

Anyagvizsgálók Lapja

Az Ország vezető szaklapja

Hazai és
nemzetközi
kutatások



Siker a tudomány hullámhosszán



A lap kiemelt
támogatója:



Bay Zoltán Alkalmazott
Kutatói Közhasznú
Nonprofit Kft.

APR eljárás,
In-situ
nanoindentáció,
Vörösiszap,
Fémnyomtatás,
3D nyomtatás

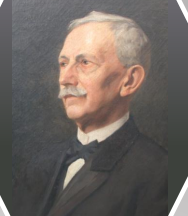
Szakmai
cikkek



VASKUT
IV. rész



Portré:
Trampus Péter
Egon Orowan
Prohászka János
MAE elnökök



Úton az
NDE 4.0
felé

H2020
projektek:
APAL, DELISA-LTO,
ENTENTE,
STRUMAT-LTO,
FRACTESUS



Konferencia
beszámoló

SNETP projektek
figyelemmel kísérése,
A reaktortartály
anyagainak
folyamatos
monitorozása

Hazai és
nemzetközi
kutatói projektek a
nukleáris ipar
területén



Hazai
atomerőművi
projektek
az üzemidő
hosszabbítás
kapcsán

Kisméretű
próbatestek
bevezetése,
Roncsolásmentes
vizsgálati technika
fejlesztése

Technikatörténet
II. rész:
A „Széchenyi”
katlanpattanása



2022/IV.
lapszám

**Kompetenciák:**

- Technológiatervezés és fejlesztés, prototípuskészítés
- Gyártástechnológiák fejlesztése szerkezeti és funkcionális anyagokhoz
- Nyersanyag visszanyerés zöld technológiákkal
- Metallográfiai, optikai mikroszkópos és analitikai vizsgálatok
- Megvalósíthatósági tanulmányok készítése

Elektrokémiai technológiák:

- Elektrokémiai anodizálás: alumínium és ötvözeire történő kopásálló bevonat létrehozása
- Elektropolírozás: különböző acélok, illetve alumínium felületkezelése
- Plazma anodizálás (PEO): titán és ötvözeire történő biokompatibilis bevonat létrehozása
- Plazmával történő felületi színezés
- Plazma polírozás (PEP): titán és ötvözeinek felületkezelése
- Galvánbevonatok létrehozása (pl. arany, nikkel)

Felületi és tömbi anyagfejlesztések:

- Nagyhőmérsékletű kísérletek végzése különböző kemencékben levegőn, argon atmoszférában és vákuumban
- Ultrahangos nanorészecske-szintézis
- Szol-gél technológiai eljárások
- Nyersanyagok és kritikus nyersanyagok visszanyerése ipari hulladékból
- Különböző töltetű mikro és nano biopolimer kompozitok előállítása

Mérési kompetenciák:

- UV-VIS-NIR spektroszkópia
- Röntgenes anyagvizsgálatok (XRD, XRF)
- Pásztázó elektronmikroszkópia
- Optikai mikroszkópia
- ICP-OES mérések összetételmeghatározásra
- DTA mérés
- Elektrokémiai mérés technikák (korróziósebesség, EIS, CV)
- Viskozitásmérés
- Mikrokeménység-mérés

Mélyen tisztelt Olvasóim!



Egy újabb évet fejezünk be! A 2022-es esztendő mindnyájunk számára hozott jót is és kevésbé örömteli napokat. Egyénenként mindenki bizonyára elgondolkodik azon, hogy miért örült és mi okozott számára gondot. A Felelős Szerkesztő csupán általánosságban gondolkozhat, hiszen képtelen egyszerre minden honfitársunk gondolatait, érzelmeit átélni. Talán kezdjük az **általános örömmel**. Kilábaltunk abból a szörnyű veremből, amelynek „bejárata fölött” a COVID-19 vírus feliratot olvashattuk. Erre az elmúlt esztendő minden számában hivatkoztam. Hazánk mintegy 9,68 millió lakosságának valamivel több, mint 20%-a átesett e fertőzésen és mintegy 50 ezer főt gyászolunk, azaz 100 fertőzött honfitársaink közül legalább 2 főt elvesztettünk. A világ népességére vonatkozó statisztikákat szemlélve ezen adatok némileg kedvezőbbek, hiszen 8%-ra tehető a fertőzöttek száma, és minden 100 fertőződött közül csupán egyetlen hunyt el. Igazságtalan lennék, ha nem jegyezném meg, hogy feltehetően nagyon eltérő az országok „COVID-fertőzésben elhunyt” kategorizálási rendszere. Így talán még némileg módosulhat hazánk nem éppen „rózsás” megítélése.

A sokszor és joggal dicsért magyar nyelvben azonban van olyan „mondás is”, hogy „egyszer fent, másszor lent!” Az általános örömet az **általános szomorúság** követi! A gondolkodó egyént egyrészt a szomszédos Ukrajnában dúló értelmetlen háború, másrészt a hazai közoktatás helyzete szomorítja. Ez utóbbival kapcsolatban érdemes kihangsúlyozni, hogy noha a XX. századot Budapesten írták (a 2000-ben megjelent NATURE cikke szerint), az biztos, hogy a XXI. századot már nem itt alapozzák meg! Igaz, a politikusoknál a Nobel-díjas tudós is ugyanúgy egy szavazatot képvisel, mint a „halmozottan hátrányos” állampolgár. Ahol e szemlélet a valóságában is megnyilvánul, ott nagyon nagy a baj, hiszen ez azt is tükrözi, hogy a társadalom működtetésének anyagi alapjait mindkét típusú, tudású állampolgár egyformán termeli meg. Ez pedig nonszensz!

Áttérve az egyéni bánatokra és örömekre, ezeket minden Tisztelt Olvasó valóban egyénileg éli meg. Így én is. Most a Felelős Szerkesztő személyében. Gondolkodó emberként, számomra is **egyéni szomorúságot** okoz a hazai közoktatás helyzete és messzemenően egyetérték a Fizikai Szemle Felelős Szerkesztőjének, professzor-társamnak, a lapjuk 2018/8 számában „Észlembontás” címmel megfogalmazott gondolataival, valamint a 2022/10 lapszámban közölt „Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat elnökségének nyilatkozata a közoktatásról” címmel közölt álláspontjával.

Újból csak a magyar nyelv szépségét tükröző közmondáshoz fordulva azt is mondhatjuk, hogy „Minden felhő mögött süt a nap”. Ezt érzem én is, ha szakmánkra és e szakmai lapra gondolok. Az ok többszörös. Egyrészt az idén fejezi be tanulmányait a második évfolyam a „Szerkezetintegritás és roncsolásmentes szakmérnöki szakirányú továbbképzés” keretében a Debreceni Egyetem Műszaki Karán, enyhítve az igazán létező, komplex ismereteket igénylő szakemberhiányt. Ugyancsak **egyéni örömet** jelent számomra az, hogy egyre gyakoribb dicséző visszajelzéseket kapok a megújult lapszámok tartalmi és formai megjelenésével kapcsolatban. Igaz, ezekben csupán egy „útkezelő szerepet” tekinthetek magaménak, mert valójában a közlemények szerzőit és közeli munkatársaimat illetik az elismerések. Engedje meg a Tisztelt Olvasó, hogy ez utóbbiakat nevesítsem is! Dr. Dudra Judit, Erdei Réka és Zsíros Zsombor az, akiknek kreatív és szorgalmas munkájának eredményeként olvashatják lapunk elektronikus változatát. A valódi örömet okozó, kézbe vehető nyomtatott változat elkészítésében pedig a MAROVISZ titkárságát vezető Császár Anikó és a Digital Nyomda Kft. van segítségünkre. Nekik és minden Tisztelt Olvasónknak nagyon kellemes Karácsonyt és Boldog Új, 2023-as Esztendőt kívánok a Kiadó és a Szerkesztő Bizottság nevében!

Tóth László
felelős szerkesztő

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

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. Trampus Péter (felelős kiadó)
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
Skopál István
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 elektronikus folyóirat szerver háttérét biztosítja:

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

Az Anyagvizsgálók Lapja honlapja:

www.anyagvizsgaloklapja.hu



JEGYZET – NOTE

TÓTH László	3
Jegyzet	
Note	

RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLATOK – NON-DESTRUCTIVE TESTING

TAKÁCS Csaba, SPISÁK Bernadett, SZÁVAI Szabolcs	7
Az APR vizsgálati eljárás alkalmazhatósága atomerőművi gőzfejlesztő csövek esetében	
Applicability of APR testing method in case of heat exchanger tubes of steam generators	

ANYAG, ANYAGSZERKEZET – MATERIAL, MATERIAL STRUCTURE

KISS László, JUHÁSZ Gergely, CSITKÓ Zsolt	15
LMD technológia modellezési lehetőségei	
Modelling options for LMD technology	
CSÖRGŐ Zsombor László, KOVÁCS Sándor, TOPA Martin, RÉDEY Soma	20
Kender -PLA kompozit filament 3D nyomtatásának elemzése	
Analysis of 3D printing of hemp -PLA composite filament	
GROSSMANN Erika, KOPECSKÓ Katalin, TÖRÖK Mátyás	26
Vörösiszap-maradékanyag építőipari felhasználása	
Utilization of treated red mud in construction industry	

MECHANIKAI VIZSGÁLATOK – MECHANICAL TESTING

MUZSA Alexandra, UGI Dávid, VIDA Ádám, Nguyen Quang CHINH	31
Az anodizált A356 alumíniumötvözetek felületének és keménységének vizsgálata pásztázó elektronmikroszkóppal és in situ nanoindentációval	
Study of anodic film's surface and hardness on A356 aluminum alloys, using scanning electron microscope and in-situ nanoindentation	

HÍREK – NEWS

TRAMPUS Péter, TÓTH László	37
Úton NDE 4.0 felé – Előzetes	
Towards NDE 4.0 – Preliminary	
TRAMPUS Péter	38
Beszámoló az NDE 4.0 nemzetközi konferenciáról	
Report on the International Conference on NDE 4.0	
ILINYI János	40
Sikeres rendezvény Siófokon	
Successful event in Siófok	
FEKETE Tamás	41
Beszámoló az ECF23 Konferenciáról – II. rész	
Report from the ECF23 Conference - Part II	
SZÁVAI Szabolcs, RÓZSAHEGYI Péter	49
Résztvétel a Paksi Atomerőmű öregedéskelzési programjainak támogatásában	
Participation in supporting the Paks Nuclear Power Plant's ageing management programmes	
VARGA Dávid	56
A Bay Zoltán Nemzeti Kutatóintézet-hálózat kialakítása II. ütem	
Establishment of the Bay Zoltán National Research Network II. phase	
GILLEMOT László, HORVÁTH Ákos, Murthy KOLLURI, Szenthe Ildikó, Mórtiz Szilvia, Hargitai Balázs, Csikós Kristóf Andor, Ginger Dávid, Horváth Márta	58
STRUMAT-LTO projekt: Szerkezeti anyagok kutatása az LWR atomerőművek hosszú távú biztonságos üzemeltetése érdekében	
STRUMAT-LTO project: Structural Materials research for safe Long Term Operation of LWR NPPs	
ERDEI Réka, BÉZI Zoltán	63
FRACTESUS projekt: Besugárzott RPV acélok törésmechanikai vizsgálata kisméretű próbatestek segítségével	
FRACTESUS project: Fracture mechanics testing of irradiated RPV steels by means of sub-sized specimens	

HÍREK – NEWS

DUDRA Judit, SZÁVAI Szabolcs ENTENTE projekt: Sugárkárosodás multiscale modellezésére irányuló európai adatbázis ENTENTE project: European database for multiscale modelling of radiation damage	66
SPISÁK Bernadett, SZÁVAI Szabolcs APAL projekt: Fejlett probabilisztikus PTS értékelési módszer kidolgozása hosszú távú üzemelésre vonatkozóan APAL project: Advanced PTS Analysis for LTO	69
SZÁVAI Szabolcs, DUDRA Judit DELISA-LTO projekt: Az élettartam hosszabbítás biztonsági működésre és az alapanyagokra gyakorolt hatásának leírása – Hosszú távú működés biztonsági kompromisszumok nélkül DELISA-LTO project: 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	72
BÁRSONY István Gyulai József – az intézetigazgató, Az emléktábla avatáson elhangzott beszéd sorozat első része József Gyulai – the institutdirector, First part of the series of speeches at the plaque unveiling	75
BENDZSEL Miklós Gyulai József – A kohézió Gyulai-iskolája, Az emléktábla avatáson elhangzott beszéd sorozat második része József Gyulai – The Gyulai School of Cohesion, Second part of the series of speeches at the plaque unveiling	77

PORTRÉ – PORTRAIT

DOBRÁNSZKY János, TÓTH László A Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete (MAE) elnökeinek portréja – Rejtő Sándor (1914-1917) Presidents of the Hungarian Association for Material Testing – Sándor Rejtő (1914-1917)	79
SKOPÁL István Beszélgetés Trampus Péterrel Interview with Péter Trampus	84
HARGITAI István, HARGITAI Balázs Egy híres anyagvizsgáló: Egon Orowan Egon Orowan, a renowned materials scientist and technologist	88
VERŐ Balázs Emlékezés Prohászka János professzorra In memory of Professor János Prohászka	89

BEMUTATJUK... – INTRODUCING

FEHÉRVÁRI Attila A Vasipari Kutató Intézet 70 éves jubileuma (1952-2022) – IV. rész 70th anniversary (1952-2022) of the Research Institute for Ferrous Metals – Part IV	92
--	----

NEKROLÓG – OBITUARY

TÓTH László Dr. Béres Lajos (1932-2022) Dr. Lajos Béres (1933-2022)	99
--	----

ÉRDEKESSÉGEK – POINT OF INTEREST

LACZIK Bálint A „Széchenyi” katlanpattanása Boiler explosion of Széchenyi steam boot	103
Keresztrejtvény - Crossword	106

30 évesek lettünk!

