsolásmentes vizsgálatok hatékonyságát és megbízhatóságát, de ez nem igazolódott be.

Következő lépésként javasolták az ASNT-nek, hogy a már meglévő központi tanúsítási programon (ACCP) belül dolgozzon ki a nukleáris ipar elvárásainak megfelelő előírás rendszert, de nem sikerült közös nevezőre és megállapodásra jutni. Ezek után az ASME vállalta fel az ANDE (ASME Nondestructive Examination and Quality Control Central Qualification and Certification Program) kidolgozását és 2010-ben létrehozta az ANDE szabványügyi bizottságot.

A bizottság úgy döntött, hogy követi az Institute of Nuclear Power Operations (INPO) atomerőmű üzemeltető személyzetének képzésére vonatkozó, Systematic Approach to Training (SAT) elnevezésű metodikáját, ami a nukleáris ipar legjobb gyakorlatának bizonyult. Ezt a metodikát később az IAEA is alkalmasnak ítélte és 2021-ben kiadta a nukleáris létesítmények személyzet képzésének szisztematikus megközelítése című dokumentumot.

Az INPO a Three Mile Island atomerőművi baleset kivizsgálását követően kiadott Kemény-bizottsági jelentés[13] ajánlásai nyomán 1979-ben létrehozott szervezet. Az INPO iparági szintű teljesítménycélokat, követelményeket és iránymutatásokat határoz meg az atomerőművek üzemeltetésére vonatkozóan, amelyek célja a magas színvonalú biztonságos üzemeltetés és a létesítmények közötti üzemeltetési tapasztalatcserék elősegítése. Az INPO finanszírozását teljes egészében a nukleáris ipar biztosítja.

A képzés szisztematikus megközelítése (SAT) egy nemzetközileg elismert, rendszerezett, részletesen kidolgozott, logikusan felépített és átlátható képzési módszertan. Szabályozott képzési folyamat, amely a munkakörhöz szükséges konkrét szakmai ismeret, képzettségi szint és jártasság (kompetencia) meghatározásától kezdve a célzott képzési programok kidolgozásán és megvalósításán át egészen azok értékeléséig tart. A képzési folyamat kidolgozása során az elvégzendő feladatokat súlyozottan veszik figyelembe, egyensúlyra törekedve a veszély és/vagy a kockázat mértéke és az oktatásra fordított erőfeszítés között. Az adott munkakörhöz és elvégzendő feladathoz szükséges szakmai ismeretre, készségekre, jártasságra és viselkedési módra összpontosítanak. Gondoskodnak arról, hogy a képzés szakmailag pontos, időszerű és oktatási szempontból hatékony legyen az emberi hibák minimalizálása érdekében.

Az ANDE először 2015-ben, a legújabb kiadás pedig 2026-ban jelent meg[14]. Ezidáig azonban sem az ASME atomerőművi szabályzat III. és XI. köteteit gondozó szabványosító bizottságok, sem az NRC nem fogadta el az ANDE szabványok alkalmazását…

Következtetések

A jelenleg elérhető képzési és minősítési rendszerek nem tudják felkészíteni az anyagvizsgálókat a speciális feladatok – mint például a kristályközi feszültségkorróziós repedések felismerése, azok térbeli elhelyezkedésének, irányának és méretének meghatározása – maradéktalan és sikeres elvégzésére. Ezekhez a feladatokhoz, a vizsgálandó berendezéseket reprezentáló, ismert tényleges folytonossági hiányokat tartalmazó próbadarabokon végzett célirányos gyakorlati oktatás, felkészítés szükséges. Ismereteim szerint kevés minősítő és tanúsító szervezet alkalmas ilyen gyakorlati képzésre, többek között a megfelelő próbadarabok hiányában.

A gyakorlati oktatásban ez a probléma már az alapképzés szintjén jelentkezik. Trampus Péter ezt így fogalmazta meg egy 2012-ben adott interjúban[15]:

"A hazai anyagvizsgáló-képzés legfőbb problémája, hogy a hajdani nagyvállalatok iskolát teremtő laboratóriumai felbomlottak, az újakban pedig sokszor sem hely, sem avatott szakember, sem idő nincs, hogy a leendő és a pályakezdő anyagvizsgálók gyakorlatot, tapasztalatot szerezzenek."

A RMV Személyzet munkáltatója által végzett minősítés és tanúsítás nagyobb hangsúlyt fektet a gyakorlati oktatásra, figyelembe véve a vizsgálati tevékenység során várható speciális feladatokat és ehhez biztosítani is tudja a feltételeket. A munkáltató tehát célirányú képzésben érdekelt, az általa összeállított specifikus vizsgakérdések is ezt tükrözik.

Dr. Somogyi Sándor

[7] Comments to Draft Regulatory Guide DG-1383 – Acceptability of ASME Section XI, Division 2, "Requirements for Reliability and Integrity Management (RIM) Program for Nuclear Power Plants" for Non-Light Water Reactors

[8] NDE Performance Demonstration Test for Intergranular Stress Corrosion Cracking. EPRI, Palo Alto, CA: 2005. Report 1013546

[9] ASME Section XI Rules for Inservice Inspection of Nuclear Reactor Facility Components Division 1 Rules for Inspection and Testing of Components of Light-Water-Cooled Plants

[10] ASME Section XI Appendix VIII Performance Demonstration for Ultrasonic Examination Systems

[11] ASNT/ANSI CP-189 ASNT Standard for Qualification and Certification of Nondestructive Testing Personnel

[12] ASNT/ANSI CP-105 Topical Outlines for Qualification of Nondestructive Testing Personnel

[13] The Need for Change, the Legacy of Tmi: Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island, U.S. Government Printing Office: 1979 0 - 303-300

[14] ASME ANDE-1–2026 ASME Nondestructive Examination and Quality Control Central Qualification and Certification Program

[15] Középpontban a képzés (Trampus interview) innotéka 2012. május 3. Szerző: Bencze Áron

Beszámoló a 12. AGY konferenciáról

Report on the 12th AGY Conference

Az anyagvizsgálók szakmai közössége egy újabb, piros betűs ünnepnapon van túl a 12. Anyagvizsgálat a gyakorlatban konferencia megszervezésével és sikeres lebonyolításával. Már a rendezvény sorszáma is jól érzékelteti, hogy nem egyszeri alkalomról, hanem egy hosszú múltra visszatekintőeseménysorozatról van szó. Ezekről a 2025/IV. lapszámban a kezdeményezők egy összefoglalást jelentettek meg [1]. A lassan már negyed évszázadra visszatekintő találkozó kapcsán hazánk két anyagvizsgáló szakmai szervezete, a Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete (MAE) és a Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség (MAROVISZ) nagyon bölcsen úgy egyezett meg, hogy az egyik a páros, másik a páratlan évben hirdeti meg saját „fesztiválját”. Jómagam mindkét szervezet rendezvényén többnyire tapasztalhattam ezek hangulatát. Igaz, általában rövid kurzusok formájában, a rendelkezésemre álló szabadidő szűkös mennyisége miatt. A már említett történeti áttekintés kiváló fényképeit nézegetve a már eltávozott személyekhez köthető emlékek tömkelege suhant át agyamon. Én még ismertem őket, de az ilyen típusú közlemények, írások egyik feladata az, hogy az „adott történetet” örökítse meg a szereplőivel közösen. Ehhez a nevek ismeretére a következő – a mindenkori – generációknak szüksége van. Feltehetően akadni fog még generációnknak olyan tagja, aki időt tud szakítani az AGY konferenciasorozat fényképalbumának elkészítésére is.



1. ábra: *A BME anyagvizsgáló szakmérnöki képzése két évfolyamának névsora (1970-1971 és 1980-1982)*
(A fényképen Prohászka János akadémikus és Somogyi György; balról jobbra)

Jómagam mindkét szervezet rendezvényén többnyire tapasztalhattam ezek hangulatát. Igaz, általában rövid kurzusok formájában, a rendelkezésemre álló szabadidő szűkös mennyisége miatt. A már említett történeti áttekintés kiváló fényképeit nézegetve a már eltávozott személyekhez köthető emlékek tömkelege suhant át agyamon. Én még ismertem őket, de az ilyen típusú közlemények, írások egyik feladata az, hogy az „adott történetet” örökítse meg a szereplőivel közösen. Ehhez a nevek ismeretére a következő – a mindenkori – generációknak szüksége van. Feltehetően akadni fog még generációnknak olyan tagja, aki időt tud szakítani az AGY konferenciasorozat fényképalbumának elkészítésére is.

A jelen közlemény, beszámoló struktúrája a következő:

- Az AGY konferenciasorozat kialakulása,
- A 12. AGY szakmai tapasztalatai és „ereklyéi”,
- A MAE eddigi eredményei, közeli feladatai.

Az AGY konferenciasorozat kialakulása

A gyökerekről már szóltam röviden. Nem szeretnék ismétlésekbe bocsátkozni. Ha valamit is tehetek, akkor csupán az emlékeim eddig nem publikált tárgyi, személyi részleteit teszem „közkinccsé”.

A konferenciasorozat elindításában meghatározó szerepet játszó, anyagvizsgáló képesítésű, beosztású szakemberek előképzettsége igen sokirányú lehetett, pl. kohómérnök gépészmérnök, vegyészmérnök, fizikus stb. Igazi változás – mondani lehet, hogy vízválasztó – lett a BME által beindított Anyagvizsgáló szakmérnöki képzés. Sajnos csupán két évfolyam végzett (1. ábra).

A fénykép két oldalán olvasható nevek között több olyat látok, akihez szorosabb-tágabb kapcsolat kötődik. Rendkívül örülnék, ha a Tisztelt Olvasóimtól sok-sok levelet kaphatnék a névsorokban szereplő személyek életéről, munkásságáról. Ezen információkat, némi szerkesztéssel, közkinccsé tenném a MAROVISZ honlapján azon gondolat jegyében, amelyet már korábban is bemutattam [2].

Az 1982-ben végzettek között a piros színnel írt négy fő volt az, aki elhatározta az AGY rendezvénysorozat elindítását. A számítógépemben az AGY rendezvénysorozattal kapcsolatban talált első dátum 2002. április 18. Az első nap programja a következő volt:

9:30-9:40	Dr. Somogyi György	Megnyitó
9:40-10:10.	Dr. Prohászka János	Az anyagvizsgálat szerepe a gyártás- és gyártmányfejlesztésben
10:10-10:40	Dr. Tóth László	Az anyagvizsgálat múltja, jelene és jövője
10:40-11:00	Majoros András	Nemzetközi körvizsgálatok tapasztalatai
11:00-11:20	Kávészünet	
11:20-11:40	Dr. Artinger István	Magas Cr tartalmú melegszilárd acélok vizsgálata
11:40-12:00	Gémes György	Gázturbina lapátok káreset elemzése
12:00-12:20	Dr. Verő Balázs	A zománc szerepe és hatásána komplex vizsgálata korszerű szerkezeti acéloknál
12:20-12:40	Dr. Kovács Károly	Anyagvizsgálat a kohászati anyaghibák elemzésében – néhány érdekes eset
12:40-13:00	Hozzászólások	
13:00-14:00	Ebéd	
14:00-14:20	Klausz Gábor	Régi kérdések, mai válaszok a roncsolásmentes vizsgálatok területéről
14:20-14:40	Szutor István	A TVK Rt.-nél alkalmazott diagnosztikai vizsgálatok a műszaki biztonság szolgálatában
14:40-15:00	Lukovits László	Műgyanta bevonatú tartályok tömörségvizsgálata
15:00-15:20	Czibula Mihály	Hőcserélő készülék örvényáramos vizsgálati eredményeinek számítógépes kezelése
15:20-15:40	Szünet	
15:40-16:00	Gyarmati István	A műszaki diagnosztika szerepe a meghibásodások kivizsgálásában
16:00-16:20	Mészöly Zsófia	Duplafalú tárolótartály tömörségvizsgálata
16:20-16:40	Nagy Zsolt	Nagynyomású alumínium gázpalackok ultrahangos vizsgálata
16:40-17:00	Hozzászólások	
18:00	Vacsora, szakmai-baráti találkozó	



2. ábra: . *A 6. AGY konferencián készült fénykép*
(A fényképen Gyulai József akadémikus, Gillemot László és Tóth László; jobbról balra)

Az anyagvizsgálók szakmai közösségének egyik legnagyobb előrelépését a Cegléden, 2012. június 18-20. között megrendezett konferencia jelentette, ahol elhatároztuk az 1897-ben alapított MAE újraélesztését. Ennek hiteles történetét foglalja össze lapunk egyik közleménye [3]. A MAE újjáalakítását támogató Gyulai József, akadémikus (MTA Műszaki Tudományok osztályelnöke 2004-2011), az első elnök Gillemot László (2012-2014) és a kezdeményező, Tóth László a Cegléden rendezett AGY konferencián készült fényképe látható a 2. ábrán.

A 12. AGY szakmai tapasztalatai és „ereklyéi”

A 2016-ban szervezett 8. AGY konferenciát követően már másodjára került sor Miskolctapolcán a rendezvény megrendezésére. Az előadások súlypontjai azonban lényegesen eltérők voltak. Míg a korábbi találkozó az anyagszerkezeti vizsgálatokra fókuszált, a jelenlegi a mikroelektronika fejlődését, általánossá válásával érzékelteti a legutóbbi évtizedben bekövetkezett fejlődést. Gondoljunk csak bele, hogy pl. egy-egy mikroelektronikai vezérlőrendszer szabad szemmel alig érzékelhető forrasztott kötéseinek megbízhatósága milyen hatással lehet magára a vezérelt struktúra munkamenetére, biztonságára, megbízhatóságára!

A több mint 30 szóbeli előadást poszterek bemutatása egészítette ki. Örömteli – és a jövő számára kecsegtető volt – a hazánkban működő, termelő világcégek (pl. BMW Manufacturing Kft., Robert Bosch Kft. …) képviselőinek előadása. Egyrészt érzékeltették a világszínvonalú tömegtermelés mindennapi vizsgálati, ellenőrzési folyamatait, azok szükségességét, szakemberi és eszközbeli igényeit, másrészt felületeket nyitottak a hazai szakmai élet, szakembergárda bekapcsolására. Ez közvetlen módon következik abból a szemléletből, hogy a termelő cégek az adott hely termelésének minőségét biztosító rendszerek megoldása mellett felkészülnek egy-egy témakör cégszintű (anyavállalat szintű) problémáinak megoldásaira is mind a szakemberek, mind pedig az eszközrendszerek tekintetében. Ez mindenképpen költséghatékony megoldás, hiszen figyelembe veszik az egyes termelési részlegek szükséges minőségbiztosítási eszközrendszerét és



3. ábra: *A 12. AGY konferencia résztvevői*

a bevonható lokális humán erőforrásának lehetőségeit (egyetemek, képzési centrumok, tradíciók stb.). A mintegy 80 résztvevővel (3. ábra) lebonyolított konferencia minden információja – a mindennapi fényképalbumtól az előadások programjáig – megtalálható a következő címen: https://mae-agy.hu/index.php. Jelen beszámolóban ezek közül csupán szemezgetésre vállalkozok. Ezt is csupán önkényesen teszem.

A rendezvényt az újjáalakult szakmai szervezet harmadik elnöke, dr. Biró Gyöngyvér nyitotta meg és zárta be (4. ábra).

A konferencia sikere az elnökasszony arcvonásainak összehasonlításából is egyértelműen leolvasható! Nincs szándékomban rangsorolni az előadások egyes témaköreit, csupán gondolatébresztőként felsorolom azokat:

- káresetelemzés;
- autóipari mikroelektronikai rendszerek gyártástechnológiai megoldásai, megbízhatósága;
- a hidrogén szerepe a földgáz hálózatokban, a hidrogénlánc „láthatatlan keze”;
- védőrétegek vastagságának mérési lehetőségei;
- a felületi feszültség jelentősége és mérési módszerei;
- pásztázó elektronmikroszkópok az iparban;
- argonion nyalábos mintaelőkészítés;
- orvostechnikai eszközök anyagai, piacra vitelének folyamatai;
- a mesterséges intelligencia alkalmazási lehetőségei az anyagtudomány különböző területein;



4. ábra: *A konferenciát Dr. Biró Gyöngyvér nyitja meg és zárja be*

- drónok alkalmazása nagyméretű és/vagy veszélyes szerkezetek biztonságának felmérésében;
- a 3D-s nyomtatással előállított termékek megbízhatósága;
- polimerek, intelligens kompozitok, pórusjellemzők, szennyezők szerepe;
- a tömegszerű, mindennapi mechanikai vizsgálatok helye, szerepe, megoldási módszerei;
- a MAE által szervezett jártassági vizsgálatok tapasztalatai.

A konferencia szervezői gondoltak a szakmánkat meghatározó módon formáló, közelmúltban elhunyt elődökre is, összefoglalva mindazon eredményeiket, amelyek a jelen alapjaiba már beépültek (5. ábra).



5. ábra: *Megemlékezés nagyjainkról*

A háromnapos rendezvény középső napján, az emlékezetes díszvacsorán készült fényképen (6. ábra) az első három személy az AGY konferenciasorozatot alapító Csizmazia Ferencné Antal Ágnes, Fodor Olivér és Harnisch József.



6. ábra: *A díszvacsora emlékezetes pillanata, előtérben az AGY konferenciasorozat alapítóival*
(a 2017. évi MAROVISZ-díjas [4] Somogyi György „már a végtelenség országútján ballag")

A MAE működésében újszerű színfoltnak tekinthető az utolsó előadás, amely a MAE által szervezett jártassági vizsgálatok tapasztalatait foglalja össze az egyesület alelnöke, Dobránszky János (7. ábra).

Örömteli volt hallgatni a korábbi MAE elnök (2014-2019), Czinege Imre prof. emeritus szavait „A mesterséges intelligencia alkalmazásának lehetőségei és korlátai



7. ábra: *Dobránszky János DSc, a MAE alelnöke tartja előadását*

az anyagtudományi kutatásokban" címmel összeállított előadásában (8. ábra). Csupán a témára gondolva mindenképpen elgondolkodtató az, hogy a napjaink gyors fejlődését iniciáló hajtóerő, a mesterséges intelligencia széleskörű alkalmazásának fontosságát az egyik legidősebb előadó hangsúlyozza.



8. ábra: *Czinege Imre prof. emeritus, a MAE korábbi elnöke tartja előadását*

A MAE eddigi eredményei, közeli feladatai

Visszatekintve a 2012-ben tartott 6. AGY konferenciára, annak legnagyobb érdeme a MAE újjászervezésének általános támogatása. Az eltelt 14 év bizonyította, hogy a szakmai szervezet létjogosultsága nem kérdőjelezhető meg. Míg az 1897–1944 periódusban 11 elnök vezette az egyesületet addig az utóbbi 14 éves időszakban három; Gillemot László, Czinege Imre és Biró Gyöngyvér. Egy-egy elnök átlagosan 4,27, ill. 4,67 éven át töltötte be vezető szerepét, határozta meg az egyesület arculatját. Mind a 14 elnök életrajza olvasható az Anyagvizsgálók Lapjában. A jelenlegi, immáron két periódusban mandátumot kapott elnökség megbízatása 2026-ban lejár, és tisztújító közgyűlésen, decemberben fogja megválasztani a MAE tagsága az új vezetőséget és a leendő elnököt. A lehetséges szakemberek csoportjára már lehet javaslatokat tenni, és az általuk megoldandó feladatok szűkebb-bővebb köre már jelenleg is megfogalmazható. Ezek a következők:

- a szakmai közösség „fesztiváljának", az AGY konferenciának a rendszeres megszervezése;
- a taglétszám növelése mind a jogi, mind pedig az egyéni területeken;
- a jártassági vizsgálatok körének növelése és rendszeressé tétele;
- az anyagvizsgálathoz kötődő felsőfokú képzés újraindítása;
- az ipari, akadémiai és a kereskedelmi szféra együttműködésénekerősítése;
- a korábbi MAE-elnökök emlékeinek méltó megőrzése

az eddigi szerény eredmények (lásd. Nagy Dezső) bővítése, pl. emlékkonferenciák szervezésével, közterek névadásának kezdeményezése stb. (lásd az elnökök életrajzait);
- a publikációs tevékenység erősítése, esetleg magyar nyelvű szakkönyv összeállítása, megjelentetése;
- az 1991-ben indított Anyagvizsgálók Lapjának népszerűsítése, támogatása;
- a folyamatos működést biztosító „egészséges korfa” kialakítása a MAE vezetőségében;
- szoros együttműködések kialakítása a nagy veszélyességű berendezésekkel üzemelő iparvállalatok és a MAE között;
- feladatorientált elnökségi struktúra kialakítása, amelyben az elnökségi tagok egyben „reszortfelelősök” is;
- stb.

A felsorolás biztosan folytatható, bővíthető. Személy szerint nagyon bízok abban, hogy az immáron 47+14, azaz 61 éve egyesületi keretek között működő anyagvizsgálati szakma hagyományait tovább erősíti az elkövetkező években is a Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete.

Végezetül álljon itt a 2026. év végéig mandátummal bíró vezetőség névsora:
- Dr. Biró Gyöngyvér | elnök
- Dobránszky János DSc | alelnök
- Dr. Barkóczy Péter
- Dr. Hargitai Hajnalka
- Dr. Mankovits Tamás
- Tóth Péter
- Dr. Vida Ádám

Köszönet önzetlen munkájukért mind a szakma, mind pedig az Anyagvizsgálók Lapja szerkesztőinek nevében!

Tóth László
főszerkesztő

Irodalomjegyzék

[1] Csizmazia F., Fodor O., Harnisch J.: Az Anyagvizsgálat a Gyakorlatban, vagy csak röviden: AGY, Anyagvizsgálók Lapja, 2025/IV. 39-40. old.

[2] Trampus P., Tóth L., Juhász-Erdei R., Dudra J., Zsíros Zs. J.: Szakmai szervezetek, egyesületek, szövetségek, tagok, képviselők – Mit tudunk nyújtani jelenleg a MAROVISZ és MAE tagjainak?, Anyagvizsgálók Lapja, 2025/I-II., 28-29. old.

[3] Tóth L., Somogyi Gy.: A Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete (MAE) újjáalakulásának körülményei, Anyagvizsgálók Lapja, 2013/III., 28-29. old.

[4] Tóth L.: Magyar roncsolásmentes anyagvizsgálók közösségének rövid története és díjai, Anyagvizsgálók Lapja, 2017/I., 34-46. old.

További pillanatok a konferenciáról



















Anyagvizsgáló szakmérnöki képzés a Debreceni Egyetem Műszaki Karán

Material testing engineer postgraduate program at the Faculty of Engineering of the University of Debrecen

Bevezetés

Az anyagvizsgálat a gyártási folyamatok számos területén alapvető jelentőséggel bír. Az alapanyag ellenőrzése minden vállalatnál elengedhetetlen, főként idegenáru ellenőrzésénél, a gyártás folyamatában és a készárú minősítésében. Elmondható, hogy a teljes műszaki életet átszövi, hiszen a késztermékek minősítésén túl az élettartamvizsgálat, a károsodásvizsgálat szintén az anyagvizsgálatra épít. A hibafeltárás, adott esetben a biztonság garantálása, vagy ami szintén egy fontos szempont, a költségmegtakarítás is magával hozza a különböző anyagvizsgálati módszerek alkalmazásának szükségességét.

A vállalatoknak fontos, hogy fenntarthatóan versenyképesek maradjanak, amelynek elengedhetetlen része a fejlődés, fejlesztés. Az anyagfejlesztés nélkülözhetetlen része a kutatás, amely ugyancsak alkalmazza az anyagvizsgálati eljárásokat.

Anyagvizsgálat a műszaki életben

Az anyagvizsgálat jelenléte az ipari gyakorlatban meglehetősen szerteágazó, a mérnöki területen való alkalmazása rendkívül széles spektrumot fed le. A műszaki élet számos területén találkozhatunk olyan feladatokkal, amelyek megoldása során roncsolásos vagy roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerekre támaszkodunk.

Hegesztett kötések vizsgálatával minősíthetjük, hogy az adott technológia, illetve hegesztő elkészíti-e a várt minőségű kötést. A vizsgálat kritikus fontosságú a különböző szerkezetek üzembiztonsága, azok élettartamának garantálása, de egy esetleg váratlan törés elkerülése szempontjából is. A hegesztett kötések eljárásvizsgálata történhet roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálati módszerekkel. Az 1. ábrán saválló acél hegesztett kötése látható. A metallográfiai vizsgálatra előkészített minta SmartZoom AxioVision mikroszkóppal készült 34x nagyításban. A szövetszerkezeti vizsgálat információt adhat a hegesztett kötés mechanikai tulajdonságairól és alkalmas az esetleges hegesztési hibák feltárására.

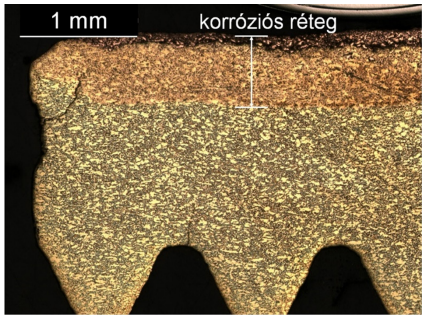
Tönkremenetelek okának meghatározása szintén a különböző anyagvizsgálati módszerek alkalmazását igényli. Az esetek többségében, hogy a különböző vizsgálati metódusok közül melyiket alkalmazzuk, azt az adott feladat határozza meg. Ehhez azonban elengedhetetlen az az anyagismereti-, illetve anyagvizsgálati tudás, amely alkalmassá teszi az anyagvizsgáló szakembert arra, hogy az adott tönkremeneteli folyamat feltárásához kiválassza a megfelelő vizsgálati módszert és az alkalmazandó eszközöket.



1. ábra: Saválló acél hegesztett kötésének metallográfiai vizsgálata. SmartZoom. Nagyítás 34x

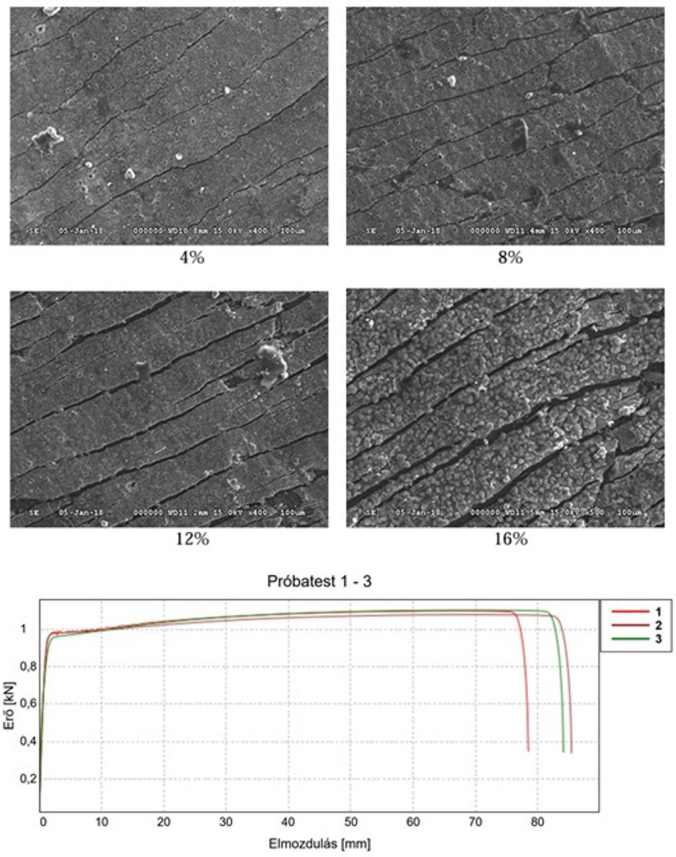
Bizonyos esetekben ezek a tönkremenetelek súlyos anyagi károkhoz vezethetnek, erre mutat példát a 2. ábra. Sárgaréz gömbcsap eltört részéből kivágott minta mikroszerkezeti felvételén több mint 500 µm vastagságú, korróziós réteg látható. A korróziós folyamat okozta elcinktelenedés eredményezte a sárgaréz gömbcsapok idő előtti tönkremenetelét [1]. Az említett korrózió miatt bekövetkezett törés jelentős vízkárokat eredményezett az érintett területeken lévő ingatlanokban.

Szélsőséges esetekben a károsodások, tönkremenetelek akár balesethez, személyi sérüléshez is vezethetnek. Fontos, hogy a megfelelő anyagvizsgálattal ezeket elkerüljük. Azonban, ha már megtörtént a káresemény, abban az esetben is szükséges az ok, esetlegesen a felelősök (pl. törvényszéki vizsgálatok bűncselekmények esetén) felderítése, melyhez az anyagvizsgálat eszközei állnak rendelkezésünkre.



2. ábra: Sárgaréz gömbcsap mikroszerkezeti képe. Nagyítás: 100x

Az anyagfejlesztésnek meghatározó része az anyagvizsgálat. Mind az ipar, mind az oktatási szféra megköveteli a kutatómunka létét. A 3. ábrán titán-oxid vékonyréteg repedéshálózatának SEM felvétele látható. A kutatás fő irányvonala a szigeteletlen szabadvezetékek felületkezelési technológiájának vizsgálata, melynek alkalmazásával a villamos energia szállításának – a gazdaságossági szempontok optimalizálása mellett – a biztonsága is növelhető. A felületkezelési technológia alkalmazásával a vezeték nagyobb áramterheléssel üzemeltethető ugyanazon üzemi hőmérsékleten, mint a felületkezelés nélküli. Ez az áramterhelés növekedés akár a 11 %-ot is elérheti. Egy lehetséges módja a szabadvezetékek felületkezelésének a titán-oxiddal történő bevonása. Maga a réteg bizonyítottan csökkenti a koronasugárzást szuper-hidrofób jellege miatt, a réteg gyártás közbeni kialakításának módja azonban több kérdést is felvet. Ez indokolja, hogy a fejlesztést



3. ábra: Huzalok felületén lévő TiO2 réteg különböző alakváltozás után

megelőzően laboratóriumi körülmények között vizsgáljuk az alapanyag – jelen esetben karbonszál erősítéses kompozit tartós trapéz keresztmetszetű alumínium huzalból gyártott sodratok – és a réteg kapcsolatát.

A vizsgálat során a huzalok szakítószilárdság és szakadási nyúlás értékének meghatározására került sor. 4 huzal terhelése nem történt szakadásig. Az alakítás 4 %, 8 %, 12 % és 16 % nyúlással történt. A 3. ábrán látható a terhelés hatására keletkezett repedéshálózat a különböző nyúlási értékek függvényében.

A műszaki területeken kívül, a társadalomtudomány is meghatározó módon támaszkodik az anyagvizsgálat eredményeire. A 4.a ábrán a Magyar Nemzeti Múzeum előtt 1893-ban felállított Arany János szoborcsoport látható. Az emlékmű restaurálási munkálatait 2017-ben kezdték el, mellyel együtt járó anyagvizsgálatokat kutatócsoportunk végezte [3]. Az anyagvizsgálat célja itt a megfelelő restaurálási módszer objektív kiválasztásának támogatása.

Régészeti korú tárgyak anyagvizsgálatát is az ipari gyakorlatban alkalmazott módszerekkel, eszközökkel végezzük, természetesen azt figyelembe véve, hogy ezek a több száz – esetleg több ezer éves leletek műemlékvédelem alatt állnak. A társadalomtudományban felmerülő fontos kérdésekre választ adhatunk a műszaki gyakorlatban alkalmazott anyagvizsgálattal (4.b ábra). Ilyen kérdés a fémtárgyak ötvözete, készítés technikája, tárgyak-tárgycsoportok közötti kapcsolatok.



4. ábra: a) Anyagvizsgálat az Arany János szoborcsoport restaurálási munkálatai során
b) Hódmezővásárhelyi Múzeumtól vizsgálatra kapott Árpádkori lelet anyagvizsgálata

Anyagvizsgáló Szakmérnök képzés

Az anyagvizsgálati tudás gerincét az anyagvizsgáló szabványok adják.

Az anyagvizsgálathoz anyagvizsgáló berendezések szükségesek. Ezek pontossága rendkívül fontos, hiszen ez determinálja, hogy a mérési eredmények mennyire állnak közel az anyag valódi fizikai tulajdonságaihoz, ez biztosítja a mérési eredmények megbízhatóságát, helytállóságát. A szabványok (ISO, DIN, ASTM stb.) által meghatározott pontosság megköveteli, hogy ezek laboratóriumi körülmények között működjenek.

Ezzel párhuzamosan a laboratóriumi munka elvárja a megfelelően képzett szakmérnököt, így a kapcsolódó szakmérnöki képzést.

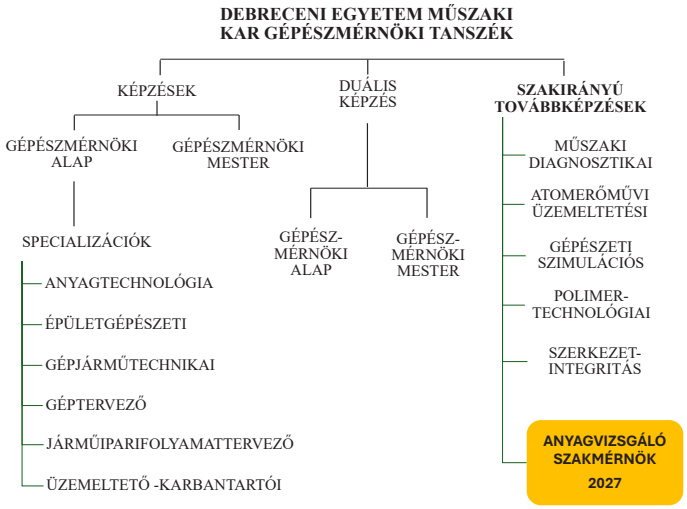
A mérnöki és az anyagvizsgálati gyakorlat szükségessé teszi a laboratóriumok működésével, működtetésével kapcsolatos ismereteket, a mérésekkel összefüggő tudás teljes körének ismeretét, a vizsgálati eljárások értékelésével kapcsolatos tudást.

Természetesen minden műszaki képzés tartalmazza az anyagvizsgálatról szóló ismereteket, de ma már olyan mérvű anyagvizsgálati ismeretre van szükség, mely megköveteli az erre dedikált szakemberek képzését.

Magyarországon számos kisebb-nagyobb ipari laboratórium működik, aminek fő profilja az anyagvizsgálat. Ezen felül az olyan vállalatok számára is szükség van anyagvizsgáló szakemberre, akik maguk nem működtetnek laboratóriumot, de besszállítóik, működésük, vevői körük megköveteli, hogy a minőségtanúsítványok, jelentések, jegyzőkönyvek tartalmát megfelelően értelmezni, kezelni tudják. Az anyagvizsgáló laboratóriumokat, a vállalatokat

és az anyagvizsgálatban jártas szakembereket többek között a Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete (MAE) képviseli. A MAE a maga területén és együttműködve is igyekszik összefogni a szakembereket és a szükséges tudásbázist.

Ezeket figyelembe véve terveztük meg az anyagvizsgáló szakmérnöki képzés indítását, a már meglévő szakirányú képzések mellett (5. ábra), ahol az eddig 2020 szeptemberében indított Szerkezetintegritási roncsolásmentes vizsgáló szakmérnök/szakember szakirányú képzési szakunkat kiegészítve az anyagvizsgáló szakmérnöki képzéssel a roncsolásmentes anyagvizsgálaton túl a roncsolásos és a klasszikus értelemben vett anyagvizsgálatot kívánjuk lefedni.



5. ábra: DE-MK Gépészmérnöki Tanszékén elérhető képzések

Az oktatáshoz biztosítani kell, hogy a helyszínen elérhető legyen a képzéshez szükséges modern, jól felszerelt a képzés tárgyait a lehető legnagyobb mértékben lefedő infrastruktúra. Az elmúlt időszakban ezen a meglévő gépészmérnöki oktatást lefedő laboratóriumaink mellett, kifejezetten az anyagvizsgálatra fókuszáló laborok kialakításán dolgoztunk. A laboratóriumok fejlődésének hajtóereje mind az oktatás, mind az ipar részéről megvan, így 2026. január 1-től az új, kalibrált berendezésekkel és eszközökkel felszerelt laboratóriumban az EN 17025 szabvány ajánlásai alapján működő Minőségirányítási rendszert vezettünk be.

A fentiekre alapozva és a MAE-től érkezett felkérés és támogatás eredményeként, valamint számos akkreditált laboratórium vezetőjével, illetve szakembereivel összefogva terveztük meg az Anyagvizsgáló Szakmérnöki szakirányú továbbképzés tantervét (1. táblázat).

A nélkülözhetetlen alaptárgyi képzések után az anyagvizsgálat elméleti megfontolásai mellett gyakorlati anyagvizsgálati képzést is magában foglal a tanterv. A klasszikus anyagvizsgálati eljárások mellett az új innovatív technikák is helyet kaptak a képzésben.

A Debreceni Egyetem más laboratóriumaival együtt azok kiváló szakembereit is tervezzük bevonni az oktatásba, ezzel is emelve a képzés oktatásának színvonalát, mindemellett az említett Intézetek Laboratóriumai tovább növelik a képzéshez szükséges infrastruktúrát.

1. táblázat: Anyagvizsgáló szakmérnöki képzés tantervi háló

Tantárgy neve	Óraszám	Félév
Anyagismereti alapok	4	1
Statisztikai módszerek	8	1
Szilárdságtani alapismeretek	8	1
Minőségirányítás és metrológia I.	4	1
Minőségirányítás és metrológia II.	12	2
Fémes anyagok és technológiájuk	16	1
Nemfémes anyagok és technológiájuk	16	1
Károsodási folyamatok és állapotértékelés	12	1
Mechanikai vizsgálatok I.	12	1
Mechanikai vizsgálatok II.	12	2
Roncsolásmentes vizsgálatok I.	12	2
Roncsolásmentes vizsgálatok II.	12	2
Mikroszerkezeti vizsgálatok	12	2
Analitikai vizsgálatok	12	2
Speciális anyagvizsgálatok	8	2
Akkreditált anyagvizsgáló laboratóriumok I.	10	1
Akkreditált anyagvizsgáló laboratóriumok II.	10	2
Szakdolgozat	4	2

Az igényfelmérésben megkerestünk működő anyagvizsgáló laboratóriumokat, akik az oktatásba való becsatlakozással is támogatják az induló szakmérnöki képzést, így a Bay Zoltán Kutató Intézet, valamint az ÁEF Anyagvizsgáló Laboratórium Kft. az infrastrukturális lehetőségéken túl, a szakmában elismert szakemberekkel az oktatásban is jelentős szerepet vállalva teszik teljessé a képzést.

A Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszékén folyamatosan végzünk különböző ipari megbízásokat, vizsgálati projekteket, így esettanulmányokon keresztül tudjuk a Hallgatóknak bemutatni a valós, életszerű problémákat és azok megoldásához vezető folyamatot.

A szakmérnöki képzés indítását 2027-re tervezzük, a képzés időtartama 2 félév, a képzés formáját tekintve levelező szintű, megadva a lehetőséget azok számára akik már az iparban hasonló területen dolgoznak, vagy szeretnének dolgozni. Természetesen azok számára is adott a lehetőség, akik már anyagvizsgáló laboratóriumba dolgoznak. Az anyagvizsgálat rendkívül széles területet fed le, így aki elméleti ismereteit vagy gyakorlati kompetenciáját kívánja bővíteni, még magasabb szintre emelni, a legjobb választás lesz az Anyagvizsgáló szakmérnöki képzésünk.

Összefoglalás

A Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszéke szervezésében és a Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete, továbbá számos elismert laboratórium és vállalat – Bay Zoltán Kutató Intézet, ÁEF Anyagvizsgáló Kft, GRIMAS Kft. támogatásával tervezzük elindítani 2027-től az Anyagvizsgáló szakmérnök/szakember szakirányú továbbképzési szakunkat, szem előtt tartva az iparban felmerülő a képzés által lefedhető igényeket.

A Gépészmérnöki Tanszék oktatói mellett, a képzésbe bevonunk további egyetemi szakembereket, valamint

kiváló nemcsak a tudományos életben, de az ipari gyakorlatban is elismert, nagy tapasztalattal rendelkező mérnökök bevonásával biztosítjuk a képzés magas szintű gyakorlati oktatását.

A Gépészmérnöki Tanszék Laboratóriumainak folyamatos fejlesztésével biztosítjuk a megfelelő infrastruktúrát, valamint szoros együttműködésben hazai akkreditált laboratóriumokkal tesszük teljessé a képzést.