Siker a tudomány hullámhosszán

ÜGYVEZETŐI KÖSZÖNTŐ

Pungor Ernő alapítónkat vitathatatlanul a magyar műszaki fejlesztés vezéregyéniségeként tartják számon mind a mai napig. Neve összeforrt a fejlett technológiák és eljárások kutatásával, széles körű alkalmazásával, valamint mindezen értékek előállításához nélkülözhetetlen állami, társadalmi és gazdasági erőforrások megteremtésével. A hazai K+F intézményrendszer átalakításában elismerten legfontosabb kezdeményezése volt a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Alapítvány életre hívása.

“Az alkotásokhoz nem elsősorban pénz kell, hanem agy. – mondta Pungor Ernő 1993-ban – Maga a kutatógarnitúra elsősorban olyan vállalkozó szellemű fiatal emberekből állna, akik össze tudják kapcsolni a kutatást és az ipari alkalmazást. Ehhez a munkához nem lehetett volna jobb példaképet kiválasztani, mint Bay Zoltánt, aki élete végéig az alapkutatástól a megvalósulásig tudott maradandót alkotni a magyarságnak”.

(Forrás: Fáradhatatlanul – Pungor Ernő élete és munkássága)



Aki jártas a tudományban tudja, hogy a kutatás, fejlesztés és innováció világában az idő múlása más léptékű; hiszen egy ötlet megszületésétől akár hosszú éveknek is el kell telnie, hogy valódi társadalmi, gazdasági hasznot hozó, jelentős újdonságtartalmú termék vagy szolgáltatás jöhesse létre.

Pungor Ernő vegyészmérnök, tudományszervező által megálmodott, majd 1993-ban megalapított Bay Zoltán Kutatóközpont idén ünnepli fennállásának 30. évfordulóját, ami tűnhet soknak, de akár csak egy szempillantásnak is. Jómagam már 8 éve vezetem a német mintára létrejött, az ipar szereplői számára hasznosítható KFI tudást létrehozó szervezetet. Megtiszteltetés számomra, hogy e jubileumi év méltó megünneplésében aktív szerepet vállalhatok.

A Bay Zoltán Kutatóközpont sikertörténete Szegedről indult, mai szemmel nézve startup ötletként. Alapítónk víziója az volt, hogy a 80-as években sorra megszűnt állami ipari kutatóintézetek helyére lépjen be egy ágazatfüggetlen, alkalmazott ipari kutatás-fejlesztést folytató intézmény, amely képes üzleti alapon, de nonprofit jelleggel előteremteni a fenntartásához szükséges erőforrásokat. Mára összesen 300 főt foglalkoztató, országosan 10 telephellyel rendelkező, éves szinten 400 partnerrel kapcsolatban álló, alkotó kutatói közösséggé váltunk. Mindeközben ernyőszervezet is lettünk, hiszen Bay Zoltán Nemzeti Alkalmazott Kutatóintézet Hálózat néven integrálódunk az Építésügyi Minőségellenőrző Innovációs NKft-vel, a Közlekedéstudományi Intézettel, illetve a Zalazone-nal abból a célból, hogy a rendelkezésre álló tudás és infrastruktúrák kihasználtságát optimalizáljuk. Ám nem csupán létszámban és telephelyben bővültünk: igazodva a felgyorsult gazdasági folyamatokhoz, kutatói portfólióink organikusan fejlődve is egyre szerte ágazóbbá vált; mára képessé váltunk új, alkalmazott tudás létrehozása mellett komplex gyártástechnológia összeállítására, prototípus készítésére, sőt akár bérnyújtásra is. Közös nagy álmunkat is megfogalmaztuk már: létrehozni Magyarország első professzionális prototípus gyárat, ahol kézzelfoghatóvá válnak mind a magyar, mind a nemzetközi startupok, innovatív kis- és középvállalkozások, hazai és multinacionális nagyvállalatok ipari fejlesztéseinek működő modelljei. Mindezt új kutatói nemzedék kinevelésével, a fenntarthatóság elveivel összhangban, a természetes környezet megóvásával kívánjuk elérni.

Einstein óta tudjuk, hogy még az idő is lehet relatív, ami viszont tény, hogy a Bay Zoltán Kutatóközpont elmúlt 30 éves működése valódi, kézzelfogható siker a tudomány hullámhosszán.

Dr. Grasselli Norbert
ügyvezető igazgató



BAY-30 – SIKER A TUDOMÁNY HULLÁMHOSSZÁN

Az APR vizsgálati eljárás alkalmazhatósága atomerőművi gőzfejlesztő csövek esetében

Applicability of APR testing method in case of heat exchanger tubes of steam generators

Takács Csaba^a, Spisák Bernadett^b, Szávai Szabolcs^c

^aBay Zoltán Alkalmazott Kutási Közhasznú Nonprofit Kft., tudományos munkatárs, csaba.takacs@bayzoltan.hu

^bBay Zoltán Alkalmazott Kutási Közhasznú Nonprofit Kft., tudományos munkatárs, bernadett.spisak@bayzoltan.hu

^cBay Zoltán Alkalmazott Kutási Közhasznú Nonprofit Kft., osztályvezető, szabolcs.szavai@bayzoltan.hu

Kulcsszavak

hőcserélő csövek,
APR eljárás,
gőzfejlesztő,
roncsolásmentes vizsgálat,
vizsgálati idő

Keywords

pipes of heat exchangers,
APR method,
steam generator,
non-destructive testing,
testing time

Absztrakt

Az ipari hőcserélők csövei jellemzően hosszú, vékony, kis falvastagságú csővezetékek, valamint a külső és a belső oldalon egyaránt érintkeznek valamilyen technológiai közeggel, amely a korróziós hatása révén károsíthatja őket. A hőcserélők csöveiben esetlegesen kialakuló lerakódások és eldugulások ronthatják a hőátadási folyamatokat, a korróziós folyamatok pedig a csővezeték átlukadásához is vezethetnek. Ennek elkerülése érdekében kiemelten fontos a hőcserélők integritásának ellenőrzése és megőrzése. A közelmúltban kifejlesztésre került az APR (Acoustic Pulsed Reflectometry - Akusztikus Válaszviszhang Módszer) roncsolásmentes vizsgálati eljárás, amely módszerrel a hőcserélők csővezetékeinek vizsgálata nagyon rövid időn belül nagy biztonsággal elvégezhető.

Abstract

The tubes of industrial heat exchangers are typically long, thin, thin-walled tubes, and they are in contact with a process medium on both the outside and the inside, which can damage them through corrosion. Possible deposits and blockages in the tubes of heat exchangers can impair heat transfer processes, and corrosion processes can lead to pipeline perforation. To avoid this, it is of crucial importance to maintain the integrity of heat exchangers. Recently, APR (Acoustic Pulsed Reflectometry) non-destructive testing method has been developed, in order to inspect pipes of heat exchangers with reliable results in short time.

1. Bevezetés

A hőcserélők az eltérő technológiai közegek hűtése és előmelegítése következtében jelentős szerepet töltenek be a különböző iparterületeken, így a nukleáris iparban is. A hőátadó felület maximalizálása és az optimális hőátadási viszonyok elérése érdekében az ipari hőcserélők jellemzően nagy számú, külön-külön kis átmérőjű és falvastagságú, nagy hosszúságú csövekből állnak. Ennek következtében a hőcserélő csövek eltömődésre, valamint külső és belső korróziós károsodásra egyaránt hajlamosak, integritásuk megőrzése kiemelt fontosságú. A nukleáris iparban a primer- és szekunderköri technológiai víz közötti hőcsera a gőzfejlesztőkben történik, ennek következtében a gőzfejlesztők is hőcserélőnek tekintendők. A gőzfejlesztők hőcserélő csöveinek örvényáramos vizsgálata az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. (továbbiakban: Paksi Atomerőmű) esetében időszakosan megtörténik, amelynek során a csővezetékek 50%-a kerül vizsgálatra. Az örvényáramos vizsgálat jól alkalmazható roncsolásmentes vizsgálati eljárás a gőzfejlesztő csöveinek vizsgálatára, azonban nagy szakértelmet igényel, valamint időigényes vizsgálat, ennek következtében a hőcserélők csöveinek vizsgálatának időtartama is jelentősen csökkenthető, amennyiben az örvényáramos vizsgálatok kiválthatók vagy kiegészíthetők más fajta roncsolásmentes vizsgálati eljárással, továbbá ez a vizsgálati eljárás szintén képes nagy biztonsággal, rövidebb vizsgálati idő mellett kimutatni a hőcserélő csövek esetleges anomáliáit.

A közelmúltban kifejlesztésre került az APR vizsgálati eljárás, amelynek során a vizsgáló készülék magas frekvenciatarományba tartozó hangok gerjesztésével és elemzésével dolgozik. A módszert kifejezetten a kis átmérőjű csővezetékek állapotának meghatározására, így a hőcserélő csövek vizsgálatára fejlesztették ki. A hőcserélő csövekbe helyezett szonda tartalmaz egy hanggenerátort és egy hangérzékelő egységet (mikrofont). A hanggenerátor

által gerjesztett hang a cső hosszától, átmérőjétől, és a benne lévő közeg anyagától (leürített állapotban levegő) függően változhat. A csőben kialakul egy nyomóhullám, melynek hullámhosszát, frekvenciáját, valamint felharmonikusainak tulajdonságait elemzi a készülék. A frekvencia annak függvényében változik, hogy milyen hosszúságban tud a csővezetékben kialakulni a nyomóhullám. Az állandó hosszúságú hőcserélő csővezeték esetében pedig az abban kialakuló nyomóhullám hossza és frekvenciája is állandó, csak abban az esetben változik, ha valamilyen anomália van a csővezetéken.

A vizsgálati technikát jelenleg is alkalmazzák különböző ipari hőcserélők időszakos ellenőrzésére. Annak eldöntése érdekében, hogy a módszer alkalmazható-e a nukleáris ipari gőzfejlesztők csöveinek vizsgálatára, demonstrációs vizsgálatot végeztünk a Paksi Atomerőmű Karbantartási Gyakorló Központban található gőzfejlesztő primerköri csővezetékein, jelen cikkben az említett vizsgálat eredményei kerülnek bemutatásra az eljárás részletesebb ismertetése mellett.

2. Az APR vizsgálati eljárás ismertetése

Az APR vizsgálat célja olyan hibák felderítése, lokalizálása és azonosítása, mint például a falon áthaladó lyukak, a lyukadás és/vagy erózió miatti belső falvesztés, valamint a cső teljes vagy részleges eltömődése. A vizsgálati technika nem feltétlenül hatékony a szűk határokkal rendelkező repedések felderítésében.

A hőcserélők vagy kazáncsövek APR eljárással történő ellenőrzéséhez 3 komponensre van szükség: az akusztikus impulzusok forrására (adó), az akusztikus hullámok vevőjére (vevő) és az ellenőrizendő elemre (cső). A vizsgálati technológia a hanghullámokat a vizsgált csőben lévő levegőn keresztül generálja, majd érzékeli a diszkontinuitások és/vagy elzáródások által keltett visszaverődéseket. A kezdeti fázis (pozitív vagy negatív) és a visszavert

akusztikus hullám alakjának elemzése a visszaverődést okozó indikáció típusának azonosítására szolgál. Ha megfelelő jel- és adatelemzési módszereket dolgoznak ki, az APR-technológia alkalmazható a hiba/elzáródás jelzések méretezésére. A belső átmérő keresztmetszetének ilyen változásait okozhatják a csőben lévő akadályok, a cső belső átmérőjének megnövekedése belső korróziós falvesztés következtében, az átmenő fallyukak, de akár a csőben bekövetkező szerkezeti eltérések is, mint például az U-ív, a cső csőlemezre való hengerlése, a cső vége, stb.

A keletkező visszaverődések mérhetőek és elemezhetőek, és a jelek értelmezéséből megállapítható, hogy a cső belső átmérőjének keresztmetszeti egységében vannak-e folytonossági zavarok, továbbá meghatározhatók ezek típusa, helyzete és mérete.

2.1 Az APR eljárás fizikai alapjai

A levegőben az akusztikus hullámok longitudinális irányban terjednek, tehát a részecskék sebessége párhuzamos a hullám terjedési irányával. A szabad térben az akusztikus hullámok minden irányban terjedhetnek, azonban egy zárt térben, például egy csőben, amelynek keresztirányú méretei a minimális hullámhosszhoz képest kicsik, az ilyen hullámok kizárólag a cső tengelye mentén terjednek.