Ha anyagvizsgáló szakemberre van szükség, vagy ambíciója van ezen a területen éljen a képzés lehetőségével.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket fejezzük ki azoknak a hazai anyagvizsgáló szervezeteknek, akik egyrészt megtisztelték Tanszékünket azzal, hogy felkértek minket a képzés elindítására és ezzel támogatásukat is biztosították. Szintén köszönettel tartozunk azoknak a hazai vállalatoknak és laboratóriumoknak, akik szintén támogatásukkal biztosítják az Anyagvizsgáló szakmérnöki szakirányú továbbképzést. Hálás köszönet azon hazai szaktekintélyeknek (Dr. Bíró Gyöngyvér, Dr. Csizmazia Ágnes, Dr. Dobránszky János, Fodor Olivér, Harnisch József, Dr. Tóth László), akik javaslataikkal hozzájárultak a képzés kidolgozásához.

Irodalomjegyzék

[1] Gyöngyösi, Sz.: Sárgaréz gömbcsap elcinktelenedés okozta törésének vizsgálata [Az anyagvizsgálati technológiatranszfer beépülése a magyar iparba és az oktatásba]. 12. AGY Konferencia, Miskolc-Tapolca, Magyarország. 2026.04.05. https://mae-agy.hu/

[2] Barkóczy, P., Benchabane, A. E., Gyöngyösi, Sz, Juhász, L., Kaselow, T., Dawidowski, U. : Titán-oxid mechanikai viselkedése alumínium uzalok felületén vezetékgyártás során. XVI. Képlékenyalakító konferencia, Miskolc, Magyarország, 2018.02.07

[3] Gyöngyösi, Sz., Juhász, L., Nagy, M., Szatmáriné Bakonyi, E., Barkóczy, P., Forgács, Gy. : Arany János szoborcsoport restaurálásának anyagvizsgálati kérdései, 2019, ISBN: 9786155270604, p. 51

Gyöngyösi Szilvia,
Debreceni Egyetem, egyetemi docens
Mankovits Tamás
Debreceni Egyetem, tanszékvezető egyetemi docens

GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

Üzemlátogatás a GTE szervezésében

A GTE Nyomástartóedény Szakbizottsága által a Balatoni Ankét résztvevői számára rendszeresen szervez üzemlátogatásokat.

Idén szeptember 18-án az FGSZ Földgázszállító Zrt. városföldi kompresszor állomásán láttak minket vendégül. Az üzem, illetve a földgázellátás rendszerét Rátkai Szilvia és Paál György kollégák mutatták be, majd vezették körbe a látogatókat a területen.

Az FGSZ számokban: közel 700 munkavállaló, 1 központ, 6 területi központ, 5889 km vezetékhossz, 8 db kompresszor állomás, 25 betáplálási pont, 18 fő csomópont, 400 gázátadó állomás.

A hosszú vezetékrendszer és a hozzá tartozó kompresszorállomások, csomópontok, nyomásszabályzó, szűrő- és mérő berendezések üzemeltetése számtalan műszaki érdekességet tartalmaz.

Ezek részleteiről az FGSZ munkatársai érdekes információkat osztottak meg, illetve válaszoltak a látogatók kérdéseire.



A látogatók fogadása



Csoportkép

Beszélgetés Takács Csabával

Interview with Csaba Takács

Kérdező/Questioner: Skopál István

Beszélgetőpartnerem ezúttal Takács Csaba, aki a MAROVISZ elnökségében az „ifjú" generáció egyik képviselője, egyben újabb erős „kapocs" a Bay Zoltán Kft. és a MAROVISZ között.

Azt nyilván sokan tudják, hogy a „Bay"-nál dolgozol, de azt, hogy milyen területen, valószínűleg kevesen. Bemutatkozásként foglald össze, légy szíves, az itteni tevékenységedet!



Jelenleg az Élettartam Menedzsment Osztály vezetőjeként koordinálom a csapat munkáját, amelyben természetesen magam is részt veszek. A feladatunk ipari létesítmények nyomástartó edényeinek és csővezetékeinek élettartam-becslése. A Bay Zoltán Közhasznú Nonprofit Kft. munkatársaként egyébként 2013-ban, frissen végzett diplomásként kezdtem dolgozni az Anyagvizsgálati Osztályon, ahol roncsolásos vizsgálatokat már az érkezésem előtt is régóta végeztek, és segítőkészen be is avattak a vizsgálatok végrehajtásának számomra korábban nem ismert rejtelmeibe. Ez idő tájt született meg a vezetőség részéről az az elhatározás, hogy roncsolásmentes laboratóriumot is alapítsanak a Kft.-nél, legfőképp a vizsgálatok fejlesztése érdekében. Ekkor csatlakozott a társaságunkhoz Méhész István is, akinek a mentorálása segítségével ismerkedtem meg a roncsolásmentes eljárásokkal.

Mely eljárásokkal, módszerekkel foglalkoztál behatóbban, részt vettél-e fejlesztő munkákban?

A roncsolásos eljárások közül leginkább szakító és fárasztó vizsgálatokkal: nem kifejezetten a végrehajtásuk, hanem inkább az értékelésük volt a feladatom. Ami a roncsolásmentes vizsgálatokat illeti, hagyományos és fázisvezérelt ultrahangos vizsgálatokkal foglalkoztam mélyebben, valamint érintőlegesen ezek modellezéseivel. Fejlesztő munkában leginkább a különböző befogások tervezése, valamint az ultrahangos modellezések során vettem részt.

Milyen tapasztalatokat szereztél a modellezés terén? Szerinted mennyire megbízhatóan tervezhetünk meg egy vizsgálatot modellszámítások alapján?

A modellezés – különösképpen komplex helyzetekben – nagyon jól támogathatja az anyagvizsgálót, de a szakmai tapasztalatát nem helyettesíti. Azt tartom üdvözítőnek, ha a vizsgálatot végző teamben mindkét tudás jelen van, és nem vetélkedés, hanem konstruktív együttműködés tud kialakulni.

Bevallom, meglepődtem: milyen „vetélkedés" alakulhat ki ezen a téren? Azt gondolom, hogy vizsgálók és modellezők inkább egymásra vannak utalva!

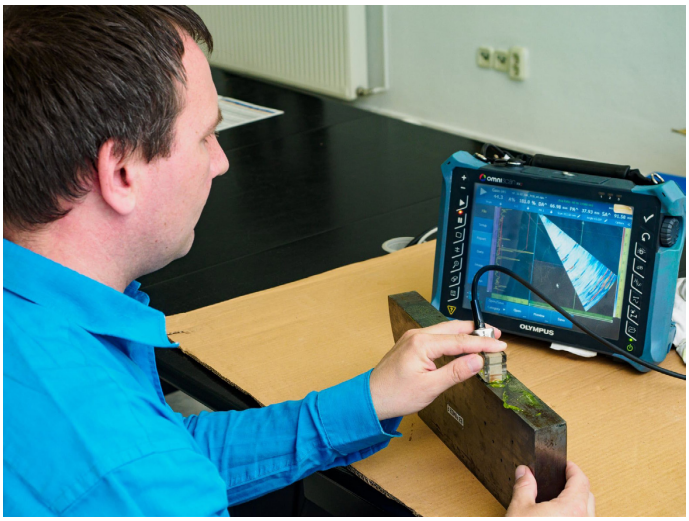
Különösen stresszes helyzetben alakulhat ki ellentét, ha nem sikerül konszenzusra jutniuk, az idő pedig szorít. De ha tiszteletben tartjuk egymás tudását és fontosságát, akkor ezen is túl lehet lendülni, és kialakul a konstruktív együttműködés. Ezt egyébként általános negatív emberi tulajdonságnak gondolom, mely nemcsak erre a területre vonatkozik.

Visszakanyarodva az élettartam menedzsmentre, tudnál-e említeni az ezzel kapcsolatos munkáid közül olyanokat, amelyek érdekesek, tanulságosak lehetnek az olvasók számára – nem sértve persze a kötelező titoktartás szabályait?

Nagyon fontos tapasztalat számomra, hogy következetesen, visszavezethetően legyenek feljelölve a vizsgálati helyek a berendezéseken és a csővezetékeken, hogy évek múlva a visszaméréseket ugyanazokon a helyeken végezhessék el. Csővezetékek falvastagság-méréseinél több esetben előfordult, hogy az eredmények alapján úgy tűnt, mintha a falvastagság jelentősen, a mérési szórástól nagyobb mértékben növekedett volna. Ez természetesen csak úgy lehetséges, ha kicserélték az adott vezetékszakaszt, amiről nem készült dokumentáció, vagy más helyen végezték el a méréseket. Ez viszont a korróziós trendek elemzésénél anomáliákat okozhat.

Milyen közép- és felsőfokú tanulmányokat végeztél, és mi „vezetett" a „Bay"-ba?

Miután a Diósgyőri Gimnáziumban leérettségiztem, a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karán szereztem meg a BSc és MSc diplomámat anyagmérnök szakon. Ezt követően nagyon sok helyre beadtam a jelentkezésemet, így a „Bay"-ba is. Ez csak egy jelentkezés volt a már-már követhetetlenül sok közül, viszont a legtöbb helyről semmilyen, még elutasító válasz sem érkezett a jelentkezésemre, míg a „Bay"-ba visszahívtak egy személyes elbeszélgetésre. Ezen a személyes találkozón ragadta meg a figyelmem az intézet és az ott folyó munka. Végül felvételt nyertem, és pár év múlva – már a „Bay"



égisze alatt – az „Atomerőművi üzemeltetési szakmérnök” és a „Szerkezetintegritási és roncsolásmentes vizsgáló szakmérnök” képzéseket is elvégeztem, amelyek kifejezetten jó fórumnak is bizonyultak ahhoz, hogy a hallgatók egymás közt és az oktatókkal megosszák a gyakorlati tapasztalataikat.

Immár három éve vagy a MAROVISZ elnökségének tagja. Milyennek látod az egyesületünket?

Az egyesületünk fontos célt szolgál és kitűnő szakemberek végzik benne a munkájukat, ugyanakkor a jövő fontos feladatának látom elérni, hogy a MAROVISZ logó az anyagvizsgálatokat megrendelő vállalatok számára is sokat jelentsen, a vizsgálatok megrendelésekor ne csak a legkedvezőbb ár számítson. Ez valójában hosszú távon nem csak a MAROVISZ, hanem minden szereplő érdeke.

Igen, de hol vagyunk attól, hogy a hosszú távú tervezés, gondolkodás váljék dominánssá akár csak a mi területünkön? Mi kellene ahhoz, hogy legalább elkészüljön az a régóta tervezett táblázat, ami tartalmazná a különféle vizsgálati feladatokhoz ajánlott, irányadó árakat – természetesen a tagságunk javaslatai alapján?

A hosszú távú tervezést – ha nem is dominánsan, csak a személyes tapasztalataimra támaszkodva – megjelenni látom a megrendelőknél, nem elvitatva, hogy nagyon sok tennivaló van még ezen a téren is. Azt is érzékelni lehet, hogy a megrendelőknek megvannak a különböző vizsgálatokhoz a preferált cégeik, amelyeket szívesen bíznak meg egy-egy munkával – ha szükség van arra, és a partnereknek is van rá kapacitásuk. Amit a távoli jövőben fontosnak gondolok elérni, hogy ebben a kiválasztási folyamatban érezhető előnyt jelentsen a MAROVISZ-tagság, és a MAROVISZ a háttértudásával is tudja támogatni a partnereit. Az irányadó árak esetében azt kell elérni, hogy a partnerek is szükségesnek lássák ennek a meglétét, és értsenek egyet a szellemiségével. Azt én személyesen nem tartanám jó iránynak, ha megadnánk, hogy egy bizonyos vizsgálatot milyen összegért célszerű elvállalni, mert sok szempontot (pl. mennyiségi kedvezmény, sürgősség, munkavégzési körülmények stb.) kellene figyelembe venni, ami végül egy nagyon összetett rendszert eredményezne. Ezért is látom fontosnak, hogy inkább ennek a szellemisége jelenjen meg a partnereinknél.

Ahhoz képest, hogy ezek a témák vagy egy évtizede az elnökségünk asztalán vannak, szerintem már most a „távoli jövőben” vagyunk. Ha a Magyar Mérnöki Kamara tevékenységi körönként meg tudott határozni ajánlott mérnöki napidíjakat, és ezeket évente frissíti is, akkor talán a szövetségünk is követhetné ezt a példát a vizsgálati díjakra vonatkozóan. Te hogyan látod ezt?

Hatalmas elismerésem a Magyar Mérnöki Kamara felé, hogy ezt el tudta érni, mindazonáltal tudok olyan esetekről, amikor mérnökök a Kamara által meghatározott ár alatt/felett adtak árajánlatot egyes tevékenységekre. De amennyiben erre a szándék minden tag részéről megvan, akkor sikerülni fog a bevezetés is. Ezért is tartom fontosnak azt elérni, hogy ennek a szellemiségében legyen egyetértés a tagok között.



Ehhez kapcsolódik persze az a kérdés is, hogy milyen az anyagvizsgálók, a „szakma” megbecsültsége az ipari szereplők, a megrendelők részéről. Mit tudsz erről mondani az eddigi tapasztalataid alapján?

Talán kicsit paradox módon fog hangzani az eddig elmondottak után, de a személyes tapasztalatom az, hogy a megrendelők többsége tisztelettel kommunikál és viselkedik az anyagvizsgálóval a személyes találkozásuk során. A vizsgálati ár kialkudása során lehetnek ellentétek, de ez nem kifejezetten a vizsgáló személye felé irányul, és amikor a vizsgálatra kerül sor, az már jobb hangulatban telik.

Remélve, hogy ez a riport is jó hangulatú volt számodra, kívánok Neked további érdekes vizsgálati feladatokat, sok sikert ezen a szép pályán, valamint eredményes elnökségi munkát! Nagyon köszönöm a beszélgetést.

A végeselemes modellezéstől a szimuláció tudományáig: A numerikus szimulációban rejlő lehetőségek kiaknázása

From Finite Element Modeling to Simulation Science:
Unlocking the Power of Numerical Simulation

Bármilyen hihetetlenül is hangzik, a hagyományos végeselemes szoftverekben alkalmazott magtechnológia és a mögöttes architektúra már csaknem 60 éves. Ennek következtében számos, azóta született fontos tudományos eredmény nem érhető el az ezeket az eszközöket használó mérnökök számára.

Különbséget kell tennünk a végeselemes modellezés gyakorlata és a végeselem analízis tudománya között. Ezek lényegében két egymástól független evolúciós folyamat eredménye. A végeselemes modellezés gyakorlata az 1960-as években gyökerezik, amely időszak a végeselem-módszer fejlődésének korai, paradigma előtti szakaszára esik. Ez a Thomas Kuhn által meghatározott szakasz egy olyan időszakot jelöl, amikor egy adott tudományos kutatási terület még nem rendelkezik egységes elméleti kerettel [1].

A végeselem-módszer egységes elméleti keretének kidolgozására később került sor, és csak az 1980-as évek végére ért el magas szintű érettséget. Ez a keretrendszer elsősorban a matematikusi közösségen belül alakult ki, ahol a végeselem-módszerre úgy tekintettek, mint egy numerikus technikára, amely a jól megfogalmazott matematikai problémák pontos megoldásainak közelítésére szolgál. Ezzel szemben a mérnöki közösség – beleértve a kereskedelmi végeselem programok fejlesztőit is – a módszert egy intuitív modellezési eszköznek tekintette, lényegében a szerkezetanalízis mátrixmódszereinek kiterjesztéseként kezelte [2].

Ez a két eltérő szemléletmód az egyik fő oka annak, hogy a numerikus szimulációban rejlő lehetőségek a gyakorlatban még mindig jelentős részben kihasználatlanok maradnak. A kiaknázatlan potenciál a végeselemes modellezés mérnöki gyakorlata és a numerikus szimuláció tudományos alapjai közötti szakadékból ered. E lehetőségek hasznosításához át kell hidalni ezt a szakadékot, ami több alapvető akadály leküzdését teszi szükségessé.

Vegyes teljesítmény

Mire a végeselem-módszer elméleti alapjait kidolgozták, a hagyományos kereskedelmi szoftverek már mélyen beágyazódtak a mérnöki munkafolyamatokba. Az elmúlt ötven év során a gyakorló szakemberek jelentős tapasztalatot halmoztak fel ezekkel az eszközökkel. Az eredmények azonban vegyesek.

Ezeket a kódokat hatékonyan alkalmazták olyan szerkezetanalízis-problémákra, mint a repülőgépvázak terhelés-modellezése és a gépjárművek ütközésdinamikája. Ilyen esetekben a kívánt értékeket a terhelés-elmozdulás összefüggése határozza meg. Ez a cél végeselemes modellek szakszerű beállításával és a beviteli adatok körültekintő megválasztásával elérhető.

A szilárdságtani elemzések ezzel szemben jóval szigorúbb követelményeket támasztanak. A releváns eredménymennyiségek a feszültségmezőtől és más, az elmozdulásmező deriváltjaiból származó mennyiségektől függenek. Következésképpen a megbízható feszültségbecslés az elmozdulásmező nagyobb pontosságú reprezentációját és a modellezési részletek körültekintőbb meghatározását teszi szükségessé. Ez magában foglalja többek között a koncentrált erők, a pontszerű peremfeltételek és a redukált integrálású elemek kerülését.



Frank Kendall III

A több évtizedes használat ellenére a hagyományos végeselemes kódok nem képesek döntési szintű megbízhatóságot nyújtani a szilárdsági előrejelzések terén. Frank Kendall, az Egyesült Államok védelmi minisztériumának ügyvezető államtitkára (később a légierő minisztere), az F-35 vadászgép fejlesztési program jelentős csúszásainak és költségtúllépéseinek elsődleges okát magyarázva elmondta: *„A minisztérium optimista előrejelzéseket fogalmazott meg az F-35 gyártásának megkezdésekor, miszerint már elég jó tervezőeszközökkel, szimulációkkal és modellezéssel rendelkezünk ahhoz, hogy ne kelljen aggódnunk a tesztek során felmerülő problémák miatt. Ez tévedés volt, és most megfizetjük az árát."* [3]. [Zárójelben: Amikor egy ilyen magas rangú tisztviselő tévedést említ, a tévedés ára ritkán esik 100 milliárd dollár alá.]



F-35: Ötödik generációs, többfeladatú lopakodó vadászgép

Ezek az „optimista előrejelzések" azon a feltételezésen alapultak, hogy a hagyományos végeselemes eszközöknek – amelyek az F-35 program kezdetekor már több mint harminc éve fejlesztés alatt álltak – bőséges idejük volt arra, hogy megbízható tervezési eszközökké váljanak. Bár a felhasználói felületek és a számítási sebesség jelentősen

fejlődtek ebben az időszakban, a mögöttes, elem-orientált szoftverarchitektúra, amely a végeselem-módszer 1960-as évekbeli értelmezésében gyökerezik, nem rendelkezik azzal a rugalmassággal, hogy befogadja a későbbi eredetű fontos elméleti és algoritmusbeli fejlesztéseket, amelyek közvetlenül befolyásolják a szilárdságtani előrejelzések megbízhatóságát.

A stagnálás gyökerei

Hogyan lehetséges, hogy a széles körben alkalmazott mérnöki szoftverrendszerek számos tekintetben még mindig nem tükrözik a numerikus szimuláció tudományának jelenlegi állását? A válasz részben a fejlesztést és alkalmazást meghatározó irányítási (governance) mechanizmusok hiányosságaiban keresendő. Ennek megértéséhez egyaránt figyelembe kell vennünk a fejlesztők és a felhasználók nézőpontját.

Nyilvánvaló, hogy a szoftverfejlesztők szakmai felelőssége a lehető legfejlettebb és tudományosan megalapozott technológiák elérhetővé tétele. A hagyományos végeselemes szoftverek alapjai nagyrészt a végeselem-módszer 1960-as és 1970-es évekre kialakult eredményeire épültek. A fejlesztők sok esetben nem hasznosították az alkalmazott matematikai kutatások későbbi, jelentős eredményeit, részben azért, mert ezek az eredmények az alkalmazott matematika formális nyelvén kerültek megfogalmazásra, amely a legtöbb mérnök számára nehezen hozzáférhető. Még nehezebben áthidalható problémát jelentett, hogy a hagyományos végeselemes programrendszerek szoftverarchitektúráját nem úgy tervezték, hogy képes legyen befogadni a későbbi módszertani fejlesztéseket. A mérnöki munkafolyamatokba mélyen beágyazódott rendszerek teljes újraírását ezért végül sokan gyakorlatilag megvalósíthatatlan feladatnak tekintették.