Egy bizonyos "határfrekvenciáig" a csőben terjedő hullám síkhullámnak tekinthető, azaz a hullámfrontok laposak, és a nyomásingadozás egyenletes a cső keresztmetszetében. Ez a fajta hullám a legkönnyebben mérhető hullám, mivel elegendő a keresztmetszet egy pontján mérni. A határfrekvencia felett magasabb rendű terjedési módok gerjesztődnek. Ezek a módok eltérő hullámsebességgel rendelkeznek, ráadásul létrejöttük hatására a nyomás már nem lesz egyenletes a keresztmetszetben. Ezeket a módokat már nehéz szabályozható módon gerjeszteni és mérni, ezért az APR-rendszerekben általában kerülni szokták őket. A síkhullám terjedési módot a legalacsonyabb rendű módnak is nevezik. Az első magasabb rendű mód határfrekvenciáját az (1)-es egyenlet adja meg:

$$1,84 \cdot \frac{c}{\pi \cdot d}, \quad (1)$$

ahol c a levegőben történő hangsebesség, és d a cső belső átmérője. Ebből jól látható, hogy ezt a frekvenciát a cső átmérője és a hangsebesség határozza meg, és a cső szélesedésével egyre alacsonyabb lesz. A magasabb rendű módok okozta nehézségek elkerülése érdekében az APR-rendszereket általában úgy tervezik, hogy olyan gerjesztő jelet hozzanak létre, amely maximális frekvenciája e határérték alatt van.

A csőben terjedő akusztikus hullámok a cső falán fellépő súrlódás miatt csillapodnak. A Kirchoff [1] által felfedezett, majd később Keefe [2] által matematikailag jobban kezelhető közelítésben megfogalmazott csillapítási egyenletek szerint a csillapítás elsősorban a hullámhossz és a csőátmérő arányától függ. A csillapítás a frekvenciával nő, ezért a cső egyik végén gerjesztett széles sávú impulzus fokozatosan elveszíti magas frekvenciájú tartalmát, és idővel

fokozatosan ellaposodik.

Az akusztikus hullámok egy egyenletes csőben végighaladnak a csövön, és csak a korábban leírt fokozatos csillapítást érzékelik. A cső keresztmetszetének bármilyen belső változása azonban a hullámot két komponensre osztja: egy visszavert és egy áteresztett komponensre. Többféle keresztmetszet változás fordulhat elő: a keresztmetszet növekedése a falvesztés, vagy a falon áthaladó lyuk miatt, és a keresztmetszet csökkenése a teljes vagy részleges eltömődés miatt. Ha a legalacsonyabb rendű móddal foglalkozunk, csak a teljes keresztmetszet változása van hatással a visszavert és az áteresztett hullámra, az indikáció alakjától nem függ. Lyukadás esetében például a lyuk területe határozza meg a tükröződést, és lényegtelen, hogy kerek vagy hosszúka alakú. Ugyanez érvényes a keresztmetszet csökkenésére is - nincs jelentősége annak, hogy az lokalizált vagy egyenletesen oszlik el a cső kerületén.

A keresztmetszet hirtelen változása által okozott reflexió és transzmisszió könnyen modellezhető a reflexió és transzmissziós együtthatókon keresztül. Adott egy hullám, amely egy S_1 keresztmetszetű csőben terjed, majd egy S_2 keresztmetszetű csővel találkozik, az R visszaverődési együttható ebben az esetben a következőképpen határozható meg [3]:

$$R = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \quad (2)$$

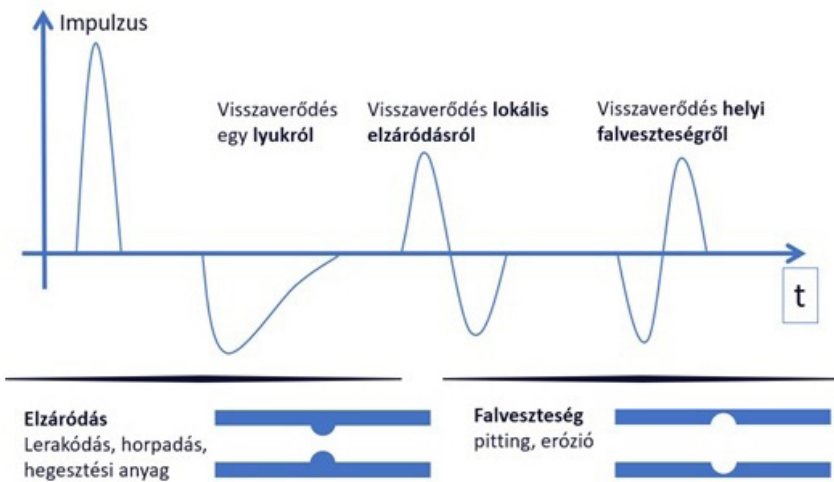
és az átviteli együttható T :

$$T = \frac{2 \cdot S_1}{S_1 + S_2}. \quad (3)$$

A (2)-es egyenletből látható, hogy a keresztmetszet növekedése ($S_2 > S_1$) negatív, míg a keresztmetszet csökkenése ($S_2 < S_1$) pozitív visszaverődést okoz. A hőcserélő csövekben az olyan tipikus hibák, mint az eltömődések és a falvesztések a keresztmetszet lokális változásait okozzák. Egy tipikus eltömődés két egymást követő szakadástól áll: (a) a keresztmetszet csökkenése az eltömődés kezdeténél és (b) a névleges keresztmetszethez való visszatérés ott, ahol az eltömődés véget ér. A falvesztéses hiba ennek az ellenkezője: a keresztmetszet növekedése, majd csökkenése. Továbbá a visszavert impulzus amplitúdóját az R reflexiók együttható értéke határozza meg, így az S_2 meghatározására is használható, ha S_1 ismert. E hibák elméleti jeleit az 1. ábra mutatja be.

A (2)-es egyenletből arra lehet következtetni, hogy az eltömődés és a falvesztés hibáiból származó visszaverődések tipikus jelekkel rendelkeznek. Feltételezve, hogy egy pozitív impulzust bocsátunk ki a csőbe, amikor az elzáródással találkozik, először pozitív visszaverődést okoz, amelyet negatív követ, míg a falvesztés hibája ennek ellenkezőjét okozza: negatív impulzust, amelyet pozitív követ.

Az 1. ábrán látható impulzusok a gerjesztő impulzus sematikus képét mutatja. Az APR-rendszer axiális felbontásának növelése érdekében az ideális impulzus a lehető legkeskenyebb kellene, hogy legyen. Ennek oka, hogy



1. ábra: A leggyakoribb hibák elméleti jellemzői [4]

meg kell különböztetni a közeli hibákból származó visszaverődéseket. Ha például az impulzus túl széles, akkor az eltömődés elejéről származó pozitív visszaverődés összeolvadhat az eltömődés végéről származó negatív visszaverődéssel, és így gyakorlatilag nagy részben kioltják egymást. Az alapvető Fourier-elmélet szerint ahhoz, hogy az időtartományban keskeny impulzust kapjunk, annak spektrumának a lehető legszélesebbnek kell lennie. A sáv szélesség tényleges korlátját az impulzust létrehozó fej és az (1)-es egyenletben szereplő első határfrekvencia határozza meg. A vizsgálatokhoz a Sonic V APR mérőberendezést alkalmaztuk. Ennek a rendszerében az impulzus spektruma körülbelül 8 kHz-ig terjed, amely azt jelenti, hogy a 2 cm-nél kisebb távolságban lévő hibák nem különböztethetők meg egymástól. Ezenkívül a felbontás a csillapítás miatt fokozatosan csökken a csőben haladva, mivel a magasabb frekvenciák gyorsabban lecsengenek, mint az alacsonyabb frekvenciák. Így a távolabbi hibák visszaverődései az időtartományban ellaposodnak.

2.2 A gerjesztő impulzus optimalizálása

Egy gyakorlati APR-rendszerben, mint minden fizikai rendszerben, mindig jelen van a háttérzaj. A zaj által okozott zavarok számszerűsítésére szolgáló általános mérőszám az SNR (Signal to Noise Ratio – jel és zaj aránya), amely egyszerűen a jel RMS (Root Mean Square, négyzetes közép) értéke osztva a zaj RMS értékével. Mivel sok jelnek nagyon széles a dinamikataromány, a jeleket gyakran logaritmikus decibel skálával fejezik ki. A jel és a zaj decibelben (dB) a következőképpen fejezhető ki:

$$\text{SNR}[\text{dB}] = 20 \cdot \log\left(\frac{A_s}{A_n}\right), \quad (4)$$

ahol A_s a jel (signal), A_n a zaj (noise) nagyságát jelöli. A 0 dB-nél nagyobb vagy 1:1-nél nagyobb arány szintén több jelet jelent, mint zajt. Az SNR növelése érdekében az átlagos jelamplitúdót a lehető legnagyobb mértékben növelni kell, bár az elérhető értéknek gyakorlati korlátjai vannak. Az impulzusszélesség növelése az egyik

lehetőség, azonban mint fentebb láttuk, ez hátrányosan hat a felbontásra. Egy másik lehetőség az impulzusmagasság növelése, bár az erősítő és a vizsgálófej képességei ezt a lehetőséget is korlátozzák.

A gőzfejlesztő hőcserélő csöveihez használt Sonic V vizsgáló berendezés egy másik módszert alkalmaz, amely egyesíti a mérés többszöri megismétlésének előnyeit, mégis néhány másodpercre csökkenti a mérési időt. Ez a módszer egy "maximális hosszúságú szekvenciának" (MLS – Maximal Length Sequence) nevezett jel használatán alapul, amely egyfajta álzaj, s mely kizárólag +1 vagy -1 értékekből áll [5]. Az MLS-szekvenciák elmélete jól ismert, és más alkalmazásokban is használják. Egy MLS sorozat mindig $2N-1$ hosszúságú, ahol N

egy egész szám. Például, ha $N=10$, akkor a szekvencia 1023 minta hosszúságú lesz, és egy tipikus 48 kHz-es mintavételi frekvencia mellett mindössze 23 ezredmásodpercet vesz igénybe az átvitel. $N=14$ esetén a szekvencia 16384 minta hosszúságú lesz, és az átvitel körülbelül 1/3 másodpercet vesz igénybe. Az N értéke a Sonic V rendszerben szoftveresen kiválasztható. Az alapbeállításban N 13-mal egyenlő, a mérés többszöri megismétléssel is a teljes mérési idő pár másodperc.

Az impulzusválasz kinyerése a mért MLS-jelből korrelációs számítást igényel. Matematikailag ez egy lineáris művelet, és így a rendszerben bármilyen nemlineáris torzítás hamis csúcsokat hoz létre az eredményül kapott jelben, amelyeket hibaként lehet félreértelmezni. Ebből adódóan nagyon fontos, hogy a nemlineáris torzításokat a lehető legkisebbre csökkentsük. Az ilyen torzításokra legérzékenyebb komponens a vizsgálófejben lévő adó, amely nagy amplitúdók esetén nemlineáris válik. Ezért a gerjesztő jellel szemben két ellentétes követelmény áll fenn: egyrészt előnyös a jel amplitúdójának növelése az SNR növelése érdekében, másrészt azonban a túl nagy mértékű növelése nemlineáris torzításokhoz vezet. Az optimális amplitúdó az, amelynél a nemlineáris zaj és a háttérzaj egyensúlyban van, ezáltal az SNR optimális értéke érhető el.

3. A Sonic V vizsgáló eszköz bemutatása

A demonstrációs vizsgálat során a Sound Wave Inspection Systems által kifejlesztett Sonic V rendszert alkalmaztuk az APR vizsgálatok elvégzésére, amely rendszer egy innovatív, nem traverzáló technológiát alkalmaz a csövek belső átmérőjének az ellenőrzésére. Célja, hogy rendkívül gyors és pontos eredményeket szolgáltatson a mai kihívást jelentő üzemeltetési munkákhoz az olaj- és gázipar, a vegyipar, az energiatermelés és más szomszédos iparágak számára. Az APR módszerrel működő rendszert úgy tervezték, hogy csőformától és anyagtól függetlenül minden csőtípusban az összes belső felületi hibát érzékelni tudja. A Sonic V egy fejlett, mégis könnyen kezelhető eszköz, amely sokkal kevesebb kezelői

követelményt és minimális képzést igényel a rendkívül hatékony ellenőrzés érdekében. Az eszköz könnyű, kis mérete miatt jól hordozható, akkumulátorral működik, továbbá mivel nem rendelkezik kábelekkal és kalibráló csövekkel, a Sonic V egyszerűen kezelhető. Ha szükséges, akkor akár egy teljes csőrendszer rövid idő alatt ellenőrizhető, mivel rendkívül gyors az eszköz adatgyűjtése.

A termék magában foglalja a 2. ábra által szemléltetett elemeket, ide sorolható maga a Sonic V mérőberendezés, a két Li-ion akkumulátor és a hozzájuk tartozó külső töltő, a hálózati töltő, amely tápegységként (akkumulátorral/akku nélkül) vagy külső töltőként is használható, illetve az adapterek.



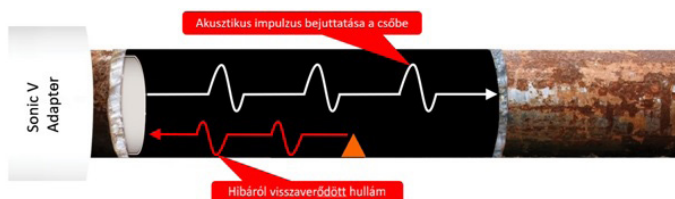
2. ábra: Sonic V részei [6]

A csomag összesen 13db különböző méretű adaptert tartalmaz, amelyek segítségével 6mm-től 52mm belső átmérőig minden csőméret vizsgálható. Ezek kialakítását a 3. ábra mutatja be.

A berendezés működési elvét a 4. ábra szemlélteti. Erről jól leolvasható, hogy a mérőeszköz adaptere egyszerre két feladatot lát el, az adó és a vevő szerepét. Első lépésben megtörténik az akusztikus impulzus jel bejuttatása a



3. ábra: Adapter méretváltózatok [6]



4. ábra: Sonic V működési elve [4]

csőbe. A hibákról visszaverődött jeleket a vevő detektálja és rögzíti, a későbbiekben pedig algoritmusok segítségével a belső átmérőn található hibák helye, típusa és mérete meghatározható.

3.1 A Sonic V vizsgáló berendezés előnyei és korlátjai

Ideális esetben egy csőellenőrzési technikának több kulcsfontosságú tulajdonsággal kell rendelkeznie: rendkívül fontos a nagy érzékenység és pontosság, ugyanakkor a kezelőtől függetlenül magas szintű konzisztenciát kell biztosítani. A rendszer kialakításának lehetővé kell tennie a rövid vizsgálati időt, miközben objektív és rendkívül következetes adatértelmezési kritériumokat kell biztosítani, és a csőanyagok és -méretek széles skálájára alkalmazhatónak kell lennie. Végezetül a rendszer megfelelő és következetes alkalmazásához minimális műszaki ismeretekre és tapasztalatra van szükség.

Ezeknek megfelelően a Sonic V APR-rendszer kifejlesztése során számos alapelvet figyelembe vettek a technológiai döntéseknél:

1. Nem szükséges a csővezeték belsejében szondával végighaladni
2. Csőenkénti rövid vizsgálati idő
3. A hőcserélők csőveiben jellemzően előforduló összes belső felületi hiba felderítése
4. Minimális érzékenység a cső anyagára, méreteire és konfigurációjára
5. Minimális függés a kezelő megítélésétől

Ezen berendezés számos előnnyel rendelkezik:

- Nagy sebességű vizsgálat:
 - A csőenként 10 másodperces vizsgálat 100%-os lefedettséget tesz lehetővé a mintavételezéssel szemben ugyanannyi rendelkezésre álló vizsgálati idő alatt
 - A leggyorsabb szivárgásérzékelő eszköz például vészleállások során
- Számos cső típusra alkalmazható:
 - Nem függ az anyagtól: APR-rel bármilyen anyag vizsgálható (ferromágnes, nem ferromágnes, grafit, műanyag)
 - Nem függ a cső alakjától (beleértve az egyenes, az U-alakú, a spirál-, lamellás ventilátorcsöveket stb.)
 - Nagy átmérőjű csövek, például kazánok is vizsgálhatók vele (maximum 52mm-ig)
 - Bonyolult geometriák esetén is alkalmazható
- Nagyon érzékeny a lyukakra és az elzáródásokra (a lyukaknak és a falvesztésnek külön jelei vannak), ezáltal könnyen kimutatja ezen hibákat. Képes érzékelni a különböző falvesztései hibákat (erózió, korrózió, pitting)
- Könnyű használat:
 - Az adatgyűjtés elvégezhető egy minimális képzéssel rendelkező kezelő által
 - Következetes, megismételhető eredmények
 - Automatikus csőlemez-térképezés
 - Automatizált mérési folyamat, nem függ a kezelőtől

- Képes az eltömődések számszerűsítésére.
- A hanghullámokat "virtuális érzékelőként" használja a nem áthaladó vizsgálatához. Nincsenek olyan alkatrészek, amelyek megakadhatnak, megsérülhetnek, illetve a vizsgált berendezést se károsítja
- Akkumulátorral és hálózatról is működtethető
- Nincs szükség fogyóeszköz készletre vagy etalonokra

A Sonic V érzékelési korlátait az alkalmazott impulzus jellege, elsősorban a legmagasabb frekvenciájú spektrumkomponens határozza meg, amely a rendszer felbontását is megszabja. A Sonic V vizsgáló rendszer esetében ez a felbontás 20 mm és 30 mm között van. Ez azt jelenti, hogy két azonos típusú indikáció közötti tengelytávolságnak nagyobbnak kell lennie, mint a rendszer felbontása ahhoz, hogy ezeket a hibákat különálló indikációként lehessen felismerni. Ellenkező esetben egy indikációként lesznek azonosítva, ahol a keletkező jel mérete a hibaméretnek szuperpozíciójaként fog megjelenni. Továbbá, mivel az APR rendszer által használt hullámok lapos frontúak, a rendszer nem rendelkezik kerületirányú felbontással, és nem lehet meghatározni az észlelt indikáció szöghelyzetét. A vizsgáló berendezés további korlátjai a következők:

- Cső hossza:
 - A csövek 20 m-ig ellenőrizhetők
 - Ha a csövek hosszabbak, mindkét oldalról el kell végezni a vizsgálatot
- Nem képes a tisztán külső hibák és repedések észlelésére
- Az összesített vizsgálati eredmény a csövek tisztaságának szintjétől függ
 - Általában az alkalmazástól függően az örvényáramos vizsgálathoz elvégzett csőtisztítás megfelelő tisztaságot biztosít
 - Ha a tisztítás idő és/vagy a költség miatt nem megoldható, akkor a csöveket mindenképpen levegővel át kell fúvatni, hogy a lyukakat és az eltömődéseket detektálni lehessen
 - A falvesztési hibák nem kerülnek kimutatásra a szennyezett csövek esetében
- Kisebb pontosság a kis falvesztéses hibák (pitting) méretezésénél
- Nem biztosít kerületirányú felbontást

Az indikációk észlelési korlátait a különböző hibatípusok esetében az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: APR észlelés korlátjai a hiba típusától függően

Hiba típusa	APR észlelés alsó határai
Falon átmenő lyukak	0,5 mm-nél nagyobb átmérő (egyes esetekben kisebb) észlelhető
Belső falvesztés	a falvastagság 20 %-ánál nagyobb falvesztés, ahol a hiba átmérője nagyobb, mint 5 mm
Elzáródások	Belső keresztmetszeti terület nagyobb vagy egyenlő, mint 5 % (egyes esetekben kisebb)

4. A Paksi Atomerőműben végzett demonstrációs vizsgálatok bemutatása

A demonstrációs APR vizsgálatokat a Paksi Atomerőmű Karbantartási Gyakorló Központjában található gőzfejlesztőn végeztük el. Az atomerőművi gőzfejlesztők olyan speciális hőcserélők, ahol a hőátadás az energiát termelő fűtőelemekkel érintkező, radioaktív primerkörü technológiai víz és a turbinák felé áramló, nem radioaktív szekunderkörü víz között történik meg.

A gőzfejlesztő szénacélból készült, fekvő elrendezésű hengeres hőcserélő, „U” alakú hőátadó csőkötegekkel, beépített gőzszeperáló szerkezetekkel, tápvízelosztó rendszerrel és gőzkollektorral. A primerkörü bóros víz a hőátadó csöveken belül áramlik, a telített gőz fejlesztése a szekunder oldalon a csövek közötti köpenytérben megy végbe [5].

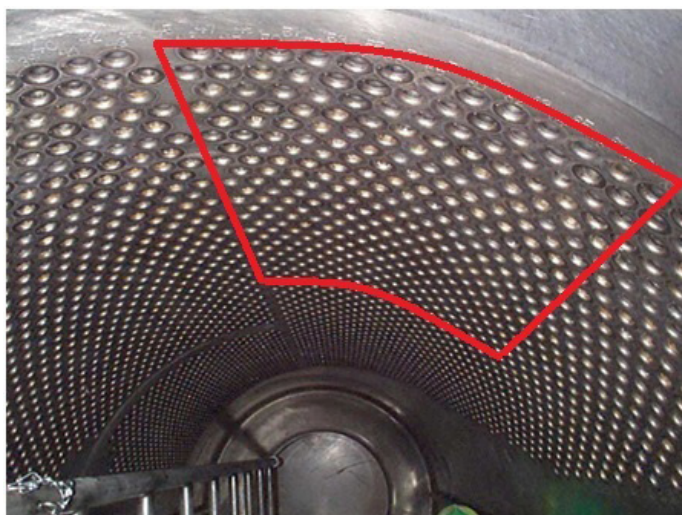
A gőzfejlesztő hőátadó felülete 5536 db, átlagosan kb. 12,5 m hosszú U-alakú, vízszintesen elhelyezett, 08H18N10T típusú korrózióálló acél csőből áll, amelyeknek külső átmérője Ø16 mm, falvastagsága pedig 1,5 mm. A gőzfejlesztő legfontosabb tervezett üzemi paramétereit a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: A gőzfejlesztő legfontosabb tervezett paramétereit [6]

Megnevezés	Érték
Gőztermelés [t/h]	~490
A primerkörü hőhordozó hőmérséklete a gőzfejlesztőbe történő belépéskor [°C]	298
A primerkörü hőhordozó hőmérséklete a gőzfejlesztőből való kilépéskor [°C]	270
A primerkörü hőhordozó nyomása [MPa]	12,3
A gőz nedvességtartalma a gőzfejlesztő kimenetén [% max.]	0,25
A gőzfejlesztő szekunderkörü folyamatos lefűtásának mennyisége (a gőztermelés %-ban) [%]	0,5
A gőzfejlesztő hőátadó felülete [m ²]	2578,6
A tápvíz hőmérséklete [°C]	223
Szekunderkörü tervezési nyomás [MPa]	5,65
Primerkörü tervezési nyomás [MPa]	13,7
Szekunderkörü tervezési hőmérséklet [°C]	270

Ahogy a 2. táblázat szerint is látható, a primerkörü hőhordozó üzemi nyomása jelentősen meghaladja a szekunderkörü víz tervezési nyomását, ennek következtében a csővezetékek átlukadása esetében a radioaktív primerkörü víz a szekunder körbe áramlana, amely az üzemzavari védelmi mechanizmusok elindulásához és nem tervezett blokkleálláshoz vezethetne.

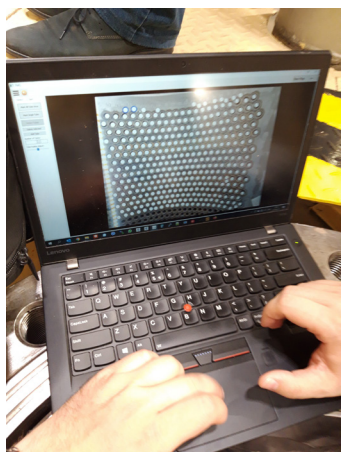
Ennek az elkerülése érdekében bizonyos időközönként megtörténik a gőzfejlesztő hőcserélő csöveinek örvényáramos felülvizsgálata, amely azonban időigényes vizsgálati eljárás. Ennek csökkentése érdekében került sor az APR vizsgálatra a gőzfejlesztő 527 db csővezetékéből álló, felső szegmense esetében. A gőzfejlesztő vizsgált szegmensét az 5. ábra mutatja.



5. ábra: A primerköri gőzfejlesztő kollektor vizsgált szegmense



8. ábra: A gőzfejlesztő hőcserélő csöveinek APR vizsgálata



6. ábra: A térképezés folyamata



7. ábra: Az APR vizsgáló berendezés

5. Az elvégzett demonstrációs APR vizsgálatok bemutatása

Az APR vizsgálatot az előzőekben ismertetett gőzfejlesztőn 2022. szeptember 27-én végeztük el a gőzfejlesztő 527 db primerköri csővezetékén, amelyek a gőzfejlesztő felső szegmensén helyezkedtek el, mivel ezeknek a csővezetékeknek az esetében lehetett számítani a legnagyobb valószínűséggel valamilyen fajta, az APR vizsgálati eljárással detektálható károsodásra. Ezen felül ezek a csővezetékek voltak a legkönnyebben hozzáférhetőek is.

Az APR vizsgálat megkezdése előtt a csövekbe beilleszthető tapintós hőmérővel megtörtént a csővezetékek belső hőmérsékletének a meghatározása, mivel a vizsgálati hőmérséklet befolyásoló tényező lehet a vizsgálat eredményére. A csővezetékek belső hőmérséklete a vizsgálatok időtartama alatt 23 °C volt, amely szobahőmérsékletű vizsgálatnak felel meg. Az APR vizsgálatok elvégzése a vizsgált szegmensről készülő térképezéssel, valamint a csővezetékek legfontosabb alapadatainak a megadásával kezdődött. A vizsgálatok elvégzése a SONIC V vizsgáló készülékkel történt, amelynek fontosabb tulajdonságai a korábbiakban már ismertetésre kerültek. A térképezés

laptopon történő elvégzését a 6. ábra, a vizsgáló készüléket, valamint a különböző csőátmérőkhöz tartozó adaptereket a 7. ábra, az APR vizsgálat elvégzését pedig a 8. ábra szemlélteti.

A vizsgálatok elvégzése a következő küszöbértékek mellett történt:

- Dugulásos keresztmetszet csökkenés: 5,0 %,
- Lokális eróziós vagy pitting korróziós falvesztés: 20,0 %.