A probléma fennmaradása nagyrészt annak tulajdonítható, hogy a szabályozó hatóságok, a kormányzati beszerzési szakemberek és az ipari felhasználók többnyire kritikai vizsgálat nélkül fogadták el a kereskedelmi forgalomban elérhető megoldásokat, és feltételezték, hogy azok megfelelő alapot nyújtanak a kulcsfontosságú tervezési döntések meghozatalához. Frank Kendall megjegyzéseit ebben az összefüggésben kell értelmezni. Az általa említett utólagos bölcsesség ellenére azonban az elmúlt tizennégy évben nem következett be érdemi változás. Nehéz mindezt másként értelmezni, mint egy széles körben elterjedt, rendszerszintű mulasztás következményeként.

Útmutató a fejlődéshez

A numerikus szimuláció megbízhatósága, és ezzel együtt gyakorlati hasznossága jelentősen növekedhet, ha a végeselemes elemzés tudományos eredményeit integráló szoftvereszközök széles körben hozzáférhetővé válnak a mérnöki közösség számára.

Ez hatalmas vállalkozás, amely megköveteli a numerikus szimuláció jelenlegi, elemközpontú szemléletéről egy modellközpontú megközelítésre való áttérést, valamint olyan szoftverarchitektúra kialakítását, amely támogatja a hierarchikus végeselemes függvényterek alkalmazását és a modellek hierarchikus, formális kiterjesztését [4]. Ezek a képességek a verifikáció és validáció (V&V) elengedhetetlen előfeltételei. Hiányoznak a hagyományos végeselemes szoftverekből, ugyanakkor nélkülözhetetlenek a numerikus szimuláció és a magyarázható mesterséges intelligencia (XAI) integrációjához. Az alábbiakban bemutatjuk a cél eléréséhez vezető gyakorlati lépéseket [5].

- Ismerjük fel a hagyományos végeselemes szoftverek korlátait, és tekintsünk rájuk elsősorban szerkezeti modellezési eszközként. Ez nem jelenti azt, hogy szilárdságtani problémák megoldására ne lennének alkalmazhatók; ehhez azonban speciális szakértelem szükséges a megfelelő elemtípusok, modellezési eljárások és bemeneti adatok kiválasztásához. A vizsgált eredménymennyiségek hibájának becslése általában összetett, költséges és időigényes feladat, ezért az ipari gyakorlatban erre csak ritkán kerül sor.
- A megbízható prediktív teljesítményben érdekelt szereplőknek, így a felügyeleti hatóságoknak, a kormányzati beszerzési szakembereknek és a gyártó vállalatoknak szabványokat kellene kidolgozniuk a numerikus szimulációk által szolgáltatott információk elfogadhatóságának megítélésére. E szabványoknak meg kell követelniük, hogy a szimulációk a tervezési és üzemeltetési döntésekhez közvetlenül felhasználható, bizonyítékokkal alátámasztott eredményeket szolgáltassanak. Fontos hangsúlyozni, hogy az ASME V&V 40 és a NASA-STD-7009B szabványoknak való megfelelés önmagában nem elegendő az ilyen szintű megbízhatóság igazolásához. Ezek a szabványok elsősorban a modellezési és hitelesítési folyamatok megfelelőségére összpontosítanak, és nem garantálják, hogy egy adott alkalmazásban a modell előrejelzései a kívánt pontossággal és megbízhatósággal tükrözik a valóságot.
- A numerikus szimulációk által szolgáltatott információkra támaszkodó szervezeteknek hatékony szimuláció-irányítási (simulation governance) gyakorlatot kell kialakítaniuk, amelynek célja annak biztosítása, hogy az előrejelzett mennyiségek megbízhatósága a fizikai kísérletek eredményeihez mérhető legyen. Ez egyben hozzájárul a numerikus szimulációs projektek hatékonyságának és értékteremtő képességének maximalizálásához is [6].

Kulcsfontosságú tanulságok

- A végeselemes modellezés azt kérdezi: „Milyen hálót és milyen elemeket használjak?” A szimuláció tudománya ezzel szemben azt kérdezi: „Mennyire megbízható az előrejelzés, és tudjuk-e ennek megbízhatóságát igazolni?”
- A numerikus szimuláció valódi értéke nem pusztán az eredmények előállításában, hanem azok megalapozottságának igazolásában rejlik.
- A numerikus szimulációban rendkívül nagy kiaknázatlan lehetőség rejlik.
- A végeselem-módszer matematikai alapjai és számos

jelentős továbbfejlesztése évtizedek óta ismertek. A hagyományos végeselemes szoftverek azonban ezeket az eredményeket nem tették hozzáférhetővé a mérnöki gyakorlat számára. Ennek következtében a gyakorlati alkalmazás számos fontos területen elmaradt a tudomány jelenlegi állásától. A hagyományos eszközök továbbra is hatékonyan használhatók szerkezeti modellezési feladatokra, szilárdságtani előrejelzések esetén azonban általában nem nyújtanak a döntéshozatalhoz szükséges megbízhatóságot.

- Ahhoz, hogy a szimulációk megbízható előrejelzéseket szolgáltassanak, fel kell hagynunk azzal a szemlélettel, amely a modellezést elsősorban intuitív mérnöki feladatnak tekinti. Ehelyett a numerikus szimulációt tudományosan megalapozott folyamatként kell kezelnünk, amely megköveteli a hibabecslést, a verifikációt, valamint annak igazolását, hogy az előrejelzett mennyiségek megfelelnek a döntéshozatalhoz szükséges megbízhatósági követelményeknek. E szemléletváltás nélkül a szimuláció továbbra is bizonyítékokkal nem alátámasztott eredményeket szolgáltat, amelyek megbízhatósága szükségszerűen kérdéses marad.

Hivatkozások

[1] Kuhn, T. S. (2000). A tudományos forradalmak szerkezete. Budapest: Osiris Kiadó.
[2] Przemieniecki, J. S. (Principal Editor) Matrix Methods in Structural Mechanics: Proceedings of the Conference Held at Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 26–28 October 1965, AFFDL-TR-66-80.
[3] Kendall, F. The Acquisition Implications of the DOD Strategic Guidance and the FY 2013 Budget. Center for Strategic and International Studies, Washington, DC, February 6, 2012. Transcript: tinyurl.com
[4] Szabó, B. and Babuška, I. (2021). Finite Element Analysis. Method, Verification and Validation. John Wiley & Sons Inc. Hoboken, NJ.
[5] Szabó, B. (2026). From Legacy Finite Element Modeling to Explainable Simulation: Technical Requirements for XAI in Computational Mechanics. engrXiv. engrxiv.org
[6] Szabó, B. and Actis, R. (2012). Simulation governance: Technical requirements for mechanical design. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 249, pp. 158-168.

Szabó Barna
Engineering Software Research and Development, Inc.
St. Louis, Missouri, USA

ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA ELŐFIZETÉS MEGÚJÍTÁSA

Ne felejtse el megújítani

előfizetését

az Anyagvizsgálók Lapjára!

A lap újjászerveződött csapatának köszönhetően az első nyomtatott verzió ***2022-től*** elérhető.

A ***nyomtatott kiadvány negyedévente*** – teljesen megegyező tartalommal, mint az online letölthető számok – ***előfizetéses formában*** jelenik meg.

Amennyiben igényt tartana rá, kérem jelezze a MAROVISZ felé az alábbi email címen:

marovisz@marovisz.hu



Bridging the Gap: Advancing Finite Element Analysis in Numerical Simulation – 1. rész: Miért aktuális ez a könyv most?

AI, digitális transzformáció, digitális ikrek és explainable AI

Part 1: Why Is This Book Relevant Now?

Mi változott a mérnöki munka környezetében?

Szabó Barna Bridging the Gap: Advancing Finite Element Analysis in Numerical Simulation című könyve [1] egy gyakorlati különbséget állít a középpontba: egy számítás végrehajtása és az eredmény megbízhatóságának alátámasztása nem ugyanaz a feladat. A címben szereplő *rés* a módszer mérnöki és alkalmazott matematikai értelmezése között húzódik. A szerző közös fogalmi alapot keres ahhoz, hogy a szoftverben elvégezhető műveleteket összekössük azzal, amit a modellről és a számított mennyiségekről valóban állíthatunk [1: 5-7. o.].

A kötet gondolatait korábbi könyvismertetőnkben már bemutattuk [2]. Most azt a kérdést tesszük fel, miért érdemes ezekhez visszatérni az AI térnyerése idején. Szabó maga is az AI-integráció miatt sürgeti a modellezési gyakorlat felülvizsgálatát. Figyelmeztetése azonban nem egyszerűen az új eszközök kockázataira vonatkozik: a könyv a mérnöki tudás szervezéséről, az előrejelzések javításáról és a modellek folyamatos fejlesztéséről is szól [1: 5-7. és 41-45. o.].

Az új helyzetet az teremti, hogy a digitális eszközök egyre több ponton kapcsolódhatnak be a munkánkba. Felismerhetnek eltéréseket a vizsgálati képen, adatokat emelhetnek ki egy dokumentumból, új anyagösszetételeket és kristályszerkezeteket javasolhatnak, vagy a következő művelet végrehajtásához használhatnak más eszközöket [3-6]. Nem ugyanarról az AI-ról és nem azonos érettségű alkalmazásokról van szó. A közös változás az, hogy a feladat végrehajtása mellett a megoldáskeresés és a munkamegosztás egy része is automatizálhatóvá válik.

Éppen ezért éleződik ki a könyv kérdése: hogyan lesz a géppel előállított eredményből mérnöki tudás? Nem minden automatizált lépés teremt új ismeretet, és nem minden hasznos gépi javaslat alkalmas közvetlenül döntésre. Különbséget kell tennünk az adat kiolvasása, a modellből származó becslés és a felhasználási célra vonatkozó következtetés között. Közben azt is fel kell ismernünk, milyen új kérdések válnak vizsgálhatóvá a gyorsabb feldolgozás és a bővülő számítási lehetőségek révén.

A könyv aktualitását ebben a kettősségben látjuk. Az AI több változat kipróbálását és több adat együttes értelmezését teheti lehetővé, miközben a munkát végző szakember kevésbé láthat rá minden köztes lépésre. A cél nem ennek a változásnak a fékezése, hanem olyan munkamegosztás kialakítása, amelyben a gyorsaság a jobb megismerést és a megalapozottabb döntést szolgálja.

A válaszgenerálástól a felfedezés támogatásáig

A könyv pontos fogalomhasználatot sürgető gondolata az AI esetében is hasznos [1: 9-13. o.]. Egy radiográfiai képen eltéréseket felismerő modell, egy dokumentációban kereső nyelvi asszisztens és egy előre megadott karbantartási szabályt végrehajtó algoritmus eltérő feladatot lát el. Az utóbbi önmagában nem is feltétlenül AI. A fejlesztésről érdemben akkor tudunk beszélni, ha megnevezzük, mit bízunk a tanult összefüggésekre, mit az előre rögzített szabályokra, és hol marad szükség szakértői döntésre [3, 6]. Az 1. táblázat a cikkben tárgyalt funkciókat és a hozzájuk tartozó mérnöki kérdéseket foglalja össze.

1. táblázat: *Eltérő funkciók az AI-val támogatott mérnöki munkában*

Funkció	Kapcsolódó példa és lehetőség	Tisztázandó kérdés
Dokumentumadatok kinyerése	Műszaki rajzok táblázatainak felismerése és rekonstrukciója [6]	Megmaradt-e az adat jelentése és berendezéshez tartozása?
Vizsgálati képek gépi kiértékelése	Radiográfiai képek eltéréseinek felismerése és osztályozása [3]	Mely eltéréseket találja meg a modell, és melyeket téveszti el?
Szabályalapú értékelés	Elfogadási feltételek és karbantartási szabályok alkalmazása [3, 6]	Helyes adatokra és megfelelő szabályra épül-e? Önmagában nem AI.
Generatív anyagtervezés	MatterGen: lehetséges anyagösszetételek és kristályszerkezetek létrehozása [4]	Milyen számítás és kísérlet igazolhatja a javasolt anyag alkalmasságát?
Tanított közelítő modell	Neurális operátor áramlási számítások gyors közelítésére [8]	Mit közelít, milyen hibával és mely alkalmazási tartományban?
Eszközhasználó AI-ügynök	Eigen Engineering Agent: összekapcsolt konfigurálási és programozási lépések végrehajtása [11, 12]	Mi a feladat és az ellenőrzés határa, mit hagy jóvá a mérnök?

A generálás lehetősége az anyagtervezésben különösen érdekes: a keresés a kívánt tulajdonságból indulhat a lehetséges összetételek és kristályszerkezetek felé. Zeni és munkatársai MatterGen-modellje ilyen szerkezetváltozatokat állít elő számítógépen: arra ad javaslatot, hogy milyen atomokból és milyen térbeli elrendeződésben épülhetne fel a keresett szervetlen anyag. Ezek még nem előállított és minősített anyagok, hanem további számításra és kísérleti vizsgálatra szánt javaslatok. A 2025-ös közleményben a kutatók az egyik javasolt szerkezet alapján anyagot állítottak elő és annak tulajdonságait is vizsgálták [4]. Ebben nem az a szokatlan, hogy a számítógéppel javasolt anyagot végül kísérletileg is meg kell vizsgálni – ez az anyagfejlesztés természetes része. Az új lehetőség az, hogy az AI a rendkívül nagy kombinációs térből maga is képes ígéretes összetételeket és kristályszerkezeteket javasolni, amelyeket azután számításokkal és kísérletekkel lehet tovább szűrni és ellenőrizni.

Jó példa erre a Johns Hopkins Egyetemen kialakított AIMD-L (Artificial Intelligence for Materials Design Laboratory) [5], amelyben különböző anyagvizsgálati és anyagjellemzési eljárásokat robotizált mintakezeléssel és közös adatfeldolgozó rendszerrel kapcsoltak össze. A laboratóriumban többek között röntgendiffrakciós és

röntgenfluoreszcens vizsgálatok, nanoindentáció és nagy sebességű dinamikus anyagvizsgálatok végezhetők automatizált munkafolyamatban. A kísérleteket központi vezérlőrendszer koordinálja, amely emberi kezelőtől vagy AI-ügynöktől is fogadhat utasításokat, a feldolgozott mérési eredmények pedig felhasználhatók a következő vizsgálati lépés meghatározásához. A példa számunkra azért fontos, mert a javaslat, a kísérlet és az értékelés rövidebb, összekapcsolt ciklusainak lehetőségét mutatja.

Ezek alapján az AI szerepét szűken írná le, ha kizárólag a rutinfeladatok gyorsításáról beszélnénk. Meghatározott feladatokban a lehetséges megoldások kereséséhez is hozzá tud járulni. Mérnöki szempontból ennek az a jelentősége, hogy sok lehetséges anyagösszetétel és szerkezetváltozat közül kiválaszthatók a részletes számításra vagy kísérletre érdemes megoldások. Az így felvetett ötlet értékét a következő számítás, kísérlet vagy összehasonlítás dönti el, nem az, hogy ember vagy algoritmus javasolta.

A könyv ennél tartósabb kiindulópontot is kínál: a modellfejlesztést új adatokra és új hipotézisekre nyitott tevékenységnek tekinti [1: 41-45. o.]. Ezt az AI-ra is alkalmazhatjuk. Nem azt kell előre eldöntenünk, mire lesz mindig képtelen, hanem azt kell vizsgálnunk, hogy az adott fejlesztés mit tett lehetővé, és milyen ellenőrzés mellett használható az eredménye.

Digitális transzformáció: az egyéni segítségtől a közös munkafolyamatig

Szabó professzor a digitális transzformáció eredményét a numerikus szimulációban a matematikai modellek előrejelző képességének javulásához kapcsolja [1: 68-72. o.]. Az anyagvizsgálatban ehhez az adatfeldolgozás és a szakértői munka összekapcsolásának kérdése társul. Egy jól működő felismerő algoritmus önmagában még nem mondja meg, hogyan kerül az eredménye a vizsgálati értékelésbe, milyen további információkkal kell összekapcsolni, és ki milyen feltételekkel használhatja fel. A digitális transzformáció ezért nem egyszerűen egyes munkalépések digitalizálását jelenti: a teljes mérnöki munkafolyamat átalakulását is magával hozhatja.

Erre az automatizálástechnikában már konkrét példát ad a Siemens 2026 áprilisában bemutatott Eigen Engineering Agent rendszere. Az AI-ügynök a Siemens TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) mérnöki szoftverkörnyezetéhez kapcsolódik. A TIA Portal az ipari automatizálási rendszerek tervezésének integrált környezete: egy projekten belül kezelhetők például a programozható logikai vezérlők (PLC-k), a gép és az ember közötti kezelői felületek (HMI-k), a hajtások, valamint az ezekhez kapcsolódó konfigurációs, programozási, tesztelési és diagnosztikai feladatok [11].

Az Eigen Engineering Agent jelentősége abban áll, hogy ebben a környezetben már nem pusztán szöveges javaslatokat ad. A Siemens leírása szerint értelmezi az adott TIA Portal-projekt adatszerkezeteit, funkcióblokkjait, paramétereit és a komponensek közötti kapcsolatokat. Ezek alapján vezérlőprogramot hozhat létre vagy módosíthat, HMI-funkciókat alakíthat ki, illetve eszközök konfigurálásában vehet részt. Az összetettebb feladatot lépésekre bontja, végrehajtja, majd az eredményt a projekt követelményeihez viszonyítva ellenőrzi és szükség esetén módosítja, mielőtt azt a mérnök felülvizsgálja [11].

A 2026 júniusában bemutatott további képességek ezt a működésmódot a munkafolyamat korábbi szakaszaira is kiterjesztik. Az egyik fejlesztés elektromos tervezési adatokból képes eszközöket és kapcsolatokat azonosítani, azokat a TIA Portal-projektbe átvinni, valamint a tényleges hardverfelépítéshez kapcsolódó PLC-változókat létrehozni. Egy másik funkció természetes nyelven megadott gépleírásból a Siemens Automation Framework szerinti projektszerkezetet állít elő [12]. Így az elektromos tervezés, a hardverkonfiguráció és a vezérlőszoftver kialakítása közötti, korábban részben manuális adatátadás egy része is AI-val támogatott munkafolyamatba kerül.

A példa jelentősége ezért túlmutat azon, hogy az AI gyorsabban képes programkódot előállítani. Ugyanazon mérnöki projekt több eleméhez és több egymásra épülő munkafázisához fér hozzá, ezért az egyes részfeladatok támogatásától a mérnöki folyamat részbeni végrehajtása és összehangolása felé mozdul el. A Siemens dokumentált képességei jelenleg az ipari automatizálási projektek meghatározott feladataira vonatkoznak; ebből nem következik, hogy az AI önállóan kezelné egy összetett mérnöki rendszer teljes életciklusát. A tendencia azonban jól látható.

Ha ez a működésmód más mérnöki szakterületeken is elterjed, az nem egyszerűen gyorsabbá teheti a jelenlegi munkát, hanem magát a munkamegosztást is átalakíthatja. A mérnök szerepe a részlépések közvetlen elvégzése mellett egyre inkább a célok, a korlátok és az elfogadási feltételek meghatározására, a létrehozott megoldások összevetésére és a teljes folyamat szakmai felügyeletére helyeződhet át. Ez közvetlenül kapcsolódik Szabó kérdésfelvetéséhez is: *milyen feladatot bízhatunk egy digitális eszközre, és milyen alapon fogadhatjuk el az eredményét?*

Korábbi, munkatársainkkal közösen végzett radiográfiai fejlesztésünkben hegesztett kötések röntgenfelvételeinek kiértékelését és az eredmények digitális rögzítését kellett összekapcsolnunk. Az elkészült alkalmazás az eltérések gépi felismerését, osztályozását és geometriai jellemzését szabványkövetelmények szerinti értékeléssel kapcsolta össze. A szakértő javíthatta a képen megjelenő eltérések jelöléseit, majd jóváhagyhatta az eredményt; a gépi és a módosított elemzés külön visszakereshető maradt a rendszerben. A korrigált képek a további tanításhoz is felhasználhatók voltak. E munkát az Anyagvizsgálók Lapja 2023/IV. számában ismertettük [3].

Számunkra a munka egyik tanulsága, hogy az eltérés felismerése, geometriai jellemzése és megengedhetőségének értékelése három különböző feladat. A képfelismerő modell, az alkalmazásra választott követelmény és a szakértői értékelés eltérő szerepet tölt be. Ezért az automatizálás eredményét sem elegendő csupán a felismerés alapján megítélni: a teljes értékelési folyamat használhatósága számít. A kérdés itt is az, amit Szabó professzor a szimuláció felől tesz fel: *mit állítunk az eredményről és milyen alapon támaszkodunk rá?*

Szabó professzor intelligens szimulációs alkalmazásokról szóló fejezete ehhez kínál mérnöki előképet. A Sim App szakértők által kialakított, ismétlődő számítási feladatokat egységesítő alkalmazás, amely a modellt és a hozzá tartozó eljárást más felhasználók számára is hozzáférhetővé teszi [1: 131-134. o.]. Egy ilyen alkalmazásnak önmagában nem kell mesterséges intelligenciát használnia. Az AI megjelenésével azonban új lehetőség nyílik: egy eszközhasználó AI-rendszer a feladat egyes részeit meglévő, ellenőrzött mérnöki alkalmazásokhoz irányíthatja. Ebben a modellben nem szükséges minden szakmai szabályt és fizikai összefüggést magába az AI-modellbe „beletanítani”; az AI a megfelelő mérnöki eszközt használhatja a feladathoz.