5.1 A vizsgálatok eredményei

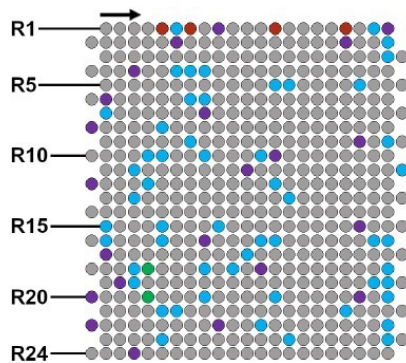
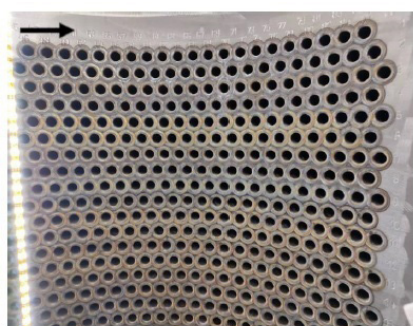
Az elvégzett APR vizsgálatok eredményei alapján a gőzfejlesztő vizsgált szegmensén dugulás 22 csővezeték esetében volt detektálható, amelyek közül 7 esetben a csővezeték teljes eldugulása volt megállapítható. Ezen felül korróziós falvesztés 58 csővezeték esetében volt kimutatható, ezek közül 56 esetben a falfogyás mértéke 20 és 40 % közé, míg 2 csővezetéknel 41 és 60 % közé esett. 4 csővezeték esetében teljes átlukadás volt detektálható.

A gőzfejlesztőn elvégzett vizsgálatok eredményeit a 9. ábra mutatja, ahol a szegmens bal felső sarkában látható nyíl a csővezetékek vizsgálati irányát, az R (Row) a csővezeték sorának a számát, a jelmagyarázatban a bal oldalon szereplő számok pedig az érintett csővezetékek darabszámát jelentik.

5.2 Az eredmények értékelése

Ugyan az APR vizsgálat érzékeny a csővezetékek tisztaságára, a vizsgált gőzfejlesztő csövei megfelelő tisztaságúak voltak, a vizsgálat gördülékenyen elvégezhető volt, egy csővezeték esetében sem volt szükség utólagos tisztításra és ezt követően a vizsgálat megismétlésére. Azoknak a csővezetékeknek az esetében, ahol eldugulás volt detektálható, egy konkrét helyről érkezett dugulásra utaló indikáció, míg a nem megfelelő tisztaságú csővezetékek esetében nagy területen lehetne detektálni lerakódást.

A mérések elvégzése előtt a vizsgálatra való felkészülést valamelyest lassította, hogy a csővezetékek pozícióját a berendezéshez tartozó szoftver nem volt képes automatikusan felismerni, mivel a csővezetékek egymáshoz képesti



0	●	Eldugózott	56	●	20% < falvesztés < 40%
0	○	Nem vizsgált	2	●	40% < falvesztés < 60%
445	●	Nem detektált hibát	0	●	60% < falvesztés < 80%
4	●	Lyukadás	0	●	81% < falvesztés ≤ 100%
			22	●	Eldugulás

9. ábra: A gőzfejlesztő vizsgált szegmensének vizsgálati eredménye a szegmens 2D térképén megjelenítve

elhelyezkedése nem felelt meg tökéletesen egyik beépített mintázatnak sem. Ennek következtében a térképezést manuálisan kellett elvégezni, egy pár csővezeték esetében a cső koordinátáit külön-külön kellett bevinni, aminek elvégzésére azonban a vizsgáló eszköz lehetőséget biztosít. A térképezés így körülbelül 30 percet vett igénybe.

Egy hőcserélő csővezeték elméleti vizsgálati ideje 2 másodperc, amely alatt a vizsgáló berendezés 10 párhuzamos mérést végez el. A 10 párhuzamos mérés eredménye együttesen kerül értékelésre. A gyakorlatban egy csővezeték vizsgálata az eszköz ki- és behelyezésével együtt átlagosan körülbelül 15 másodpercre adódott, ami alapján rendkívül gyors vizsgálatnak tekinthető.

A vizsgálat operatív része viszonylag monoton, ennek következtében nagyobb az emberi tévesztés lehetősége, a vizsgálatot végző ember eltévesztheti, hogy melyik csövet vizsgálta már meg. Ennek elkerülése érdekében a vizsgáló berendezés a vizsgálat közben folyamatosan követi az előzetesen elkészített csővezeték-térkép alapján a vizsgálatot, és jól észlelhető hangjelzéssel jelzi, amennyiben egy cső kimaradna vagy nem tervezetten többször kerülne megvizsgálásra.

A csővezetékek U-alakú geometriája nem zavarta a vizsgálatot, a csövek görbülete, valamint az alátámasztások nem voltak hatással a vizsgálati eredményekre. A hajlatok és egyéb deformációk okozhatnak indikációkat a vizsgálat során, megfelelő szaktudással azonban ezek a geometriai indikációk megkülönböztethetők a különböző anomáliák okozta indikációktól.

A lerakódások és a korróziós falfogyások üzembiztosan detektálhatóak voltak, és pontos távolságuk is meghatározható volt a hőcserélő csövek kezdőpontjától mérve. A vizsgálati eredmények alapján az eszköz a már 5%-os keresztmetszet-csökkenéssel járó lerakódások detektálására is képes, ezen felül a berendezés képes lenne a lerakódásokat detektálni és üzembiztosan pozícionálni abban

az esetben is, ha egy csővezetéken belül több helyen, egymástól függetlenül is lennének dugulások. A vizsgált szegmensben ilyen módon károsodott hőcserélő csővezeték nem volt.

Teljes átlukadások a vizsgált szegmens legfelső sorában voltak detektálhatóak, összesen 4 csővezeték esetében, amely károsodásokat a berendezés szintén üzembiztosan képes volt detektálni és megadni a lyukadások pontos pozícióját.

A vizsgálatok közben szerzett tapasztalatok és a gőzfejlesztőn végzett APR vizsgálatok eredményei alapján a vizsgálati módszer alkalmas kimutatni a hőcserélő csövek különböző, belső anomáliáit, és a csővezeték hosszirányú tengelye mentén megfelelő irányban megadni azoknak a távolságát a csövek kezdőpontjától. A hőcserélő csövek külső felületéről induló, átlukadást még nem okozó károsodásokat a vizsgáló berendezés a vizsgálat jellegéből adódóan nem képes detektálni.

6. A vizsgálati eljárás alkalmazhatósága a gőzfejlesztő csővezetékei esetében

A vizsgálatok közben szerzett tapasztalatok és a vizsgálati eredmények alapján megtörtént a vizsgálati eljárás alkalmazhatóságának az elemzése a gőzfejlesztő hőcserélő csöveinek vizsgálata esetében. Ugyan az APR vizsgálati technika érzékeny a csővezetékek tisztaságára, a gőzfejlesztők csővezetékeinek megfelelő tisztasága garantálható, mivel az atomerőművek hőátadó közegei jellemzően nagy tisztaságúak. Az APR technika 6-52 mm-es belső átmérő esetében nem igényel a csőátmérőhöz szorosan illeszkedő alkatrészt, a nukleáris iparban alkalmazott hőcserélők csöveinek belső átmérője pedig jellemzően ebbe a tartományba esik. A vizsgálati módszer jól alkalmazható a csővezeték belső anomáliáinak detektálására és pontos helyének megadására a csőhossz mentén, ugyanakkor a külső felületről induló károsodások detektálására nem alkalmas. Az atomerőművi gőzfejlesztők esetében ugyanakkor a primerköri hőcserélők külső károsodásával is számolni kell, mivel a csővezetékek külső felülete érintkezik a szekunderköri hőhordozóval, amely szintén korrodálhatja a hőcserélő csövek külső felületeit.

A vizsgálati eljárás a belső korróziós falvesztés 20 %-át meghaladó károsodást már képes detektálni, és mivel a hazai atomerőművek 5 éves vizsgálati ciklusideje viszonylag rövid más iparágakhoz képest, ennek következtében a károsodás detektálásának 20 %-os küszöbértéke elegendő lehet.

Mivel a gőzfejlesztőknek akár az összes csőve rövid idő alatt megvizsgálható - csővenként legfeljebb 15-20 másodperc jól megközelíthető csövek esetében - majd az eredmények is viszonylag hamar, 24 órán belül kiértékelhetők, szűrővizsgálatra rendkívül alkalmas a technika. A

szoftver az eredmények alapján képes a teljes hőcserélő összes csövét a feltárt anomáliákkal együtt egy szemléletes csőterképen is megjeleníteni, ez nagyban segítheti további vizsgálatok vagy egyéb intézkedések felőli döntés meghozatalát.

A nukleáris ipari hőcserélők esetében, mivel külső korróziós károsodásra is számítani lehet, nem javasolt az APR vizsgálati eljárás önálló alkalmazása, ugyanakkor az örvényáramos vizsgálati technika jó kiegészítő vizsgálata lehet. Amíg az örvényáramos vizsgálatokkal a tervezett 5 éves ciklusonként jelenleg a gőzfejlesztők csöveinek 50%-ának a vizsgálata történik meg, addig ez alatt az idő alatt APR vizsgálati eljárással a csővezetékek 100%-ának a vizsgálata elvégezhető.

Mindkét vizsgálati technika képes arra, hogy a feltárt anomáliáknak a vizsgált cső hossz tengelye mentén való elhelyezkedését is megállapítsa. A két módszer azoknak a károsodásoknak az esetében, amelyekre mindkét módszer érzékeny (pl. belső, nagy arányú korróziós falfogyás) validálhatja is egymás eredményeit.

Mivel a gőzfejlesztő csővezetékeinek esetében külső korrózióra is számítani lehet, az APR vizsgálatot örvényáramos vizsgálattal kombinálva javasolt alkalmazni, ebben az esetben javasolt, hogy az örvényáramos eszköz beállításánál a külső korrózió detektálására és méretezésére legyen optimalizálva a vizsgáló berendezés.

Az APR vizsgálati eljárás legfőbb előnye más roncsolásmentes eljárásokkal szemben a vizsgálatok rövid időtartalma. Ezáltal a vizsgálatot végző szakembereknek minimális időt kell a sugárzó térben tölteniük, ugyanakkor üzemben lévő gőzfejlesztők esetében olyan erős helyi sugárzással kell számolni, hogy a teljes gőzfejlesztő vizsgálatának elvégzése kizárólag manipulátorral javasolt, a vizsgáló berendezés lehetőséget is biztosít a megfelelően kialakított manipulátorra való felszerelésre.

Az elvégzett demonstrációs vizsgálat eredményei és a vizsgálati tapasztalatok alapján az APR vizsgálati technikával a gőzfejlesztő csővezetékeinek belső károsodásai üzembiztosan kimutathatóak voltak, a vizsgálati módszer az örvényáramos vizsgálatok jó kiegészítő vizsgálata lehet.

7. Összefoglalás

A feldolgozott vonatkozó szakirodalmak, valamint az elvégzett demonstrációs vizsgálatok eredményei alapján a következő megállapítások tehetők:

- Az APR vizsgálati eljárással a hőcserélő csövek belső károsodásai üzembiztosan kimutathatóak.

- A vizsgálati módszer érzékeny a csővezetékek tisztaságára, az atomerőművi gőzfejlesztők esetében azonban ez nem korlátozza a vizsgálatok elvégezhetőségét a nagy tisztaságú hűtőközegek révén.
- A vizsgálat rövid idő alatt elvégezhető és kiértékelhető, így lehetőség van a gőzfejlesztő minden csővezetékeinek vizsgálatára is.
- A gőzfejlesztők csővezetékeinek külső korróziójára is számítani lehet, ennek következtében az APR eljárást az örvényáramos vizsgálat kiegészítő vizsgálatként javasolt alkalmazni.
- A vizsgálati módszer legfőbb előnye más roncsolásmentes vizsgálati technikákkal szemben a vizsgálat rövid időtartalma, így szűrővizsgálatra, valamint az örvényáramos vizsgálat kiegészítő vizsgálatára kiválóan alkalmas eljárás.

Köszönetnyilvánítás

A TKP2020-NKA-18 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2020-4.1.1-TKP2020 program finanszírozásában valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] G. Kirchhoff: On the influence of heat conduction in a gas on sound propagation, Annual Review of Physical Chemistry. 134,177-193(1868)
- [2] D. H. Keefe: Acoustical wave propagation in cylindrical ducts: Transmission line parameter approximations for isothermal and nonisothermal boundary conditions, Journal of the Acoustical Society of America, 75, 58-62 (1984)
- [3] Omar A. Aldughayem: Acoustic pulse reflectometry for potential industrial applications, Doctoral Thesis (2018)
- [4] Sound Wave Inspection Systems, prezentáció, www.swis.ltd (letöltés ideje: 2022.10.17.)
- [5] J. Borish, J. B. Angell, An Efficient Algorithm for Measuring the Impulse Response Using Pseudorandom Noise, J. Audio Eng. Soc., vol. 31, pp. 478-489 (1983)
- [6] A vizsgáló berendezést gyártó Sound Wave Inspection Systems hivatalos honlapja: <https://www.swis.ltd/product> (letöltés ideje: 2022.10.17.)
- [7] Czibula Mihály vezető mérnök Paksi Atomerőmű Zrt. Anyagvizsgálati Osztály előadása, 4. Anyagvizsgálat a Gyakorlatban Szakmai Szeminárium, 2008. Június 4-5 – Aranyhomok Hotel, Kecskemét, <https://slideplayer.hu/slide/1916713/>
- [8] A Paksi Atomerőmű gőzfejlesztőkkel kapcsolatos dokumentált és tacit tudás mentése. MVM ERBE Zrt. 2017. június 20.