Saját munkánkban hasonló kérdéssel találkoztunk a műszaki dokumentumok feldolgozásakor. A feladat az volt, hogy régi berendezésrajzokon és adatlapokon szereplő műszaki információkat a kézi újragépelés helyett kereshető, szerkeszthető és az adott berendezéshez rendelhető adatokká alakítsuk. A kidolgozott eljárás felismeri a táblázatok szerkezetét, elkülöníti a sorokat és oszlopokat, szövegfelismeréssel kiolvassa a cellák tartalmát, majd az eredményt szerkeszthető adattáblába rendezi. Így például a tervezési nyomás, a hőmérséklet, az anyagmegnevezés és más berendezésadatok is strukturált formába kerülhetnek [6]. Az alábbi ábra egy műszaki adatlap részletén mutatja a táblázatszerkezet felismerését és az abból kinyert adatokat.

a) A táblázatszerkezet felismerése

DESIGN DATA/ MŰSZAKI ADATOK			
		Shell Side / Köpenytér	Tube Side / Csőtér
Design Pressure (guage) / Tervezési nyomás	barg	40	28
Design Temperature / Tervezési hőmérséklet	°C	−20/+150	−20/+150
Test Pressure (guage) / Próbanyomás	barg	62.5 2	43.75 2
Steam out condition on shell side		6.8barg/170°C	
Corrosion Allowance / Korróziós pótlék	mm	1	3
Joint Efficiency / Hegesztési tényező		0.85	0.85
Density of Liquid / Közeg sűrűsége	kg/m3	618	996

b) A szövegfelismerés után kapott adattábla

DESIGN DATA/MUSZAKIADATOK		
Shell Side/Kopenytér		Tube Side/Csoter
Design Pressure(guage) /Tervezési nyomas barg	40	28
Design Temperature / Tervezési homérséklet °C	-20/+150	-20/+150
Test Pressure (guage)/Probanyomas barg	62.5 2	43.75 2
Steam out condition on shell side	6.8barg/170°C	
Corrosion Allovance /Korroziós pótlék mm	1	3
Joint Efficiency/Hegesztesi tenyezo	0.85	0.85
Density of Liquid / Kozeg sürüsége kg/m3	618	996

Műszaki adatlap feldolgozása: a) a sorok és oszlopok felismerése az eredeti rajzon; b) a szövegfelismerés után kapott, még ellenőrzendő adattábla [6]

A kiolvasott adatok a felületen ellenőrizhetők, javíthatók és kiegészíthetők, a módosítások pedig visszakövethetők. Az ábrán például a próbanyomás mellett szereplő, háromszögbe írt szám a szövegfelismerés eredményében a nyomásérték mellé került. A karakterek felismerése tehát még nem azonos a műszaki tartalom megértésével: el kell dönteni, melyik szám a mért vagy előírt fizikai mennyiség, mi a mértékegysége, és melyik csupán rajzi vagy hivatkozási jelölés. Ezért az eredeti forrást, a műszaki jelentést és az ellenőrzés lehetőségét is meg kell őrizni.

Egy következő lépésben már elképzelhető olyan AI-alapú asszisztens vagy ügynök, amely nemcsak adatot olvas ki a dokumentumból, hanem megkeresi a feladathoz szükséges további információt, kiválasztja a megfelelő értékelő eljárást vagy meghív egy erre kialakított mérnöki alkalmazást. A cél ebben az esetben sem az, hogy a nyelvi modell maga találja ki a műszaki szabályt, hanem hogy ellenőrzött adatokhoz és ellenőrzött szakmai eszközökhöz kapcsolja össze a munkafolyamat megfelelő lépéseit.

A digitális transzformáció eredményességét ezért nem kizárólag egy algoritmus pontosságával vagy egy részfeladat végrehajtási idejével érdemes mérni. Az átfutási idő, az együttműködés, a szakértői tudás hozzáférhetősége, az adatok visszakereshetősége és az ésszerű idő alatt megvizsgálható megoldásváltozatok száma egyaránt fontos lehet. A nyereséget a teljes folyamaton kell értékelni: egy részfeladat gyorsabb végrehajtása akkor jelent valódi előnyt, ha közben nem növeli meg aránytalanul az adat-előkészítés, az utólagos javítás vagy az ellenőrzés terhét.

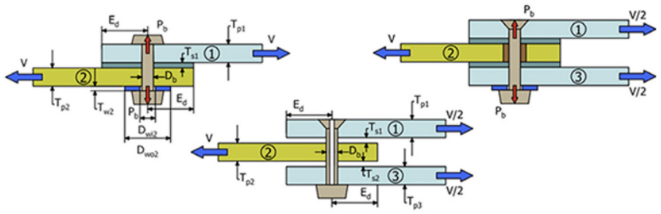
Ebben az értelemben az AI egyedi segédeszközből fokozatosan a mérnöki munkafolyamat több lépését összekapcsoló eszközzé válhat. Éppen ezért Szabó digitális transzformációval kapcsolatos alapkérdése ma talán még fontosabb, mint a könyv megírásakor: nem önmagában az a kérdés, hogy mit tud az új technológia, hanem hogy hogyan építjük be úgy a mérnöki folyamatba, hogy az eredmények szakmai alapja, ellenőrizhetősége és a felelősség helye közben ne váljon bizonytalanná.

Digitális ikrek: a vizsgálati előzményektől az állapotmodell felé

Szabó a digitális ikret a mérnöki szempontból fontos mennyiségek előrejelzésére szolgáló matematikai modellek együttese felől értelmezi, és az életciklus során gyűjtött, berendezésspecifikus adatokkal történő frissítést is tárgyalja [1: 64-67. o.]. Ebből az állapotfelügyelet számára az a kérdés következik, hogyan kapcsolható a konkrét berendezés mérési története egy olyan modellhez, amely a további viselkedéséről is használható információt ad.

A könyv egyetlen kötőelemmel összefogott lemezek számítási modelljét hozza fel komponensszintű digitális iker példájaként, amleyet az alábbi ábra szemléltet. A különböző kötéskialakításokhoz megadott geometria, anyagjellemzők és terhelések meghatározott számítási feladatot írnak le [1: 65–67. o.]. A berendezés egészének részletes virtuális másolata helyett itt egy körülhatárolt szerkezeti kapcsolat viselkedését vizsgáljuk.

A vegyipari környezetre fejlesztett állapotértékelő platformunkban a szétszórtan tárolt rajzokat, műszaki adatokat



Kötőelemes lemezkapcsolatok mint a komponensszintű digitális iker példái. A geometria, az anyagjellemzők és a terhelések a modell bemenő adatai [1]

és vizsgálati jelentéseket közös berendezésnyilvántartásba kapcsoltuk össze. A feladat az volt, hogy egy készülék értékeléséhez ne kelljen minden alkalommal külön dokumentumokból újra összeállítani annak előzményeit. Az adatvezérelt karbantartástámogatás megközelítését a SNETP Forum 2026 poszterén is bemutattuk [7]. A felületen az alapadatok mellett a rajzok, a falvastagság-vizsgálatok és az időbeli változások is elérhetők. Ez fontos alap egy későbbi digitális iker számára, de a nyilvántartás és a történeti megjelenítés önmagában még nem előrejelző modell. A továbblépéshez meg kell határozni, milyen károsodási folyamatot írunk le, mely mennyiséget becsüljük, és hogyan vizsgáljuk az előrejelzés alkalmazhatóságát.

A gyors számítási visszacsatolás lehetőségét szemlélteti a Hossain és munkatársai által bemutatott tanított közelítés: egy nyomottvizes reaktor melegági csőkönyökének áramlási jellemzőit számításos áramlástani adatokból tanuló neurális operátorral becsülték [8]. Az ilyen közelítés több üzemállapot gyors vizsgálatát teheti lehetővé. Szabó professzor megkülönböztetése itt is lényeges: a numerikus referencia eredményeinek sikeres közelítése és a fizikai berendezés viselkedésének igazolt előrejelzése nem ugyanaz.

A nehezen hozzáférhető csőhálózati szakaszok felügyeletére kidolgozott fejlesztési koncepciónkban a szenzoros állapotkövetést célzott roncsolásmentes vizsgálattal kapcsolnánk össze [6]. Az állapotváltozásra utaló jelzés alapján részletes helyi vizsgálat következne, majd annak eredményét szerkezetintegritási értékelésben használnánk fel. A különböző lépések más kérdést válaszolnak meg: a jelzés változását észlelik, a helyi eltérést jellemzik, illetve annak következményét értékelik. Ezen az úton a felügyelet és a célzott vizsgálat kiegészítheti egymást; az időszakos vizsgálatok általános kiváltása ebből nem következik.

A digitális iker aktualitását ezért nem a berendezés mind tökéletesebb másolatában látjuk. A fontos lehetőség az, hogy a modell és az új vizsgálati tapasztalat a berendezés élettartama során ismételten összevethető. Az eltérés indokolhatja a modell felülvizsgálatát, de újabb mérést vagy az üzemeltetési feltételek tisztázását is. A könyv nyílt végű modellfejlesztési szemlélete itt kézzelfogható feladatot jelent: a korrekció után is meg kell vizsgálni, mire alapozható a következő előrejelzés [1: 41-45. és 64-67. o.].

Explainable AI: a magyarázat mire elég?

Amikor az AI már nemcsak adatot dolgoz fel, hanem értékel, javaslatot tesz vagy egy mérnöki munkafolyamat valamely lépését maga hajtja végre, természetes kérdéssé válik: miért éppen ezt az eredményt kaptuk? Ehhez kapcsolódik a magyarázható mesterséges intelligencia, az explainable artificial intelligence (XAI) fogalma. Szabó Barna az XAI kérdését a numerikus szimuláció megbízhatóságával és auditálhatóságával kapcsolja össze [1: 58-63. o.]. Érvelése szerint az AI integrációja nem teszi kevésbé fontossá a matematikai modell, a bemenő adatok és az alkalmazási korlátok pontos ismeretét, hanem éppen ellenkezőleg: még inkább kikényszeríti azok tisztázását. A könyv ezt három összekapcsolandó elemmel szemlélteti:



Az XAI-val összekapcsolt numerikus szimuláció három eleme Szabó értelmezésében: ellenőrzött adatok, tudományosan megalapozott algoritmusok és validált előrejelzések [1]

ellenőrzött adatokkal, tudományosan megalapozott algoritmusokkal és validált előrejelzésekkel.

A magyarázhatóság jelentésének pontosításához hasznos támpontot ad az amerikai National Institute of Standards and Technology (NIST) – az Egyesült Államok szabványosítással, méréstudománnyal és technológiai módszertannal foglalkozó szövetségi intézete – 2021-ben megjelent Four Principles of Explainable Artificial Intelligence című szakmai jelentése [9]. A dokumentum nem szabvány, hanem olyan módszertani keret, amely négy alapelv segítségével fogalmazza meg, mit várhatunk egy magyarázható AI-rendszertől. A rendszernek indokot vagy alátámasztást kell adnia az eredményéhez; a magyarázatnak az adott felhasználó számára érthetőnek kell lennie; hűen kell tükröznie azt a folyamatot, ahogyan a rendszer az eredményre jutott; továbbá a rendszernek figyelembe kell vennie saját tudás- és alkalmazási korlátait.

Ez utóbbi megkülönböztetés mérnöki szempontból különösen fontos. A NIST jelentése kifejezetten elválasztja egymástól a magyarázat hűségét (explanation accuracy) és a döntés helyességét (decision accuracy). Egy magyarázat pontosan leírhatja, hogyan jutott el az algoritmus egy eredményhez, miközben maga az eredmény ettől még lehet hibás. Ugyanígy egy helyesnek bizonyuló eredményhez adott, utólag létrehozott magyarázat sem feltétlenül tükrözi megfelelően a modell tényleges működését.

Ez a különbség a saját digitalizációs feladatainkban is jól érzékelhető. A műszaki dokumentumok feldolgozásakor például megőrizhető az eredeti rajz vagy adatlap, valamint nyomon követhető, hogy egy automatikusan kinyert adatot mikor és ki módosított. Ez fontos visszakövethetőséget biztosít: egy értékről ellenőrizhető, hogy honnan származik, és összevethető az eredeti dokumentummal. Mindez azonban még nem magyarázza meg, hogy a tanított felismerési modell miért éppen azt a karaktert, számot vagy táblázati struktúrát ismerte fel.

A kétféle információ tehát más célt szolgál. A visszakövethetőség azt mutatja meg, honnan származik az eredmény és mi történt vele a feldolgozás során; a magyarázhatóság pedig azt próbálja feltárni, milyen tényezők alapján jutott a modell az adott eredményhez. Egy mérnöki rendszerben mindkettő fontos lehet, de egyik sem helyettesíti a másikat.

Ugyanezért a magyarázhatóság, a verifikáció és a validáció sem azonos fogalmak. A magyarázhatóság arra kérdez rá, hogy milyen értelmezhető és a rendszer működését megfelelően tükröző információ adható az AI döntéséről. A numerikus megoldás verifikációja azt vizsgálja, hogy a matematikai probléma közelítő megoldását megfelelő pontossággal számítottuk-e ki. A validáció pedig arra vonatkozik, hogy a matematikai modell a meghatározott felhasználási cél szempontjából megfelelően reprezentálja-e a vizsgált fizikai jelenséget. A bizonytalanság számszerűsítése ehhez azt teszi hozzá, hogy

mennyire bizonytalan a döntéshez felhasznált előrejelzés [1: 52-63. o.] [9, 10]. A NASA modellezési és szimulációs szabványa szintén elkülönített, életciklusun át kezelt követelményként foglalkozik a modellek hitelességének, verifikációjának, validációjának és bizonytalanságának kérdéseivel.

Ebből gyakorlati szempontból az következik, hogy nem minden magyarázat hasznos pusztán attól, hogy létezik. Egy szakértő számára annak van értéke, ha a kapott információ segít eldönteni, mely bemenő adatot, feltételezést vagy modellkomponenst érdemes felülvizsgálni, milyen körülmények között válhat bizonytalanná az eredmény, illetve szükség van-e további mérésre vagy vizsgálatra. Más típusú magyarázat lehet megfelelő egy fejlesztőnek, egy anyagvizsgálónak, egy üzemeltetőnek vagy egy jóváhagyásért felelős mérnöknek; maga a NIST megközelítése is hangsúlyozza, hogy a magyarázatnak az adott felhasználó számára kell értelmezhetőnek lennie.

A szakértői jóváhagyás ezért csak akkor jelent valódi kontrollt, ha a szakember rendelkezik azokkal az információkkal, amelyek alapján az AI eredményét érdemben meg is tudja kérdőjelezni. Egy „elfogadom” gomb önmagában még nem emberi felügyelet. Tudni kell, milyen adatokra támaszkodott a rendszer, milyen feltételezések és korlátok mellett működik, mekkora bizonytalanság kapcsolódik az eredményhez, és mely esetekben kell más módszerhez vagy további vizsgálathoz fordulni.

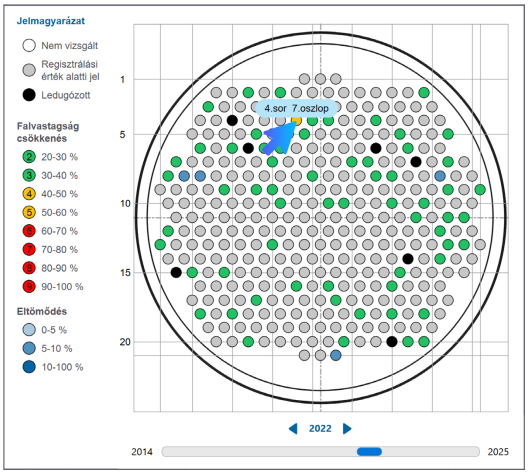
Ebben az értelemben az XAI jelentősége a mérnöki gyakorlat számára nem abban áll, hogy az AI minden döntéséhez közérthető történetet gyárt. A fontosabb cél az, hogy az AI-val támogatott mérnöki folyamatban látható maradjon, mire alapozzuk az eredményt, hol vannak annak alkalmazási korlátai, és milyen információ alapján vállalhat érte felelősséget a szakember. Ez a kérdés közvetlenül visszavezet Szabó könyvének egyik alapgondolatához: nem elegendő eredményt előállítani – azt is igazolni kell, hogy milyen alapon használjuk fel.

A korábbi vizsgálati adatok újrafelhasználása

Az anyagvizsgálat régóta az anyagmodellek kialakításának és paraméter-azonosításának alapja. A kísérleti anyagjellemzés megelőzi és megalapozza a modell mérnöki alkalmazását; az újabb vizsgálatok a modell pontosítását és alkalmazási határainak feltárását is szolgálják [1: 41-45. o.]. Az AI-val támogatott feldolgozás ennek a már meglévő kapcsolatnak az információs hátterét bővítheti. Saját munkáinkban a kérdés az, hogyan használhatók fel együtt a különböző időpontokban, eltérő formában rögzített mérési és műszaki információk.

A karbantartástámogató fejlesztés egyik konkrét feladata a hőcserélők csőkötegein végzett vizsgálatok csövenkénti történetének összeállítása volt. Az adatokat különböző vizsgálók, eltérő években és eljárásokkal készült jelentéseiből kellett összerendeznünk. Erre egy időpontok között léptethető csőkötegtérképet és a kiválasztott cső adatait megjelenítő értékelő modult alakítottunk ki. A felhasználó az adott csőhöz visszakeresheti az évet, a közölt falvastagságcsökkenést, a vizsgálót és az alkalmazott technikát. Az alábbi ábra a térképes megjelenítést mutatja: a falvastagságcsökkenés és az eltömődés kategóriái mellett külön jelölést kapnak a nem vizsgált, a regisztrálási érték alatti jelet adó és a ledugózott csövek. Így az állapotváltozás mellett a vizsgálati lefedettség is áttekinthető.

A közös színskála áttekinthetőbbé teszi az adatokat, de nem helyettesíti az eltérő vizsgálati eljárásokból származó eredmények szakmai összevetését. Az értékeléshez meg



Hőcserélő-csőköteg vizsgálati térképe és időcsúszkája. A színek és jelölések a vizsgálati eredményeket, illetve azok hiányát különböztetik meg; a kiválasztott csőhöz a vizsgálati előzmények is visszakereshetők [6]

kell tartani az eredeti módszert, a vonatkoztatási alapot és a rendelkezésre álló bizonytalansági információt is. Ahol csak kategória vagy tartomány áll rendelkezésre, abból a feldolgozás nem hoz létre pontosabb mérést. Ez azért fontos, mert a megjelenítés egységesítése és a mérési eredmények összehasonlíthatóságának igazolása két külön feladat.

A bemutatott értékelő modul előre meghatározott, az üzemi karbantartási gyakorlathoz igazítható szabályokból állít elő ajánlásokat [6]. Ez szabályalapú döntéstámogatás; az AI-alapú élettartam-előrejelzés külön modellfejlesztést és igazolást igényel. A tapasztalat a könyv egyik alapgondolatát erősíti: előbb a felhasználás célját és az ahhoz szükséges információt kell meghatározni, s csak azután az alkalmazásra választott eszközt. Egy adatplatform értéke nem attól függ, mennyi AI-t építünk bele, hanem attól, milyen mérnöki kérdés megválaszolását teszi lehetővé.

A gyakorlati nyereség elsőként abban vizsgálható, hogy a mérnök mennyi munkával tudja összeállítani egy cső vagy berendezés vizsgálati történetét, és mennyi idő marad az eltérések értelmezésére. Külön érdemes mérni az adatkeresés, az összerendelés, az ellenőrzés és a javítás munkaráfordítását. Az AI haszna itt nem az anyagvizsgálati következtetés lecserélése, hanem az értelmezéshez szükséges információ előkészítésének támogatása.

A modellek gondozása szervezeti feladat

A könyv a simulation governance, vagyis a szimulációs irányítás fogalmával foglalja össze a vezetés feladatát a számított információ megbízhatóságának biztosításában.

A modellfejlesztést nyílt végű tevékenységnek tekinti: új adatok és új módszerek indokolhatják a korábbi megoldás felülvizsgálatát [1: 15-18. és 36-45. o.]. Az AI-val támogatott folyamatok ezt a kérdést tovább szélesítik. Már nem csak egy számítási modell, hanem adatbázisok, tanított modellek és egymásra épülő szoftverlépések kapcsolatát kell gondozni.

Egy tanított modell új változatánál is a felhasználási feladathoz kell visszatérni. A bővebb tanítóanyag vagy az új algoritmus nem teszi fölöslegessé annak vizsgálatát, hogyan változik a teljesítmény a fontos esetcsoportokon. A korábbi értékelések megismételhetőségéhez a használt modell-, adat- és eljárásváltozatot is azonosítani kell. A modell gondozása így nem egyszeri informatikai bevezetés, hanem a mérnöki módszer fenntartásának része.

A modellek életciklusára kiterjedő fejlesztést, használatot és értékelést a NASA-STD-7009B módszertani kerete is nevesíti [10]. A könyvből a saját gyakorlatunk számára azt emeljük ki, hogy a feladatot és az elvárt alátámasztást nem helyettesíti egy szoftver előírása. A bevezetés céljai között a hasznosulást is érdemes megfogalmazni: több megoldásváltozat értékelését, a gyengén ismert paraméterek tisztázását vagy az ismétlődő adat-előkészítés csökkentését. Az előrejelzési pontosság és a teljes munkaráfordítás együtt mutatja meg, mit nyertünk az új megoldással.

Az együttműködés egyik feltétele a szakterületek közötti közös nyelv. Egy „validált” adatbázis, egy ellenőrzött szoftver és egy adott célra validált modell nem ugyanaz az állítás. Ha az anyagvizsgáló, az adatkutató és az üzemeltető ezt eltérően érti, egy technikailag összekapcsolt rendszerben is elveszhet a lényeges információ. A könyv terminológiai figyelmeztetése így nagyon gyakorlati kérdéssé válik: az átadott eredmény mellett annak jelentése és alkalmazási korlátja is közös legyen [1: 9-12. o.].

Miért aktuális tehát ez a könyv?

Szabó Barna Bridging the Gap írása azért aktuális, mert a könyvben vizsgált különbség az eszköz működése és az eredmény indokolt felhasználása között az AI-val támogatott mérnöki munkában is újra megjelenik. A képfelismerés, a dokumentumfeldolgozás, a javasolt anyagszerkezet és a gyors előrejelzés más-más feladat, de mindegyiknél meg kell mutatni, hogyan kapcsolódik a gépi eredmény a vizsgált fizikai problémához. A korábbi radiográfiai munkánk és a jelenlegi állapotértékelési fejlesztések azért fontosak számunkra, mert ezt a kérdést saját feladatainkon keresztül is meg tudjuk fogalmazni.

Szabó professzor könyvének mai értékét abban látjuk, hogy nem az algoritmus megválasztásával kezdi az érvelést. Azt kérdezi, mit akarunk megtudni, milyen feltételezésekkel dolgozunk, és milyen alapunk van az eredmény felhasználására. Ebből kiindulva az AI lehetőségeit sem csak gyorsításként vagy kockázatként érdemes szemlélni. Az érdemi előrelépés az lehet, ha több hasznos kérdést tudunk feltenni, több megoldást tudunk megvizsgálni, és az új tapasztalatból következetesebben tudunk tanulni.

A mérés, a modellalkotás és a mérnöki ítélet eddig is összetartozott. Most annak a lehetősége nyílik meg, hogy a közöttük lévő információátadás és a megoldáskeresés nagyobb része váljon automatizálttá. Az AI így egyedi segédeszközből a mérnöki munkafolyamat több lépését összekapcsoló környezetté válhat. Ez a munkaszervezést és a mérnöki tudás alkalmazásának módját is átformálhatja. A feladatunk az, hogy ebben az új munkamegosztásban is látható maradjon, mit tudunk, mit becsülünk, és mit kell még vizsgálnunk. Erre a változásra ad a könyv ma is használható kiindulópontot.

A következő részben innen folytatjuk a „Mit jelent mérnöknek lenni?” kérdésével: hogyan alakul a mérnök feladata és felelőssége ebben az új munkamegosztásban?

Dudra Judit, *PhD, vezető mérnök*
Szávai Szabolcs, *PhD, divízió vezető*
AEMI Atomenergia Mérnökiroda Kft., Mérnöki Divízió

Felhasznált irodalom

[1] Szabó Barna: Bridging the Gap: Advancing Finite Element Analysis in Numerical Simulation. PaperTrue Ltd., 2025. ISBN 979-8-9934924-0-7.
[2] Dudra Judit, Szávai Szabolcs: Könyvismertetés: Dr. Szabó Barna: Bridging the Gap. Anyagvizsgálók Lapja, 2025/IV. lapszám., 37-38.
[3] Dudra Judit, Zsíros Zsombor, Margitai Péter, Pataki Márton, Szávai Szabolcs, Matók Viktor, Balogh Csilla, Viczena Julianna, Béres Bence: Mesterséges Intelligencia alkalmazása a képalkotó vizsgálatok értékelésében. Anyagvizsgálók Lapja, 2023/4. lapszám, 23-28. MTMT: 36438300.
[4] Zeni C., Pinsler R., Zünger D. és mtsai.: A generative model for inorganic materials design. Nature, 639, 624-632, 2025. DOI: 10.1038/s41586-025-08628-5.
[5] Hufnagel T. C., Addepalli P., Bhattacharjee A. és mtsai.: AIMD-L: An automated laboratory for high-throughput characterization of structural materials for extreme environments. Preprint, arXiv:2603.06835v1, 2026. március 6. DOI: 10.48550/arXiv.2603.06835.
[6] Szávai Szabolcs: Újdonságok a roncsolásmentes anyagvizsgálat területén. In: 45. Balatoni Ankét konferenciakiadvány. Siófok, 2025. november 27-29.
[7] Szávai Szabolcs, Dudra Judit: Data driven support of maintenance activities (poster presentation). SNETP Forum 2026, Madrid, Spain, 25-27 March 2026.
[8] Hossain R., Ahmed F., Kobayahi K., Koric S., Abueidda D., Alam S. B.: Virtual sensing-enabled digital twin framework for real-time monitoring of nuclear systems leveraging deep neural operators. npj Materials Degradation, 9, 21, 2025. DOI: 10.1038/s41529-025-00557-y.
[9] Phillips P. J., Hahn C. A., Fontana P. C., Yates A. N., Greene K. K., Broniatowski D. A., Przybocki M. A.: Four Principles of Explainable Artificial Intelligence. NISTIR 8312, 2021. DOI: 10.6028/NIST.IR.8312.
[10] NASA: Standard for Models and Simulations. NASA-STD-7009B, 2024. március 5.
[11] SIEMENS AG: Siemens launches the Eigen Engineering Agent, bringing purpose-built AI to industrial automation engineering. Sajtóközlemény, 2026. április 20.
[12] SIEMENS AG: Siemens takes AI for the physical world to the next level with two new Eigen Engineering Agent capabilities. Sajtóközlemény, 2026. június 17.

A régi Fegyvergyár képei I.

Pictures of the old Weapon Factory I.

Bevezetés

Az egykor volt Fegyver és Gépgyár Rt. – a későbbi Fegyver és Gázkészülékgyár jogelődje, a továbbiakban a közismert, védett márka névvel FÉG – a magyar ipar fontos iparvállalata volt. Fordulatos históriájának jelentős mozzanatait számos alapos szakpublikáció dolgozta fel. A tanulmányok szerzői azonban túlnyomórészt a cég I. világháború utáni időszakával foglalkoztak, és csupán csekély figyelmet szenteltek az ős-FÉG történéseinek [1, 2].

A Magyar Közlekedési és Műszaki Múzeum (MKMM) hatalmas gyűjteményének különösen érdekes csoportja az MMKM TTOKMGY 2026.1.1. leltári számon nyilvántartott, 570 darabból álló fényképegyüttes. A 13,8 x 18 cm … 25 x 32 cm méretű üveglemezeken a FÉG üzemeiben a legkorábbi kezdetektől az 1930-as évekig használt, valamint az ott gyártott gépek, berendezések kiváló minőségű, részletgazdag képei láthatók. A fotók egy része a vállalat szép kivitelű gyártmányismertetőjében is szerepel.

A jelen összeállítás írója ugyan csak néhány évig, felmenőinek több generációja azonban évtizedeken át dolgozott a legendás gyárban. Az egykori „családi céghez” érzelmileg alaposan kötődő szerző remek minapi feladata volt a múzeumi fényképek tárgyainak nevesítése és a gépek, készülékek működésének rövid leírása.

Némely berendezések beazonosításával azonban sem ő, sem a sokat tapasztalt mérnök kollégák-barátok nem boldogultak. A furcsa, régi szerkezetek titkainak feltárására szeretnénk tisztelt Olvasóinkat mozgósítani. Várjuk a most induló ***„Régiségtár – Miféle masina?”*** rovatban bemutatott gépek vélhető céljára és működésére beküldött megfejtéseiket! A jól sikerült magyarázatokat az AVILap soron következő számában közöljük, a legvalószínűbb leírások készítői az MKMM szakmai gyűjteményét gazdagíthatják.

Egy szépséges gyárépület

A Soroksári út egyik oldalán sínek, szemben kerítések futnak a végtelenbe. Mögöttük elvadult fák, bokrok között rozsdás csövek, tartályok, géproncsok hevernek. Az itt-ott még álló düledék épületeket új, rikító tarka, dobozforma raktárak, üzemek követik. A lapos ipari vidék sivárságából hirtelen magasodik fel egy merész vonalvezetésű építmény. Földszintjén és első két emeletén szögletes, a harmadikon félkör forma, legfelül játékos, trapéz alakú ablakok, az ablakok között masszív pillérek állnak. A hatalmas, erőt sugárzó tömböt egy furcsa tornyocska koronázza (csúfítja).

A hajdani FÉG központi üzemcsarnoka a modern magyar ipari építészet első, és az egyik (talán a) legszebb alkotása. (A szerző anno éppenséggel ebben a nagyszerű épületben dolgozott.)

Az emblematikus „négyemeletest” a kor legkiválóbb vasbeton szakértő mérnök párosa, Gut Árpád (1877-1948) és Gergely Jenő (1880–1974) tervezte.

Gut és Gergely nemcsak munka- és üzlettársak, hanem jó barátok is voltak, a fővárosi Falk Miksa utca 24. szám alatt virágzó tervezőirodát vezettek. 1908 és 1920 között, együttes munkálkodásuk eredményeként 173 híd és 654 (!) további vasbeton és acélszerkezetes gyári, ipari létesítmény, víztároló, víztorony, gabonasiló, székház, katonai bázis, továbbá köz- és lakóépület született.

Az 1913-15 között emelt, három hajós fegyvergyári épület alatt kialakított hatalmas pincerendszer kezdetben raktárként, a II. világháború idején, mint légvédelmi óvóhely szolgált. A kisebb repülőbombák ellen hatékony védelmet nyújtottak az épület tetején elhelyezett, fémforgácsból összepréselt tömbök. A családi „oral history” szerint több, a bálákra zuhant bomba visszapattant a magasba, majd az épület előtti betonozott felületre esve darabokra tört.

Az épület óriási ablakait elválasztó függőleges gerendák tartják az egyes szintek különlegesen nagy teherbírású, alul bordázott, kiváló rezgéscsillapítású monolit födémjeit. A nehéz forgácsoló és sajtoló gépek, felületkezelő berendezések telepítését, szintek közti mozgatását az épület mindkét végén lévő lépcsőházak alacsony fokmagasságú, széles lépcsői és a fél emeletenként kialakított hatalmas fordulók könnyítették meg[1].



A FÉG legendás „négyemeletes” üzemépülete

A Fegyver és Gázkészülékgyár a szocializmus időszakában kiemelt hadiüzem volt. Az egész gyártelepet éjjel-nappal fegyveres ipari őrség védte, a fényképezés mindenütt a legszigorúbb tilalom alá esett. Az 1970-es, 80-as években a gyárat sok, üzleti kapcsolatot építő nyugati szakember is felkereste, akiknek a szeme gyakran megakadt a különlegesen szép, látványos épületen. A vállalat igazgatójának, főmérnökének aztán nem kevés fáradságába került az egyenruhások markából a gépeiket kattogtató vendégek kimentése.

Gut Árpád (eredetileg Ármin), a már egyetemi hallgató korában is feltűnően tehetséges és szorgalmas fiatal szakember az I. világháború kezdetén Przemyśl erődítményében katonáskodott. A „nagy háború” borzalmas ostromának leghíresebb emléke a hadműveleteket

[1] A félemeleti illemhelyek politikai jelszavakat kiforgató falfirkái máig emlékezetesek: *„Mienk a gyár, vigyük haza!”* és *„Aki nem lop, az a saját családját lopja meg!”*

végigszenvedő Gyóni Géza (1884-1917) *„Csak egy éjszakára…”* című verse, a háborúellenes irodalom gyakran idézett, különösen megrendítő darabja. Az osztrák-magyar hadvezetés 1915. március 23-án feladta az oroszok által rommá lőtt, kiéheztetett Przemyśl-t. A kapituláció után Gut és Gyóni – sok tízezer bajtársukkal együtt – orosz hadifogolytáborba kerültek. Három év keserves hadifogságból hazatérve Gut mérnök lelkesen vetette magát a munkába, a Magyarországon mindinkább kibontakozó antiszemitizmus elől azonban 1920-ban Erec-Izraelbe vándorolt ki.

Gut új hazáját is jónéhány remek alkotással ajándékozta meg, neve mindmáig a legkiválóbb zsidó építőmérnökként emlékezetes. Életművének egyik különösen érdekes darabja, a szíriai Racca városában, az Eufrátesz fölött emelt híd 1942-ben elképesztő körülmények között készült.

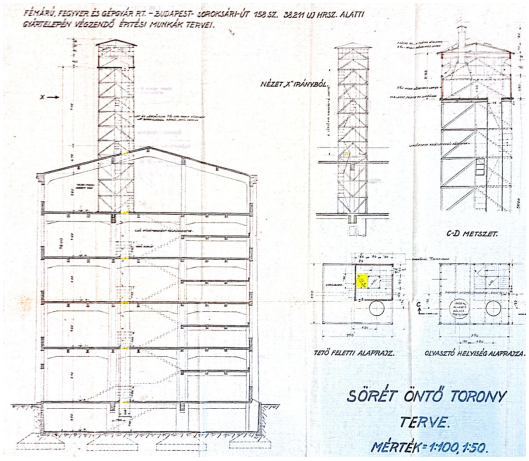
A közel-keleti brit haderő csapatainak és nehéz technikájának biztonságos visszavonulásához nélkülözhetetlen hídon elhelyezett emléktábla szerint *„Itt áll a Gut híd, amelyet építőjéről neveztek el, aki három nap alatt tervezte, négy hónap és huszonkilenc nap alatt építette fel, és a tavaszi áradások idején is folytatta a munkáját. A gerendákhoz az ellenséges tűzben kiégett olajoshordókat használtak, a pilléreket bagdadi és más távoli helyekről származó, használaton kívüli olajkútfúró csövekből állították össze.”*

Gut üzlettársa és jó barátja, Gergely (született Gutmann) Jenő 1920-tól egyedül vezette a tervezőirodát. Itt kapott munkát az első magyar műegyetemi diplomát szerzett hölgy, a később külföldön is nagyon sikeres statikus mérnök, Pécsi Eszter (1899-1975). Gergely a holokausztot Budapesten élte túl, a magyar építész szakma megbecsült alkotójaként emlékezünk rá. Számos nagyszerű műve ma is áll; az egyik legszebb alkotása a város jelképévé lett siófoki víztorony.

A FÉG üzemépületének tetején egy messziről is jól látszó tornyocska áll. Az idomtalan alkotmány bántóan idegen az épület egységes, esztétikus vonalvezetésétől. A szerző sok évtizede töprengett azon, hogy a műveik esztétikus kialakítására mindig oly kényes tervezők vajon miként tehették az otromba tornyot a tetőre? A Fővárosi Levéltárban nemrég megtalált dokumentáció szerint a szedett-vedett objektumhoz az eredeti tervezőknek nem volt közük, az épület befejezése után negyedszázaddal később került csak a helyére.

A kis torony folytatásában a pinceszintig kiépített függőleges akna a sörétgyártás évszázadok óta ismert, ötletes eszközeként szolgált. A torony legfelső szintjéről egy acél rácson át lezúdított megolvasztott ólom szabadon eső cseppjei gömb alakban szilárdulnak meg. (A zuhanó sörétszemek – szép, régi, elfelejtett szóval „ló-göbecsek” – elvileg szabatos formára alakulásának magyarázatát a speciális relativitáselmélet adja meg!)

Az 1960-es évektől a FÉG már nem gyártott lőszert, a vadászsörét készítés is befejeződött. A későbbiekben az öntő torony legfelső szintjéről azonban állandó figyelő szolgálat távcsöve pásztázta Ferencváros, Pesterzsébet, Soroksár, Csepel nem túl izgalmas látványosságait.



A FÉG sörétöntő tornya [4, 8]

Fegyver- és motorgyártás az első világháború előtt

Az Osztrák-Magyar Monarchia első nemzeti fegyvergyára 1887-ben „Magyar Fegyver- és Lőszergyár Rt.” néven alakult. Az osztrák Union Bank finanszírozta cégtől báró komlóskeresztesi Fejérváry Géza (1833-1914) hadügyminiszter azonnal meg is rendelt 180.000 darab 88M Mannlicher puskát. A rendelés előfeltétele ötven darab mintafegyver elkészítése volt: a legyártott és szétszedett Mannlicherek összekevert, majd véletlenszerűen kiválasztott alkatrészeiből hibátlanul működő puskákat kellett összerakni. Az átvételt tovább nehezítette, hogy a magyar gyártmányokra az ausztriai Steyr fegyvergyárban készült puskák alkatrészeivel is teljes cserészabatosságot írtak elő.

A szükséges gépeket, szerszámokat, mérőeszközöket a Ludwig Loewe & Co. berlini cégtől kívánták beszerezni, a német vállalat azonban a brit Greenwood & Batley cégnek engedte át a megrendelés teljesítését. A fegyverek rajzdokumentációit, a gyártásközi és átvételi idomszereket, továbbá az idomszerek szabatosságát vizsgáló ellenidomszereket az osztrák Steyr cégnek kellett – volna – átadni a fiatal magyar vállalatnak.

A próbagyártás hatalmas kudarcba fulladt. A határidő, majd a módosított póthatáridők sorozatos mulasztásait, végül a nehezen legyártott mintafegyverek gyenge minőségét a vállalat vezetése többek között azzal próbálta magyarázni, hogy a gépek, rajzok és idomszerek lassan, sőt gyakran hibásan érkeztek; némelyeket a hazai gyár egyáltalán nem is kapott meg.

A kudarc igazi okait és felelőseit keresve hosszú napokon át folyt a magyar parlamentben a híres-hírhedt „fegyvergyári vita”. A lapok részletesen tudósították a kemény szópárbajokat; a képviselők az ülésteremben széles gesztusokkal mutogatták a szerszámokat, idomszereket és ellenidomszereket. (A tisztelt Háznak akkoriban egyetlen műszaki végzettségű tagja sem volt [3].)

A rendelést a hadügyminiszter felmondta, és a Magyar Fegyver- és Lőszergyár Rt. 1890-ben csődöt jelentett be. A cég felszámolását követően a Külső-Soroksári út 158 alatti telephelyen álló épületeket és eszközöket átvette az 1891-ben megalakult a „Fegyver- és Gépgyár

Részvénytársaság". A gyárat az alapító Magyar Ipari és Kereskedelmi Bank Rt.-től két év múlva a Magyar Általános Hitelbank vásárolta meg. Az újjászervezett fegyvergyár már sikeresen tudta teljesíteni próbagyártást, majd hamarosan sorra érkeztek a Monarchia közös és a magyar hadseregének rendelései.

Az üzemben a Monarchia seregeiben hadrendbe állított, a 88M-ből továbbfejlesztett 95M Mannlicher puskák és a Roth-Steyr pisztolyok mellett általános célú, a kis- és nagyipar igényeit egyaránt kiszolgáló szerszámgépeket és egyéb, precíz megmunkálást igénylő termékeket gyártottak. A vállalatnál különféle lőszerek gyártása is folyt.