LMD technológia modellezési lehetőségei

Modelling options for LMD technology

Kiss László^a, Juhász Gergely^b, Csitkó Zsolt^c

^{a,b,c} Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

^a junior kutató, laszlo.kiss@bayzoltan.hu

^b laborvezető, gergely.juhasz@bayzoltan.hu

^c tudományos munkatárs, zsolt.csitko@bayzoltan.hu

Kulcsszavak

additív gyártás,
3D fémnyomtatás,
LMD,
lézerhegesztés,
végelemes modellezés

Keywords

additive manufacturing,
3D metal printing,
LMD,
laser welding,
finite element modelling

Absztrakt

Napjainkba egyre inkább előtérbe kerülnek az additív gyártástechnológiák, amelyek egyik jelentős technológiája az LMD eljárás. A gyártási folyamat során az alkatrészekben a gyors felmelegedés és megszilárdulás miatt alakítható eltérések és anyagfolytonossági hiányok jöhetnek létre. Ez a cikk a geometria változását előre meghatározni képes modellezési lehetőségeket vizsgálja. A vizsgálatok hitelességét mérési eredmények igazolják. A falon ciklikus tágulások és zsugorodások láthatóak, a szélek befelé hajlanak. A kísérleti és a numerikus eredmények összehasonlításai jó egyezést mutatnak a minta hosszirányában, de a magasság irányában eltérés figyelhető meg, amely a bemeneti paraméterek változásával magyarázható. Ez a felfedezés megfelelő kiindulási alapot jelent további kutatások elvégzésére.

Abstract

Nowadays, additive manufacturing technologies are becoming more and more prominent, and one of the promising technologies is the LMD process. During the manufacturing process, parts can develop dimensional deviations and material discontinuities due to rapid heating and solidification. This article explores modelling options that can predict geometry variation. The validity of the investigations is confirmed by measurement results. Cyclic expansions and contractions are observed in the wall, with the edges inclined inwards. Comparison of experimental and numerical results shows good agreement in the longitudinal direction of the specimen, but a deviation in the height direction, which can be explained by variations in the input parameters. This finding provides a good starting point for further research.

1. Bevezetés

Az anyag termékké formálásának lehetséges eljárásai mindig is kulcsszerepet játszottak az emberi civilizáció fejlődésében. Napjainkban egyre nagyobb teret hódítanak és dinamikus ütemben terjednek az additív eljárások [1]. A legnagyobb előnyük, hogy olyan geometriákat hozhatunk létre az alkalmazásukkal, amelyekre korábban nem volt lehetőségünk. Kötöttségek tűnhetnek el a gépészeti világból, amelyek teljesen új irányba terelhetik a fejlesztéseket. Persze itt nem maga a gép vagy az eljárás a lényeg, hanem az elvégzett szellemi munka hozzáadott értéke. Éppen ezért a tervezés területén is teljes szemlélet váltásra van szükség.

A fémek additív megmunkálására is számos versenyképes megoldás terjedt már el a gyakorlatban. Ennek egyik ígéretes megvalósítása az LMD (Laser Metal Deposition) eljárás [2]. Jelenleg a technológia legnagyobb problémáját a gyártás során bevitt változó hőciklusokból adódó deformációk és maradó feszültségek jelentik. A kész alkatrész mechanikai és geometriai tulajdonságaira nézve sajnos nehezen tisztázható a paraméterek hatása. Azonban a technológiában rejlő lehetőségek miatt hatalmas potenciál látható a terület kutatásában.

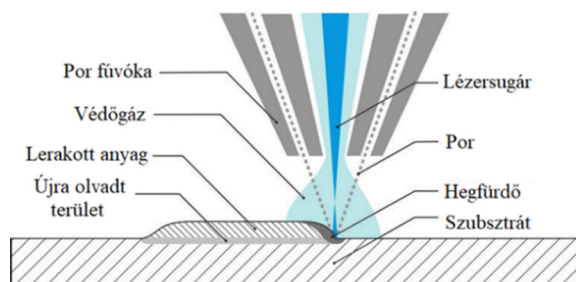
A kutatás a GINOP-2. 3.4-15-2016-00001 kódszámú projekt keretében valósult meg, amelynek címe: Globális jelentőségű járműipari kutatás fejlesztési központ létrehozása Magyarországon a Bay Zoltán Közhasznú Nonprofit Kft. a Neumann János Egyetem és az AVL Hungary Kft. együttműködésében. A korszerű gyártástechnológiák alprojekt célja a korszerű ipari lézertechnológiák autóiipari alkalmazási lehetőségeinek kutatása, különösen a 3D fémnyomtatás (additív gyártás) legújabb kutatás-fejlesztési eredményeinek autóiipari alkalmazásokhoz való implementálása és validálása. Új, eddig nem használt technológiák, eljárások bevezetési lehetőségeinek vizsgálata és elsőként való alkalmazása.

2. Az LMD eljárás ismertetése

Az LMD rövidítés az angol Laser Metal Deposition elnevezésből származik. A kifejezésnek magyar megfelelője nincs, lézerrel történő fém lerakásnak fordítható. A technológia fiatalságát jól szemlélteti, hogy nincsenek még egységes elnevezések. Több különböző kifejezést is használnak lényegében ugyanannak a technikának a megnevezésére. Ilyenek például a Laser Cladding, Laser Engineered Net Shaping (LENS), Directed Light Fabrication (DLF), Laser Direct Metal Deposition (LDMD) [2].

Az LMD technológia során a lézersugár felmelegíti helyileg a munkadarabot, hegfürdőt hozva létre. Ebbe az olvadék tócsába történik a por alapanyag bevezetése, egy - a lézerrel koaxiális fúvókán - keresztül inert gáz segítségével. A por már olvadt formában kerül bele a hegfürdőbe, amelyet szilárd anyag vesz körül. Ez teszi lehetővé a felületi feszültség révén az anyag felülről történő lerakását. A hegfürdő megszilárdulásával jönnek létre a lerakott rétegek. Tehát a folyamat felfogható sok-sok varrat egymásra hegesztéseként. A folyamat sematikus ábrázolását az 1. ábra szemlélteti.

Additív gyártással létrehozott alkatrészek minősége nagyban függ az alkalmazott hozaganyag tulajdonságaitól. LMD eljárás esetén porok és huzalok állnak rendelkezésre, de összességében elmondható, hogy a porok alkalmazása lényegesen gyakoribb [3].



1. ábra: Az LMD folyamat sematikus ábrázolása [4]

2.1 A kísérleti berendezés bemutatása

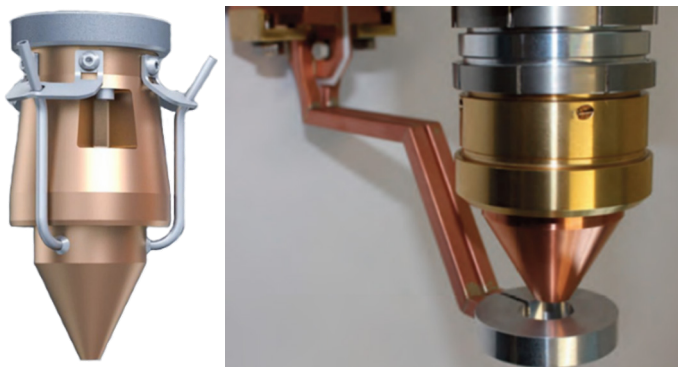
A Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. ipari lézertechnológia kutatás-fejlesztési tevékenysége már 25 éves múltra tekint vissza. A budapesti telephelyen egy Trumpf TLF 5000 turbo gyártmányú széndioxid gázlaser található. A pályázat keretein belül a cég kecskeméti telephelyén beszerzésre került egy lényegesen modernebbnek mondható Trumpf Trulaser Cell 7020 típusú berendezés, amelyen a mintadarabok legyártásra kerültek. A 2. ábrán látható a berendezés és a hozzá tartozó GTV 2/2 CF típusú poradagoló egység.



2. ábra: Trumpf Trulaser Cell 7020 típusú berendezés és a hozzá tartozó GTV 2/2 CF elvezetésű poradagoló egység

A berendezés sugárforrása egy 4 kW-os teljesítményű szilárdtest sugárforrás. A berendezéshez két darab vágófej, egy hegesztő fej és egy lézersugaras felrakóhegesztésre alkalmas fej tartozik. Ezen kutatásban a lézersugaras felrakóhegesztésre alkalmas fej került alkalmazásra, mivel ez alkalmas az LMD technológia megvalósítására. Az alkalmazott fej a 3. ábrán látható.

A fény vezetése a sugárforrásból optikai szálon keresztül történik tükrök segítségével. A szál dual-core kialakítású, amely azt jelenti, hogy két mag található a számban. A külső mag (köpeny) átmérője 400 μm , a belső mag átmérője 100 μm .

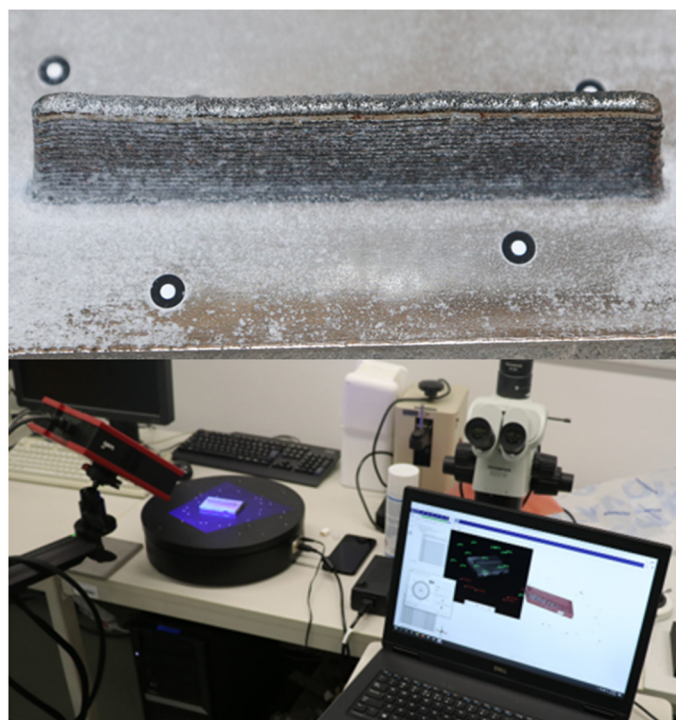


3. ábra: A lézersugaras felrakóhegesztésre alkalmas fej és 3D modellje

3. A kísérleti minta tulajdonságai

Ez a kutatás egy LMD eljárással készült 65 mm hosszú több réteg felhegesztésével létrehozott fal vizsgálatára irányul. A gyártási folyamat során 316L jelű rozsdamentes ausztenites acélpor került alkalmazásra, argon védőgáz használatával. Az alaplap, amelyre a minta került egy előmelegítés nélküli 8 mm vastagságú S235 típusú tábla.

A vizsgált fal 20 rétegből épül fel, melyek lerakása között 30 másodperc hűtési idő telt el, a rétegek közötti kiemelés pedig 0,5 mm. LMD technológia esetén létrejött minták geometria hűségét és különböző paramétereit számos tényező együttes hatása határozza meg [5]. Ezek a tényezők az alábbiak: sugárforrás teljesítménye (W), előtolás sebessége (m/min), por tömegárama (g/min), porvívő gáz sebessége (l/min), munkagáz sebessége (l/min), lézersugár üzeme (pulzáló/folyamatos), lézersugár folt mozgathatósága, lézersugár foltátmérője (mm). Az szerkezetépítés sikerességét leginkább a sugárforrás teljesítménye és az alkalmazott előtolási sebesség határozza meg. Ezek értéke 800 W és 0,9 m/min. A többi paraméter értéke rögzítve lett egy meghatározott értéken. A korábbi gyártási tapasztalatok felhasználásával a poradagoló fordulata 3 rpm, amely így 6,5 g/min portömegáramot biztosít. A porvívő gáz sebessége 7,5 l/min, a munkagáz sebessége 8 l/min. A fókuszolt átmérője végig 2 mm.



4. ábra: Az elkészített fal digitalizálása

A 4. ábra az elkészített fal és annak GOM Aramis rendszerrel történő vizsgálatát mutatja be. Megállapítható, hogy a fal szélei befelé hajlanak. A fal oldalán ciklikus táguások és zsugorodások láthatóak. A fal teteje enyhe U alakot mutat a torzulások következtében.

A digitalizáció eredményeképpen sikerült létrehozni a fal 3D modelljét, amely az 5. ábrán látható. Ez a modell már megfelelő lehetőséget biztosít arra, hogy a



5. ábra: Az elkészített fal 3D modellje

szimulációs eredményeket a valós darabbal össze lehet hasonlítani.