Az iparban sehol sem használt, huzagolt fegyvercsövek készítésére különleges célgépek és szerszámok készültek. A rendkívül bonyolult alakú fegyveralkatrészek pontos megmunkálásához és a darabok minősítéséhez egyedi gyártó, mérő és ellenőrző eszközök sokaságára volt szükség. A kovács süllyesztékek, a lemezalakító- és forgácsolószerszámok, a munkadarab befogó készülékek, az ellenőrző idomszerek tervezésében és gyártásában az egész fennállása során a FÉG a hazai ipar legmagasabb műszaki színvonalát képviselte.

1893. április 28-án a kormánypárti és az ellenzéki képviselők ádáz parlamenti vitáikat félretéve közös, víg kiránduláson szemlélték meg a Fegyvergyár látnivalóit. A történtekről színes tudósításban számolt be a Pesti Napló jelenvolt munkatársa [4]. A vendégeket méltó ámulatba ejtették a kovácsműhely dantei poklában dübörgő gőzkalapácsok és a megmunkáló gépeket hajtó transzmissziós rendszer félelmetes, szövevényes szíjrengetegei. A frissen legyártott és – a fegyverenként 92 alkatrészből – összeszerelt puskák próbalövéseit a kiránduláson részt vevő, papi hivatású képviselők adták le. A jókedv egyre fokozódott. Hazafelé kocsizva az urak huncut tréfákat műveltek a Fegyvergyár felügyelő bizottságában elnökként tevékeny Mikszáth Kálmán képviselő, a nagy Palóc négy forintos kalapjával.

1896-ban a Hitelbankot irányító testület a gyár vezérigazgatójának Epperlein Oszkárt (1844-1903) nevezete ki. A rendkívül tapasztalt gépészmérnök korábban a Prágai Hajógyár Rt.-nél, később a Danubius Hajó- és Gépgyár Rt.-nél töltött be műszaki felsővezetői munkaköröket. Epperlein rövid idő alatt hatalmasra fejlesztette a FÉG-et [6].

Rudolf Diesel (1858-1913) kompressziós gyújtású robbanómotorja egy kiemelkedően magas hatásfokú hőerőgép lehetőségét sejtette. A feltaláló eredeti elképzelése szerint üzemanyagként finom porrá őrölt szenet használt a motor. Az alig-alig működőképes szerkezet azonban még igen messze volt az ipari igényeket kielégítő, megbízható gyártmánytól. Diesel nehéz, hosszan elhúzódó kísérletek sorozatával igyekezett találmányát piacképessé tenni. Legfontosabb munkatársa, a használható motor kidolgozásának központi alakja Erney Móric (1877-1948) magyar gépészmérnök volt. Később Erney 1910-1921 között a Ganz és Társa budapesti cégének vezető főmérnökeként irányította a Diesel-motorok hazai fejlesztését és gyártását, majd az „Ikarus Hűtő és Fémáru Rt." műszaki vezetője lett. Ebből a gyárból fejlődött ki később a világhírűvé lett Ikarus Karosszéria és Járműgyár [5].

A XIX. század utolsó éveiben a hazai és a külföldi hadseregek rendelései nem kötötték le a Fegyvergyár hatalmasra bővült gyártási kapacitásait. A magasan képzett szakembergárda és műszaki kultúra hasznosítására Epperlein az akkoriban még igen kockázatos újdonságnak számító Diesel-motor fejlesztésére és gyártására tett javaslatot. A bankárok jó befektetésnek ítélték a kompressziós gyújtású erőgép témáját. 1899-ben a Hitelbank és Weiss Manfréd Fegyver- és Gépgyára megalapították a „Részvénytársaság Diesel-motorok gyártására" nevű vállalatot, és megvásárolta, majd tovább értékesítette a Diesel szabadalmakat a Fegyver- és Gépgyár Rt.-nek, valamint még négy további, hazai cégnek. Siker azonban csupán a Soroksári úton született [2].

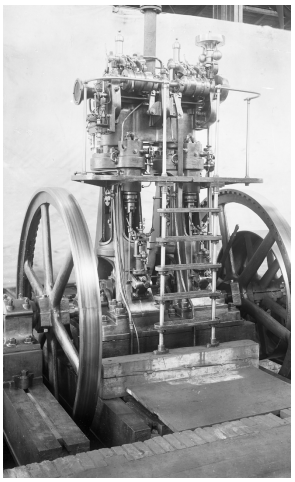
A Fegyvergyárban gyorsan felállított motorfejlesztő iroda, az iroda munkáját támogató kísérleti, majd a motorokat gyártó üzemegységek vezetője Böszörményi Jenő (1872-1957) gépészmérnök lett [7].

Gyorsan bebizonyosodott, hogy a megvásárolt német szabadalmi rajzok nem alkalmasak a gyártás beindítására, a motorokat megannyi kísérlettel, teljesen újra kellett tervezni. A gyártmányrajzok és a technológiák kidolgozása, a szükséges szerszámok, készülékek elkészítése után indulhatott csak meg a termelés. Magyarországon 1912-ig kizárólag a FÉG készített Diesel-motorokat. A találmányáról szóló előadásaiban és könyvében a kiforrott szerkezetet Rudolf Diesel igen elismerőleg „ungarische Bauart" típusként nevesítette.

Apró érdekesség, hogy az elkészült Diesel-motorokat hosszú bejáratásuk és próbaüzemük idejére rákapcsolták a FÉG gépeit meghajtó központi transzmissziós rendszerre.

A legkeresettebbek az 50-60 lóerős Diesel gépek voltak, gyártottak azonban 500 lóerő teljesítményűeket is. Az I. világháború kezdetéig kb. félezer motor készült. A cég nemzetközi kapcsolatai erősödtek, a XIX-XX. század fordulóra a Fegyvergyár a Hitelbank legeredményesebb üzeme lett.

Az ős-FÉG a magyarországi szerszámgép és Diesel motor gyártás meghatározó központja lett. A sorozatban készített, igényes termékeket katalógus alapján lehetett rendelni és megvásárolni. A cég kiváló szakemberei azonban a felhasználók igényei alapján számos egyedi, különleges gépet és motort is terveztek és gyártottak.

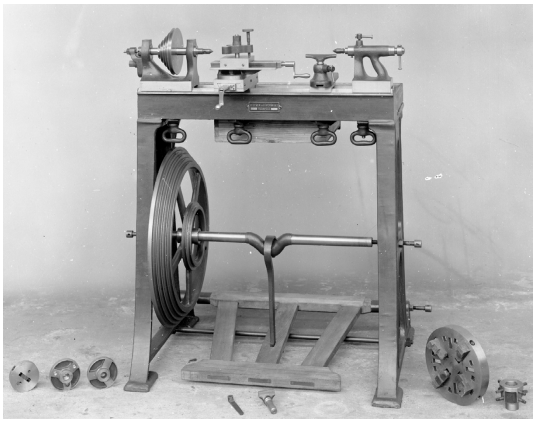


Az ős-FÉG egyik Diesel-motorja

Szabatos szerszámgépek

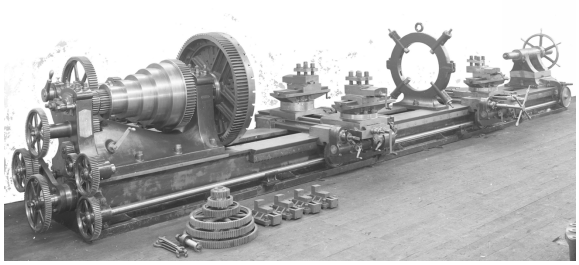
A cég 1906-ban megjelent magyar-német nyelvű [5]

összeállítása 24 különféle szerkezetű, hangsúlyozottan a FÉG *„…legkiválóbb gondoskodással”* gyártott esztergapad típusát ismerteti. A szép kivitelű katalógus a lábpedállal és csak kézi előtolással működtetett esztergákat a legszerényebb kisműhelyeknek ajánlotta.



Lábpedál hajtású FÉG eszterga és tartozékai

A gépi hajtású esztergák (a paddal együtt szállított fedél közlőművön keresztül) lapos szíjjal csatlakoztak az üzem központi meghajtású transzmissziós rendszeréhez. Az olcsóbb, csupán vonóorsóval ellátott esztergapadoknál igényesebb kivitelű, vezérorsós gépeket 34 különféle (140 … 400 mm csúcsmagasság, 1250 … 8000 mm ágyvezeték hossz) méretben lehetett választani. A korabeli legmodernebb esztergákon az előtolás gyors beállítását a megvásárolt szabadalom szerinti Norton-hajtómű biztosította. A prospektus 12 méretben kínálta a Norton-szekrényes gépeket.



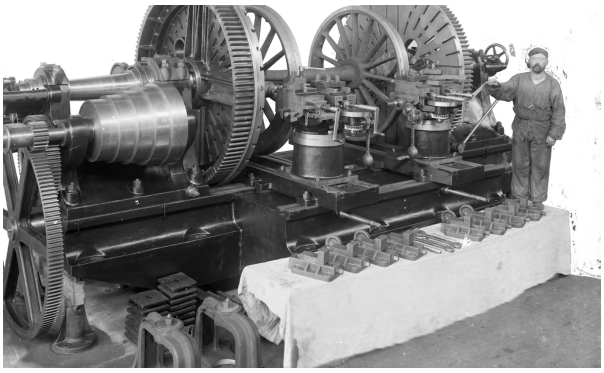
FÉG gyártmányú nehéz esztergapad három késszánnal: elől jól látszik a vonóorsó, a vezérorsó középen, az ágyvezeték alatt van

A nagysorozat és tömeggyártás részére 4 féle nagyságban készültek revolveresztergák.

Igen különös, eredeti konstrukció volt a gőzgépek és belső égésű motorok forgattyús tengely csapjait megmunkáló gyűrűs eszterga, valamint a mozdony és vasúti kocsikerekek pontos futófelületeit kialakító kerékpár eszterga.

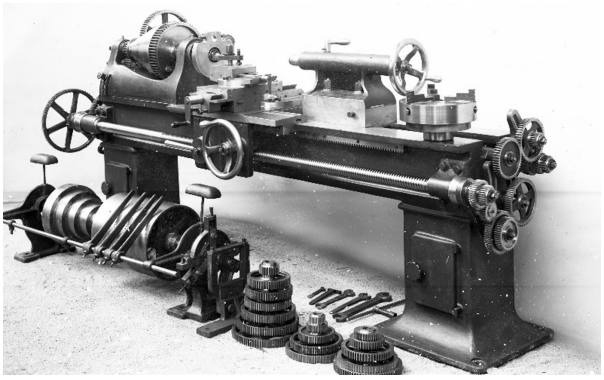
A szerszámgép jegyzék hangsúlyozottan lőszer és fegyver gyártásra használatos, lövedékek, ágyú-töltényhüvelyek, fegyvercsövek megmunkálására kifejlesztett esztergákat is kínált.

A saját felhasználású szerszámok, készülékek és idomszerek gyártására a FÉG igen színvonalas saját üzemegységet hozott létre a gyártelep máig megőrzött, legszebb épületében.



Vasúti kerék-esztergapad

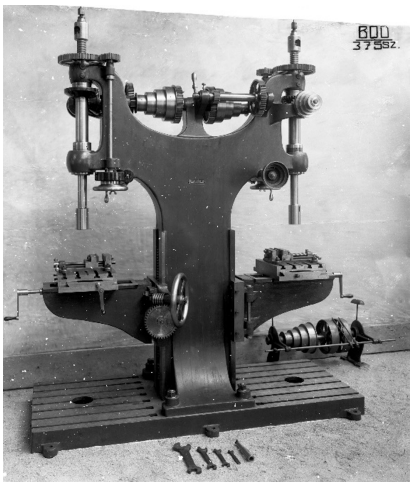
A gyakran igen bonyolult alakú fegyveralkatrészek megmunkálására az alakos tárcsamarók használatosak. A használatban megkopott, a szerszám utánélezésekor változatlan profilú maró a különleges szerkezetű hátra-, régebbi szóhasználattal aláeszterga padon készül. Az 1880-as évektől kezdve a nagy külföldi szerszámgép gyártók a hátraesztergák megannyi konstrukcióját szabadalmaztatták. A FÉG egyik legigényesebb terméke volt a teljesen saját tervezésű, idegen szabadalmi megoldásokat nem tartalmazó hátraeszterga gép.



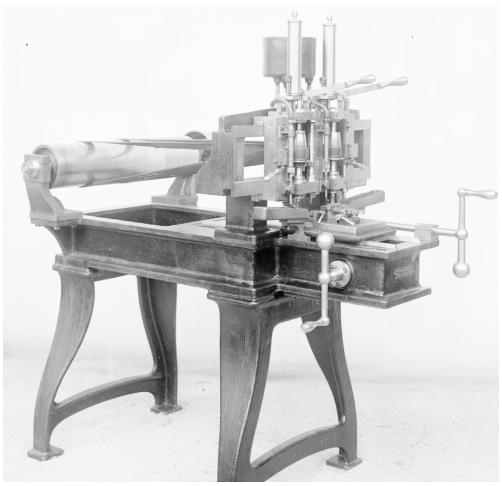
Hátraeszterga pad, a földön balra az ún. fedél közlőmű

A katalógus a marógépek 11 különféle típusát kínálta. A tömegtermelés betanított gépmunkásai részére a munkadarabot csupán kézzel mozgató, egyszerű berendezés volt ajánlott. A sor másik végén a mai szerszámgép felépítésének teljességgel megfelelő, gépi előtolásokkal ellátott egyetemes marógépek és a horizontál fúró-maróművek állnak. Szokatlan konstrukciók a ma már teljességgel ismeretlen, közös öntvénybe épített, egymástól függetlenül használható ikresített gépek. A mesterdarab letapintásával, csupán két irányú, kézi előtolással mozgatott két, négy és hat orsós másoló marógépek a lőfegyverek fából készült agyazatának belső felületeit munkálták meg.

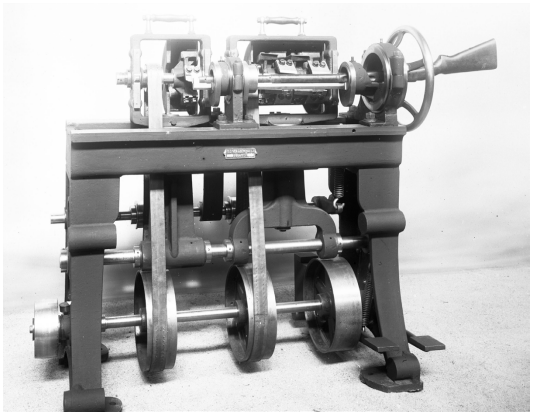
Igen érdekes, ötletes szerkezet volt a fegyver agyazat külső felületeit megmunkáló, modul elemekből összeállított marógép. A kezelő a jobb oldali kézi kerékkel lassan forgatta a befogott munkadarabot. A darabbal együtt forgó alakos vezértárcsa mechanikus tapintója közelítette-távolította a szíjtárcsa fölötti tengelyen billenő maróblokkot. A gépen egyszerre két maróblokk is dolgozhatott. A blokkban forgó betétkések profilja a fegyver agy vagy tusa vonalának megfelelő volt.

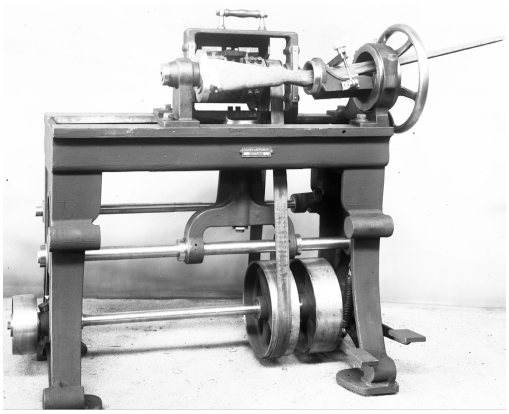


Ikresített marógép



Két orsós másoló marógép





Fegyver agy és tusa megmunkálása moduláris másoló marógépen

A furcsa, régi szerkezetek titkainak feltárására szeretnénk tisztelt Olvasóinkat mozgósítani. Várjuk a ***„Régiségtár – Miféle masina?”*** cím alatt bemutatott gépek vélhető céljára és működésére beküldött megfejtéseiket! A képek az Anyagvizsgálók Lapja oldalán érhetőek el:

https://anyagvizsgaloklapja.hu/hir?news=41

A jól sikerült magyarázatokat az AVILap soron következő számában közöljük, a legvalószínűbb leírások készítői az MKMM szakmai gyűjteményét gazdagíthatják.

A megfejtéseket **2026. december 31-ig** kérjük

a lap szerkesztőségének
(avilap.szerk@gmail.com) és a ***laczik@goliat.eik.bme.hu***

email címre elküldeni. A legjobb magyarázatok készítőit az „Abszolút Bennszülött Gépelem” (ABG) egy-egy példányával jutalmazzuk.



A függőleges síkba állított, majd a vízszintes szimmetria tengelye körül bármely irányba forgatott, zsinórmenetes tóruszon a végtelenségig pörög a hatlapú csavaranya. A minden mérnöki észszerűséget provokatív módon sértő gépelempár (Copyright Laczik B.) utólagos egyesítés, ragasztás nélkül készül!

Laczik Bálint

Források

[1] Temesváry F.: Fejezetek a magyar Fegyvergyár történetéből
I., Folia Historica 5, 139-176 o. Bp. 1977
II., Folia Historica 6, 161-190 o. Bp. 1978
III., Folia Historica 9, 115-189 o. Bp. 1981
IV., Folia Historica 11, 134-202 o. Bp. 1983
V., Folia Historica 12, 123-172 o. Bp. 1984
VI., Folia Historica 13, 169-216 o. Bp. 1987
VII., Folia Historica 14, 155-208 o. Bp. 1989
[2] Balogh A.: Adalékok a Diesel-motor történetéhez, különös tekintettel a magyar mérnök szerepére, Műszaki Tudomány 29, 89-108 o. Bp. 1960
[3] Országgyűlés: a fegyvergyári vita, Budapesti Hírlap 1890 dec. 7
[4] A Pesti Napló tudósítójától: A képviselőház a fegyvergyárban, Pesti Napló 1893 ápr. 29
[5] Balogh A.: Erney Móric, Műszaki Nagyjaink I. kötet, szerk. Szőke Béla, GTE kiadás, Bp. 1967, 289-318 o.
[6] Balogh A., Gombás T.: Epperlein Oszkár, Műszaki Nagyjaink I. kötet, szerk. Szőke Béla, GTE kiadás, Bp. 1967, 319-342 o.
[7] Balogh A.: Böszörményi Jenő, Műszaki Nagyjaink I. kötet, szerk. Szőke Béla, GTE kiadás, Bp. 1967, 343-360 o.
[8] Budapesti Fővárosi Levéltár: Sörétöntő
HU BFL_XV_17_d_329_038211_001
[9] Szabatos Szerszámgépek Jegyzéke, Fegyver-és Gépgyár Rt, Budapest, 1907

MOL Petrolkémia Zrt. Meghibásodási Archívuma – 5. rész

MOL Petrochemicals Ltd. Failure Archive – Part 5

1. Bevezetés

A MOL Petrolkémia Zrt. Meghibásodási Archívum sorozatának jelen fejezetét ismét rendhagyóra terveztük. Ezúttal nem különböző károsodási mechanizmusokból válogatunk, hanem egy kiemelt meghibásodást ismertetünk részletesen: a nikkel ötvözetű csavarok ólom jelenlétében bekövetkező folyékony fém okozta ridegedését.

A folyékony fém okozta ridegedés (Liquid Metal Embrittlement – LME) egy összetett anyagkárosodási folyamat, amely során egyes képlékeny fémek meghatározott folyékony fémekkel érintkezve jelentős szívósságcsökkenést szenvednek el és rideggé válnak. A bemutatott eset jól szemlélteti, hogy a kialakuló szilárd nikkel és folyékony ólom fáziskapcsolat milyen gyorsan és milyen mértékben képes a kötőelemek mechanikai integritását lerontani.

2. Az esemény rövid leírása

A MOL Petrolkémia Zrt. egyik termelő üzemében lévő kondenzációs gőzturbina feladata a gyár egyik kulcsfontosságú berendezésének, a pirogáz kompresszornak a meghajtása. A centrifugál kompresszor öt fokozatban sűríti a technológiai gázt 0,5 bar(g)-ről ~36,0 bar(g)-re.