4. Az LMD folyamat modellezése

Az LMD folyamat során fellépő változó hőciklusok és a nagy hőbevitel következtében jelentős torzulások és maradó feszültségek keletkeznek. A szimulációs eszközök segítségével azonban ezek előre meghatározhatóak. A folyamat nagyon bonyolult és sok-sok paramétertől függ. Nyilvánvalóan a szoftver és az alkalmazott matematikai modellek is rendelkeznek kötöttségekkel, amelyeket helyén kell kezelni, különben hibás eredmények jönnek létre. A kutatások a Simufact Welding 2021.1 szoftver segítségével lettek elvégezve. A program a számítások során MSC Marc alapú megoldót használ és a fejlesztő csapat ezt egészítette ki hegesztés-specifikus bővítményekkel és módosításokkal. A szakirodalomban fellelhető pár példa arról, hogy számos esetben megfelelően tudták alkalmazni ezt a szoftvert [6-8] hasonló problémák esetén.

4.1 A lézersugár-anyag kölcsönhatásának az értelmezése

Háromféle lehetséges kimenetele van a lézersugár és az anyagok találkozásának. Melyek az alábbiak: az elnyelődés, az áteresztés és a visszaverődés. Ezek sok tényezőtől függnének [9].

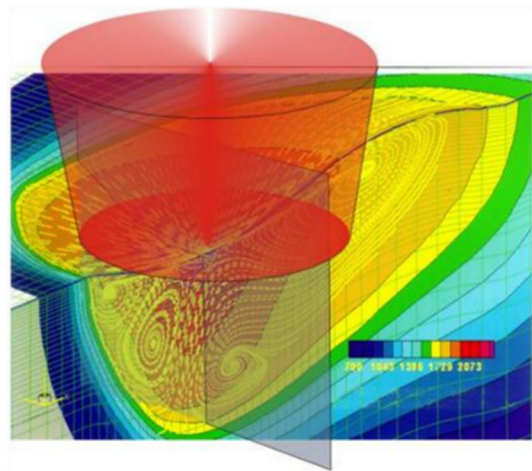
Fémek esetén a behatolási mélység közelítőleg 10^{-8} - 10^{-10} méter nagyságrendű. Ez azt jelent, hogy a rácsparaméterhez közeli nagyságrendről beszélünk. Ezért a lézer a fémekbe tulajdonképpen alig hatol be. A lézersugárral történő kölcsönhatás a vezetési elektronokon keresztül valósul meg. A fény elektromos tere kényszerrezgést idéz elő a vezetési elektronok gyorsításával. A gyorsított elektronok egy része a kényszerítő fényel ellentétes fázisú, de azonos irányú teret keltenek, másrészt a felvett energiájuk egy részét az atomokkal való rugalmatlan ütközés útján adják át. Ez a mechanizmus okozza a fémek felhevülését a lézersugár hatására [10].

A lézersugár abszorpcióját számos tényező befolyásolja, melyek az alábbiak [10]: lézersugár beesési szöge, lézersugár teljesítménysűrűsége, lézersugár hullámhossza, elnyelő anyag felületi minősége, elnyelő anyag minősége, elnyelő anyag hőmérséklete. A vizsgálatok során 60 %-os abszorpciós érték került meghatározásra.

A lézersugár-fém kölcsönhatását úgy a legcélszerűbb

elképzelni, mint egy korongot a felület közelében. Erről a korongról fog az energia a távolabb fekvő részek felé terjedni hővezetés útján. Azonban a lézersugár energia utánpótlása folyamatos, így nem hűl le. Ezt a gondolatmenetet felhasználva a lézer modellezésére a legjobb módszer egy megfelelően megválasztott paraméterekkel rendelkező csonka kúp alkalmazása hőforrásként.

A 6. ábra prezentálja, hogyan értelmezhető a lézersugár modellezése csonka kúpként definiált hőforrás esetén. Az ábrán láthatóak a különböző nagyságú és irányú olvadáramlások is. Jól látható a hegfürdő alakjából, hogy a lézer haladási iránya jobbról balra történik.



6. ábra: A hőforrás csonkakúppal történő modellezése [10]

4.2 A modellezési lehetőségek

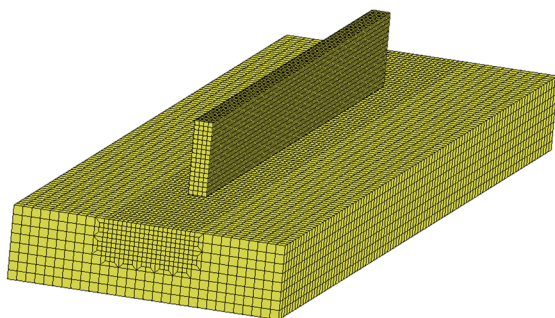
A probléma megoldására két különböző modellezési stratégia adott. Mindkettőnek megvan a maga létjogosultsága a feladat függvényében.

A hagyományos megközelítés szerint egymásra halmozódó lézerhegesztések sorozataként modellezhető a folyamat. A filozófiából adódóan minden egyes sort önálló testként vagy varratként kell kezelni. Ebben az esetben a soroknak az egymással való érintkezésének leírása egy bonyolult matematikai formula szerint történik, amely rendkívül megnöveli a számítási időt. Ezért ez a megoldás leginkább kisebb modellek esetén ajánlott. A felépített fal 20 sorból áll, ezért ebben az esetben nem célravezető ezt a módszert alkalmazni.

A másik, újabb szemlélet szerinti alkalmazás lényege, hogy a létrehozni kívánt geometria egyetlen testből áll, ellentétben az előzőleg bemutatott modellel. Tehát egyetlen deformálható test képviseli a hegesztési vonalak összességét. A lerakódás biztosításának érdekében elemkészleteket kell létrehozni, amelyeket a hőforrás egy adott időpillanatban érint. A szoftvernek nem kell a rétegek közötti kontaktokkal számolnia és az elkészített háló is lényegesen kevesebb csomópontból áll, ezért a számítási idő is sokkal kedvezőbb. Ezért ezzel a módszerrel került létrehozásra a végeselemes modell.

4.3 A végeleemes modell

Az alaplemez és a fal geometriája, illetve azok végeleemes hálója az MSC Marc 2019 program segítségével lettek létrehozva. A felhasznált végeleemes hálókat a 7. ábra prezentálja.



7. ábra: Az elkészített végeleemes háló

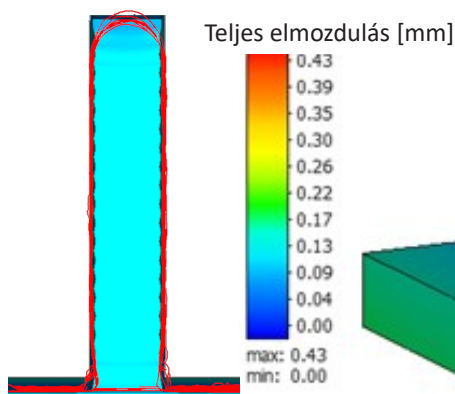
Az alaplemez hálózása sűrűbbre készült az épített fal közelében a pontosabb eredmények érdekében. A lemez 30x100x8 mm-es befoglaló méretekkel rendelkezik. Összesen 44 440 csomópontból és 39600 darab 8 csomópontú lineáris téglalemezből áll. A lerakott fal geometriája a validált hőforrás modellnek megfelelően 2 mm széles, 10 mm magas és 65 mm hosszú. Összesen 11 143 csomópontból és 8320 darab 8 csomópontú lineáris téglalemezből áll. A háló kiosztása úgy készült, hogy 2 elemsor vastagsága egyezzen meg a feltételezett rétegvastagsággal.

A szimuláció 5 óra 14 percen keresztül futott. A szimulációs eredmények jó egyezést mutattak a mérési eredményekkel a hossz- és keresztirányú torzulások előre jelzése során.

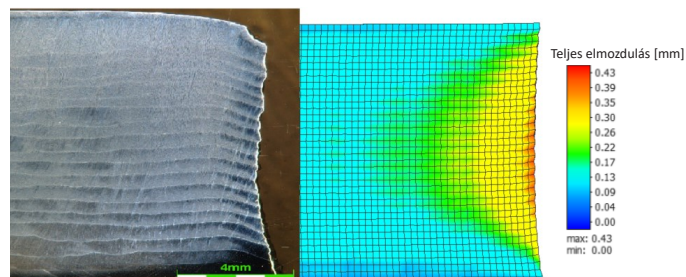
Az 8. ábra bizonyítja, hogy a szimulációnak sikerült előre megjósolni a geometria változását. Megfigyelhető a szélek befelé esése és az enyhe u alakú torzulás. A keresztirányú metszeten pedig láthatóak a ciklikus tágulások és zsugorodások.

Az egyetlen jelentős eltérés az elkészült fal magasságában van, hozzávetőlegesen 5-6 %. Erre megfelelő magyarázatot nyújthat a 9. ábra.

A hosszirányú csiszolaton nem a rétegek láthatóak, hanem a beolvadási határvonalak. Nagyjából egységesnek tekinthető, de azért akadnak benne ingadozások.



8. ábra: A deformáció szimulációs eredmények alapján (a keresztmetszeti képen a pirossal jelzett körvonalak a 3D szkennelt ábrából készült körvonalak)



9. ábra: A hosszirányú csiszolat és a szimulációs eredmény (deformáció)

Egyértelműen látszódik, hogy a felső réteg vastagsága lényegesen nagyobb, mint a többi rétegé. A sorok egymásra rakásával mindig nő a fal kiinduló hőmérséklete. Ez azt eredményezi, hogy több por tud beletapadni. A hőmérséklet növekedésével nő az abszorpciós képesség is. Tehát változnak a bemeneti paraméterek. Ezen hatások ismeretében nagyobb értékű fókuszfolt emelés javasolt.

5. Összefoglalás

A projekt célja az LMD technológia modellezési lehetőségeinek a vizsgálata volt. A cikk egy 20 rétegből álló fal vizsgálatára fókuszált, ahol a rétegek között 30 másodperc hűtési idő került alkalmazásra. A próbatétel a Kecskeméti Diódalézer Központ Trumpf Trulaser Cell 7020 típusú berendezésén készült. A minta digitalizálása GOM Aramis rendszerrel történt, hogy az eredmények megfelelően összehasonlíthatóak legyenek.

A mérési tapasztalatok alapján elmondható, hogy a szimulációk megfelelően jósolták előre a geometria torzulását. Megfigyelhető a szélek befelé esése és a vastagság menti ciklikus tágulások és zsugorodások. Az egyetlen jelentős eltérés az elkészült fal magasságában van. Ez magyarázható a szimuláció bemeneti paramétereinek a változásával. Ennek a vizsgálatára további kutatásokra van szükség.

Összességében elmondható, hogy a bemutatott modell már használható az LMD-geometriák hossz- és keresztirányú torzulásainak előrejelzésére. A mérési eredményekhez képest a magassági méretek 5-6 %-os eltérést mutattak a szimulációk, melyek pontosabb leírása további szimulációkat igényel.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a GINOP-2. 3.4-15-2016-00001 kódszámú projekt keretében valósult meg, melynek címe: Globális jelentőségű járműipari kutatás fejlesztési központ létrehozása Magyarországon a Bay Zoltán Közhasznú Nonprofit Kft. a Neumann János Egyetem és az AVL Hungary Kft. együttműködésében.

Irodalomjegyzék

- [1] J. Milewski: Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry. Springer Series in Materials Science, 2017
- [2] F. Q. Ramalho: Study of the Laser Metal Deposition (LMD) technology in the automotive industry. School of Technology and Management of the Polytechnic Institute of Leiria, 2019
- [3] T. Török, T. Ferenczi, G. Szirmai: Pormetallurgia Poranyagok gyártása és feldolgozása, Nemzeti Tankönyvkiadó, 2011
- [4] L. Kiss: Szimulációs módszertan kidolgozása LMD eljárással

készített termék fejlesztési folyamatának támogatásához. Miskolci Egyetem, 2022

- [5] Zs. Csitkó: Változó gyártási paraméterek hatásainak vizsgálata 3D fémnyomtatással készített mintákon. XXX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, 2022
- [6] M. Biegler, B. Graf, M. Rethmeier: In-situ distortions in LMD additive manufacturing walls can be measured with digital image correlation and predicted using numerical simulations. Additive Manufacturing 20, 2018
- [7] M. Biegler, A. Marko, B. Graf, M. Rethmeier: Finite element analysis of in-situ distortion and bulging for an arbitrarily curved additive manufacturing directed energy deposition geometry. Additive Manufacturing 24, 2018
- [8] M. Biegler, Beatrix A. M. Elsner, B. Graf, M. Rethmeier: Geometric distortion-compensation via transient numerical simulation for directed energy deposition additive manufacturing. Science and Technology of Welding and Joining, 2020
- [9] S. Takács: Bórral mikroötvözött acélok lézersugaras hegesztése. Óbudai Egyetem, 2022
- [10] G. Buza: Lézersugaras technológiák I. Edutus Főiskola, 2012