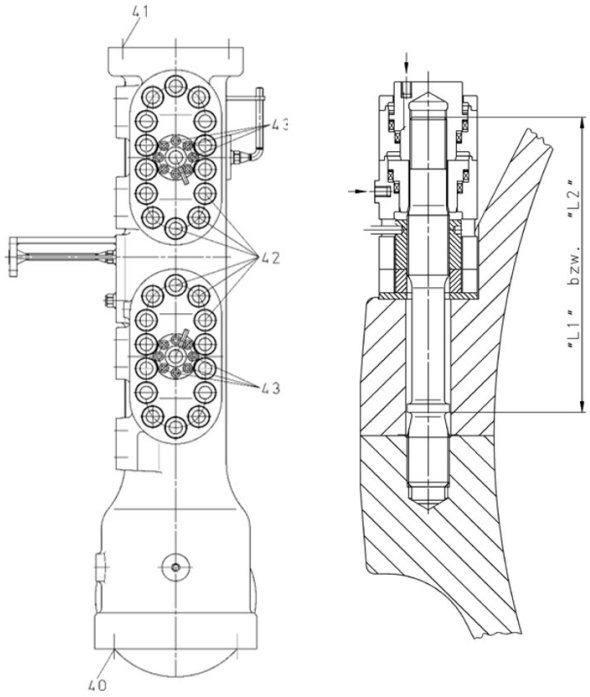
2006. szeptember 15-én a tervezett karbantartási leállás alatt a turbina szétszerelésre került és azt tapasztaltuk, hogy a gőzszabályzó himba lefogató csavarjaiból,



1. ábra: Turbina gőzszabályzó himba lefogató csavarok, a meghibásodás helye



2. ábra: Teljes keresztmetszetben eltört csavarok



3. ábra: Gőzszabályzó himba az érintett csavarok jelölésével és a rugalmas szárú szegcsavarok kialakítása

összesen 28 db-ból 4 db csavar teljes keresztmetszetben elszakadt. A meghibásodás helyét és a sérült csavarokat az 1. és 2. ábrák mutatják.

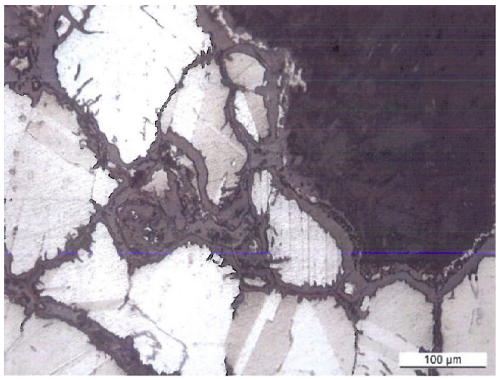
A csavarok anyagminősége NIMONIC 80A (2.4952) nikkel ötvözet. A többi, azonos anyagminőségű és igénybevételű rugalmas szárú szegcsavart ultrahangos vizsgálattal ellenőriztük. Anyagfolytonossági hiányra, repedésre utaló indikáció nem volt detektálható. Az érintett csavarok elhelyezkedése és kialakítása a 3. ábrán látható.

A magas üzemi hőmérséklet ($T_{üzemi} \cong 500\ °C$) hatására, a kenőanyagban lévő ólom megolvad. A magas nikkeltartalmú csavarok és a folyékony ólom kölcsönhatása, valamint a mechanikai feszültség (húzófeszültség) együttesen súlyos szerkezeti károsodást, folyékony fém ridegedést okoznak.

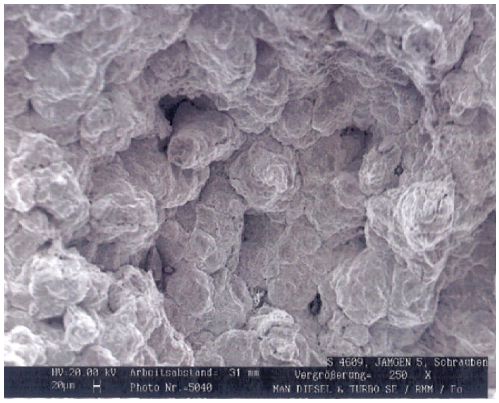
3. Okok

A nálunk tapasztalt meghibásodást követően 5 évvel, 2011-ben a turbina gyártója (MAN Diesel & Turbo SE) egy tanulmányt tett közzé [1], amely rávilágított arra, hogy hasonló gőzszabályzó rendszereknél már fordult elő tömörtelenség miatti gőzkifúvás, amelyet több csavar egyidejű törése okozott.

Az elszakadt csavarok elemzése alapján, a csavarok töretfelületén és a szemcsehatárok mentén is jelentős mennyiségben volt jelen ólom, ami a korábban alkalmazott kenőanyagból került a felületre, ezt mutatja a 4. ábra. A törés a szemcsehatárok mentén indult el, amit az 5. ábrán lévő SEM felvétel is igazol, de a repedés kiindulási pontját nem lehetett beazonosítani. A meghibásodás a folyékony fém okozta ridegedéssel magyarázható [1].



4. ábra: MAN-os elszakadt csavar töretfelületének mikroszkópos képe [1]



5. ábra: MAN-os elszakadt csavar töretfelületének elektronmikroszkópos képe [1]

4. Hatása

A meghibásodással kapcsolatban előzetes veszélyelemzést folytattunk le, a potenciális kockázatok beazonosítására.

Az eltört csavarok miatt 110 bar-os, ~500 °C-os gőz kerülhet a szabadba, potenciális veszélyforrást jelentve az emberekre, a szabályzó rendszer elemeire és a környező berendezésekre. Több csavar meghibásodása esetén előfordulhat az is, hogy a csavarok által rögzített fedelek elszabadulnak, további jelentős járulékos sérülést okozva.

Az elemzés szerint az alábbi intézkedések lettek meghatározva:

- a meglévő kamera rendszerrel az esetleges gőzkifújást nem lehetett volna detektálni, a terület le lett kerítve, hogy ne lehessen a gépet megközelíteni. Illetve termokamerával rendszeresen ellenőrizve volt, hogy látható-e tömörtelenség.
- gyártói javaslat a szükséges csavarok pótlására és az ólom tartalmú paszta teljes eltávolítására,
- új ólommentes kenőanyag beszerzése,
- a csavarok és paszta beérkezése után tervezett leállással a cserék kivitelezése.

5. Elvégzett roncsolásmentes vizsgálatok

A 2006-ban eltörött turbina csavarok anyagminősége az általunk elvégzett spektrométeres elemzés szerint megfelel a vonatkozó UNS N07080 szabvány szerinti NIMONIC alloy 80A ötvözetnek. A kémiai összetételre vonatkozó határértékeket és a mérési eredményeket az 1. táblázat tartalmazza.

***1. táblázat:** A csavarok kémiai összetétele*

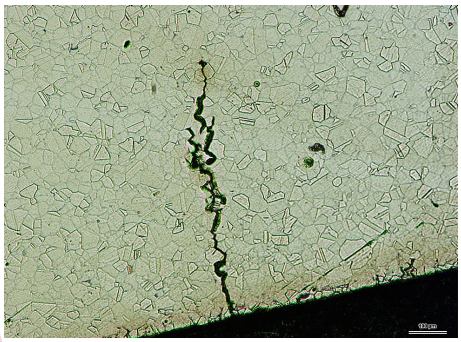
Kémiai elem	Előírás UNS N07080 szabvány szerint	Mérési eredmény
C	max 0,1	-
Cr	18,0-21,0	18,4
Si	max 1,0	-
Cu	max 0,2	-
Fe	max 1,5	-
Mn	max 1,0	-
Ti	1,8-2,7	2,28
Al	1,0-1,8	-
Co	max 1,0	-
B	max 0,008	-
S	max 0,015	-
Ni	65 <	75,34

A saját vizsgálati eredményeink alapján, a makroszkópos vizsgálat az alábbiakat állapította meg: a szegcsavar a rugalmas szárban kontrakció nélkül a teljes keresztmetszetben eltörött. A szegcsavar felületét a magas hőmérsékletű üzemelésből fakadóan fekete színű, egyenletes oxid réteg fedi. A töretfelületet a rugalmas szár palástfelületéhez hasonlóan szintén feketés-barnás színű elszíneződést mutató oxidréteg fedi, ami arra utal, hogy a törés már jóval a meghibásodás észlelése előtt keletkezett. A töretfelület egyértelműen szemcsés, rideg töret képét mutatja, lásd a 6. ábrán. További jellegzetessége, hogy a kerület mentén kb. 4,0 mm-es szélességű gyűrű alakú sáv látható, amelynek az elszíneződése eltér a csavar belső keresztmetszetének felületi elszíneződésétől. A leírt felületi kéreg jelenléte – figyelembevéve a palástfelületen mért 345-360 HV10 keménységi értékeket – a különleges nikkel ötvözetű anyag hőkezelési állapotára vezethető vissza.

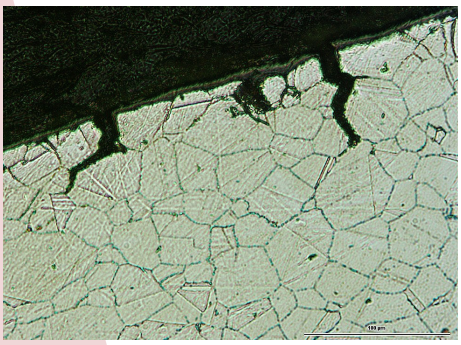
A mikroszkópos vizsgálatok alapján a töretfelületről készített csiszolaton a törés közelében a palástfelületről kiinduló, befelé haladó, 0,68 mm mélységű repedés található (lásd a 7. ábra), illetve szemcsehatáron haladó, befelé induló korróziós fogyások is észlelhetőek (lásd 8. ábra).



6. ábra: A töretfelület jellegzetes képe



7. ábra: A töretfelület közelében lévő mikrorepedés képe



8. ábra: A töretfelület közelében megfigyelhető korróziós fogyások

A BorsodChem Zrt. PVC Üzletág Polimer Kutatási és Analitikai Osztály által elvégzett elektronmikroszkópos elemzés [2] a repedésben ~30-40 µm mélységig ólom nyomokat detektált. A mikrorepedésről készült SEM felvételt és a felvett spektrumot a 9. ábra mutatja be.

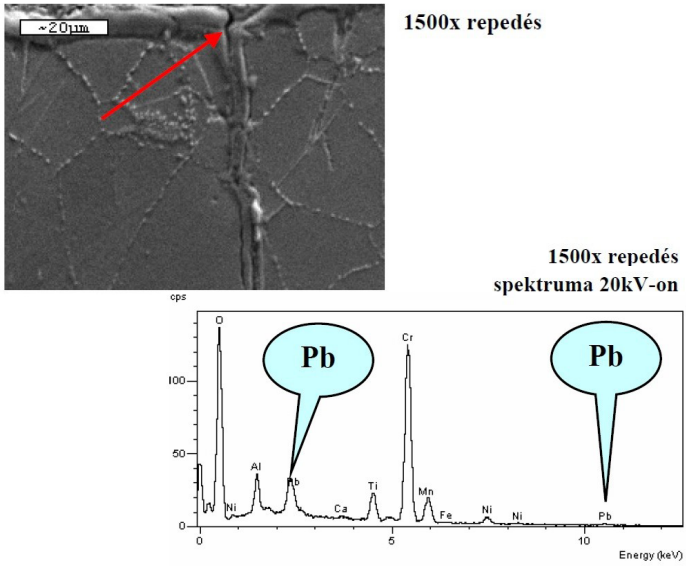
5.1 A nikkel-alapú ötvözetek és a folyékony ólom közötti kölcsönhatás

A nikkel-alapú ötvözetek és a folyékony ólom közötti kölcsönhatás a vegyipar és a nukleáris technológia egyik legveszélyesebb metallurgiai jelensége. Különböző szakmai tanulmányok (pl. Journal of Nuclear Materials, Corrosion Science) alapján a folyamat nem csupán egyszerű ridegedés, hanem egy komplex kioldódási folyamat is [3].

A magas üzemi hőmérséklet hatására a kenőanyagban lévő ólom megolvad. A szilárd nikkel ötvözet és a folyékony fázis között közvetlen, atomi szintű érintkezés (nedvesítés) jön létre. A folyékony ólom behatol a szemcsehatárok mentén és a csavarokra ható húzó igénybevétel miatt a nikkel ötvözet elveszíti az alakváltozási képességét és ridegen eltörik. A károsodás oka a folyékony fém okozta ridegedés.

Befolyásoló tényezők a szilárd fém szerkezeti tulajdonságai is: szemcseméret – a nagyobb szemcseméret fokozza a ridegedés mértékét – , folyáshatár – a magasabb folyáshatár és az anyag magas keménysége szintén elősegíti a jelenség kialakulását –, és a ridegtörés elindulásához általában szükség van a diszlokációk mozgását gátló új akadályokra (pl. diszlokáció felhalmozódás, szemcsehatárok, zárványok) [3].

A ridegséget a hibák kialakulása és terjedése váltja ki, ezért szükséges a törésmechanikára támaszkodni. Az LME okozta törésmód sajátos jellegzetességeket mutat:



9. ábra: BorsodChem Zrt. Polimer Kutatási és Analitikai Osztály által elvégzett elektronmikroszkópos elemzés eredménye [2]

makroszkópikusan rideg, hasadás jellegű, de a hasadási felületen mikro méretű lépcsők figyelhetőek meg. És bár a törés ridegnek tűnik, a repedéscsúcson mindig bekövetkezik valamilyen plasztikus alakváltozás, ami jelentősen csökkentheti a repedésnövekedés ellenállását és felgyorsíthatja a repedés növekedési sebességét. A törés jellemzője a nagyon gyors repedésnövekedés, amely a hőmérséklet és a folyadék-szilárd rendszertől függ. A törés lehet szemcsehatár menti – a tisztán szilárd/folyékony fém párok esetében ez a gyakoribb – , szemcsén keresztül haladó vagy vegyes típusú [3].

A legtöbb LME-párral ellentétben a nikkelnek rendkívül magas az oldhatósága a folyékony ólomban. Ez azt jelenti, hogy az ólom nemcsak "szétfeszíti" a szemcsehatárokat, hanem elkezdi kioldani a nikkelt az ötvözetből. Ez porózus, mechanikailag instabil réteget hoz létre a felületen, ami rontja az anyag szerkezeti ellenállását az igénybevétellel szemben.

6. Összefoglaló

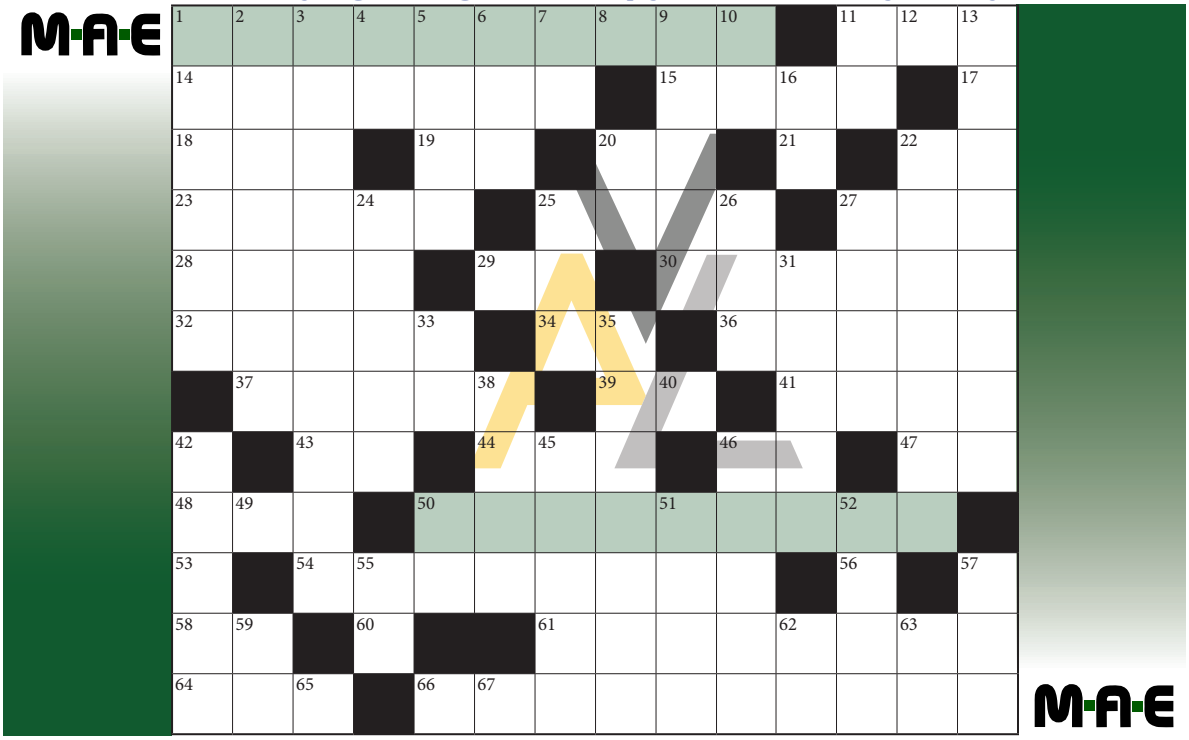
Megállapítható, hogy az LME egy rendkívül összetett folyamat, amelyet több, egymással szoros összefüggésben lévő paramétertől, anyagjellemzőtől függ. Az LME megbízható elkerülésére több évtizedes kutatómunka és mérnöki alapú modell született és születik napjainkban is.

Irodalomjegyzék

[1] MAN Diesel & Turbo: Background for possible bolt failure, 2011.03.08.
[2] BorsodChem Zrt. PVC Üzletág Polimer Kutatási és Analitikai Osztály: Mikroötvözet vizsgálati jegyzőkönyv, 2011.03.18.
[3] Nilsson, K. F., Hojna A.: Overview of mechanisms & models for liquid metal embrittlement and future directions, 2018, ISBN 978-92-79-97249-2

Kocsis-Galuska Anna
Joó Gyula
MOL Petrolkémia

Anyagvizsgálók Lapja keresztrejtvény



Vízszintes

1. Megfejtés 1: Amerikai író
11. Testrész
14. Amerikai állam
15. Mesés történet
17. Magánhangzó
18. Szerb város
19. Angol állatkert eleje!
20. Kettős, kétszeres
21. Kérdőszó
22. Állami Bizottság
23. Híres pipás község
25. Férfi név
27. Felsorolás végén használt rövidítés
28. Város Püspökladány közelében
29. Nem áll
30. Sok nőnek udvarló férfi
32. Nyílászáró
34. Időegység
36. Elegyít
37. Idegen férfinév
39. A végén kap!
41. Női név
42. Éghető gáz
43. Ránc végződése!
44. Nem ül
45. Növény földhöz közeli alsó része
47. Gin befejezés nélkül!
48. Ábrázat
50. Megfejtés 2: A Nyugat folyóirat szerkesztője
53. Ajánlott küldemények jelzése
54. Kebeltelen hölgyek
56. A latin ÁBC 25. betűje
57. Ma kezdete!
58. Rang
60. A jód vegyjele
61. Belga régió
64. Duzzasztó
66. Ruha késül belőle

Függőleges

1. Becézett férfinév
2. Török mesehős
3. Kertész Mihály 1942-es filmdrámája
4. Hozzávetőlegesen
5. Könnyed
6. Mosószer márka
7. Alkálifém
8. Német autók jele
9. Csillagkép
10. Tiltószó
11. Nemesgáz
12. Az ábc 2. betűje
13. Hosszú idejű
16. Félvezető
20. Bulgár gépkocsik jelzése
22. Keresztül himbálódzó
24. Fapofa
25. Nem mögé
26. Szebbik nem tagjai
27. …,borsa
29. Elöl üget!
31. Gazdasági szélhámos
33. Kiütés
35. Régies voltak
38. Házasságkötés
40. Foszfor
42. Düh
45. Ukrajnai városból származó
46. Női név
49. A sugár jele
50. Boa farka!
51. Lökő
52. Kettős mássalhangzók
55. Al magyarul
57. Növények szaporodnak vele
59. Ének hang
62. Puha fém
63. Riad középen!
65. Idő jele
66. Tárgyrag
67. Erő közepe!

A helyes megfejtők között a **MAE Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete** által felajánlott ajándék nyertesét kisorsoljuk.

A megfejtéseket az *avilap.szerk@gmail.com* email címre várjuk, ahol a tárgy mezőbe tüntesse fel a *"Keresztrejtvény" kifejezést*.

Beküldési határidő: **2026. december 6.**

A 2025/IV. lapszám keresztrejtvényének nyertese: Ungár Péter

A 12. AGY-konferencia előadói



A 12. AGY-konferencia kiállítói













TECHNOORG LINDA

UNICAM

JEOL













INTESZT

Unitester Kft.

Anton Paar