Új járműipari hajtáslánc vizsgáló gép

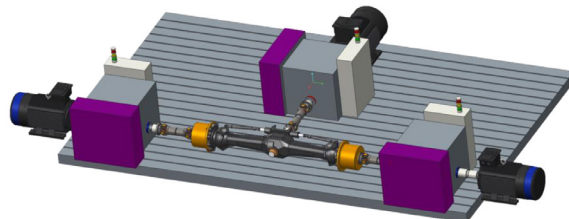
Hagyományos-, elektromos- és hibridhajtású,
személy-, teher- és mezőgazdasági járművek

hajtásláncainak szerkezeti, tribológia és energetikai
viszonyainak vizsgálatára alkalmas berendezést

szerezett be a

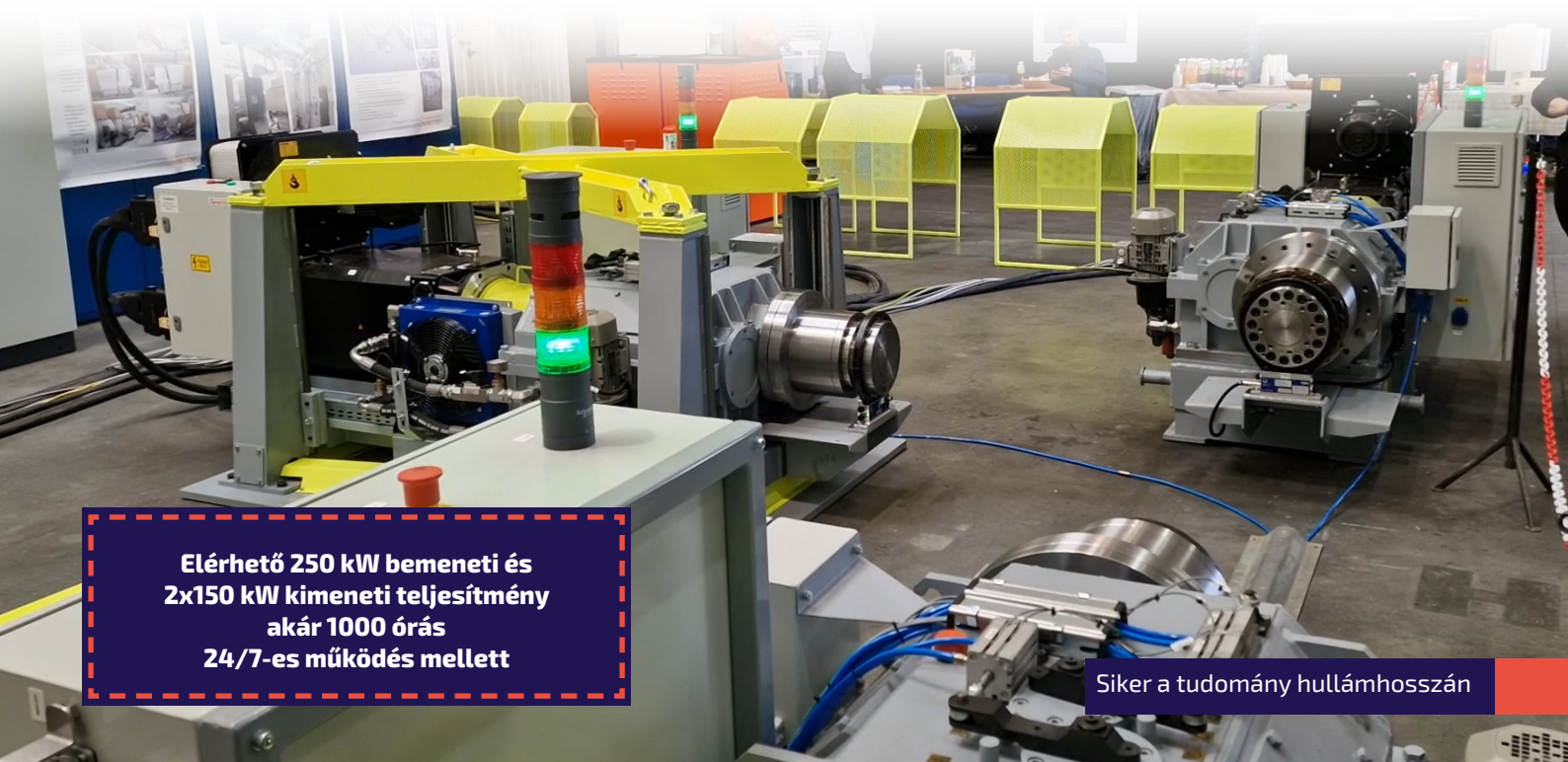
Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.,

mely képes teljesítmény- és funkcionális tesztelésre.



Kapcsolat

Rózsahegyi Péter
Anyagvizsgáló Osztály
3519 Miskolc, Iglói út 2.
peter.rozsahegyi@bayzoltan.hu



**Elérhető 250 kW bemeneti és
2x150 kW kimeneti teljesítmény
akár 1000 órás
24/7-es működés mellett**

Siker a tudomány hullámhosszán

Kender-PLA kompozit filament 3D nyomtatásának elemzése

Analysis of 3D printing of hemp-PLA composite filament

Csörgő Zsombor László^a, Kovács Sándor^b, Topa Martin^c, Rédey Soma^d^{a,b,c} Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.^a junior kutató, zsombor.csorgo@bayzoltan.hu^b vezető kutató, sandor.kovacs@bayzoltan.hu^c junior kutató, martin.topa@bayzoltan.hu^d Vilhemp Kft., alapító COO, soma.redey@vilhemp.hu

Kulcsszavak

additív gyártás,
kender,
kompozitok,
mechanikai tulajdonságok,
3D nyomtatás

Keywords

additive manufacturing,
hemp,
composite materials,
mechanical properties,
3D printing

Absztrakt

Az additív gyártás területén a 3D nyomtatás szálhúzásos technológiája egyre inkább elterjedt iparág. Az alábbiakban egy biokompozit anyag – amelynek alapját politejsav (PLA) és kender, mint mezőgazdasági növény alkotja – előállítását, illetve nyomtathatósága került vizsgálat alá. Ezen paraméterek optimalizálása és a technológiai sajátosságok feltárása valósult meg. Összehasonlításra kerültek a gyárthatósági eltérések a biokompozit és a hagyományos PLA anyagminőség között. Végezetül a kompozit anyagok mechanikai tulajdonságait és a belőlük készült termékek szerkezet integritását vizsgáltuk és vetettük össze a tiszta PLA esetével.

Abstract

In the field of additive manufacturing, the filament drawing technology of 3D printing is becoming an increasingly common industry. Below, the production and printability of a biocomposite material – consisting of polylactic acid and hemp, an agricultural plant – was examined. The optimisation of these parameters and the identification of technological specificities have been carried out. The manufacturability differences between the biocomposite and the traditional PLA material quality were compared. Finally, the mechanical properties of the composite materials and the structural integrity of the products made from them were investigated and compared with the case of pure PLA.

1. Bevezetés

Az additív gyártástechnológiák (Additive Manufacturing) az anyagrétegek egymásra építésével állítják elő a kívánt végterméket, jellemzően 3D nyomtató segítségével. A háromdimenziós nyomtatás fő alkalmazási területei közé tartozik manapság a prototípus gyártás (Rapid Prototyping) és a hobbi szintű felhasználás otthoni körülmények között, de a technológia fejlődésével már az ipari fém és az orvostechnikai protézis gyártás is kezd teret hódítani magának.

A 3D nyomtatás technológiájának előnyei, hogy tetszőleges geometriát fajlagosan olcsón, és hatékonyan elő tudunk vele állítani, ezért prototípus gyártásra kis szériás termelésre a legjobb választás. Emellett könnyű tesztelhetőséget is biztosít, amely segítségével a tervezési hibák is könnyen feltárhatóak. Viszont tömeggyártás esetén a hagyományos eljárások jelenleg még mindig hatékonyabban, termelékenyebben és olcsóbban [1].

Kutatásunk célja egy környezettudatos polimer mátrixú kompozitanyagok felhasználásával történő additív gyártástechnológia vizsgálata, az optimális 3D nyomtatásos gyártástechnológia meghatározása, valamint az így készült termékek mechanikai és szerkezetintegritási tulajdonságainak tanulmányozása volt.

Megvizsgálva a műanyagokkal dolgozó 3D nyomtatásos eljárásokat, a filamenttel dolgozó FDM (Fused Deposit Modeling) módszer lett kiválasztva, mivel ez biztosította a legnagyobb szabadságot számunkra a kompozit anyagminőségének megválasztásában.

A mátrix alapanyagának a politejsavat (PLA) választottuk, amely megújuló erőforrásokból készül, emellett kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik és az egyik legelterjedtebb poliészter [2,3]. Az önmagában is biodegradábilis polimer környezetbarát tulajdonságait kívántuk továbbfejleszteni, kiszélesíteni, az adott kompozit CO₂ kibocsátásának további csökkentésével, ami járulékosan a költséges mátrix-polimer ár mellett költséghatékonyságot

is eredményez. Ehhez leginkább hosszszállítási láncot nem igénylő, helyben, további gyártási, termelési eljárás nélkül, melléktermékként egyébként is előállító töltőanyagot kellett találnunk. Erre a célra a legjobb lehetőség a mezőgazdasági hulladékok, melléktermékek felhasználása.

2. Természetes szállal erősített PLA biokompozitok előállítása és tulajdonságai

Piackutatást végezve egy olyan – még nem létező – kompozit filamentek előállítását és vele történő termékgyártást céloztuk meg, amely – a mezőgazdasági melléktermékként előállít – kenderrostot tartalmaz, ezzel növelve a kompozit természetes úton elbomló térfogatarányát, amelyhez nem szükséges ipari komposztálási eljárás sem.

A kender egyik legnagyobb pozitív tulajdonsága, hogy szinte gondozásmentes növényről beszélünk, bárhol megterem, előállítása alacsony költségű. Amellett, hogy Magyarországon is könnyen elérhető a mezőgazdasági termelőktől, a növény azon hulladéknak tekinthető részei, amelyek nem szükségesek az elsődleges felhasználáshoz, a kompozit gyártásunkhoz teljes mértékben megfelelőnek bizonyultak. A másik pozitív tulajdonsága a kenderrost szálaknak a szilárdsági tulajdonságai, amelyek az egyik legjobbak a világon már alkalmazott bioszálakhoz képest (1. táblázat).

1. táblázat: A kender paraméterei [4]

Megnevezés	Kender
Sűrűség [g/cm ³]	1,29
Cellulóz-tartalom [%]	70,2 – 70,4
Hemicellulóz-tartalom [%]	17,9 – 22,4
Lignin-tartalom [m/m%]	3,7 – 5,7
Átmérő [µm]	-
Szakítószilárdság [MPa]	550 – 590
Húzómodulus [GPa]	70
Szakadási nyúlás [%]	1,6
Világtermelés [10 ³ tonna]	214

A gyártáshoz kender melléktermékből előállított őrléményt, illetve PLA granulátumot szereztünk be.

A biokompozitok gyártási folyamata a kenderszálak tovább őrlésével, majd hosszmérete szerinti frakciókra bontásával kezdődött, amelyhez különböző méretű szitákat alkalmaztunk. Ezzel célunk az volt, hogy különböző szálméretekkel és töltöttséggel eltérő kompozit anyagminőségeket állítsunk elő. A továbbiakban ezen anyagminőségekkel megvizsgáljuk a gyárthatóságot, és a kompozit anyagok mechanikai szerkezetintegritási tulajdonságait.

A természetes szálak legsúlyosabb hátránya a hidrofíll jellegük, amely gyenge felületi adhézióhoz vezethet a rost és az alapanyag között. Ez már a szítálás során visszatérő problémát jelentett, azaz magas környezeti páratartalom esetén a kender könnyen magába szívta a vizet, valamint a kenderőrlemény olaj tartalma is az előzőhöz hasonló gondokat okozott. Ezek következtében az anyag megtapadt a szitákban a folyamat során, ezáltal eltömítette azokat. A probléma kiküszöbölését a sziták rendszeres tisztításával, a szítarázó berendezés technológiai paramétereinek optimális beállításával, a töltet-tömeg meghatározásával, megfelelő szitaméretek megválasztásával, valamint a kenderrostok szítálás előtti szárítószekrényben történő szárításával érték el:

- A betáplált anyagmennyiség 100 gramm volt egy szítáló futtatás során.
- Sziták futtatásonként mosva, szárítva lettek.
- Szítarázó technológiai paraméterei: 10 perc futási idő, 1,5 mm/g-os amplitúdó, szakaszos üzem 12 másodperces rázó ciklusokkal.
- Szitaméretek: összesen 6 különböző lyuk-átmérőjű szitát alkalmaztunk 100 µm-től 800 µm-es nagyságig (100 µm, 150 µm, 200 µm, 300 µm, 400 µm, 800 µm).
- A kenderrost szárítása során 3 kilogrammnyi őrlémény 24 órán át volt a 105°C-os szárító berendezésben.

A szítarázó berendezés segítségével a beimportált 40 kilogrammnyi kenderrost őrléményt három különböző csoportba különítettük el:

- <100 µm alatti kenderszál, amiből 8,5 kg mennyiség keletkezett
- 100-200 µm közötti kenderszálból 9,5 kg szítálódott le
- 200-300 µm közötti kenderszál tartományban 7,1 kg szitált anyagot állítottunk elő

Ezen mennyiségeket 6 hét alatt állítottuk elő a laborberendezéseinken. A nagyobb szemcseméreteket nem alkalmaztuk további vizsgálatainkban.

A leszitált és frakciókra osztott kenderszálak az újbóli szárítást követően kompaundálásra kerültek. A kompaundálás során a gyártás egy változó geometriájú ikercsigás extruderrel valósult meg, amely berendezés gyorsan és nagy mennyiségben volt képes a kender-PLA kompaund előállítására.

A frakcionálás miatt és az azt követő többszörös szárítás következményeként, a kompaundálás során nem jelentek más hasonló kender keverékek esetén jellemző technológiai hibák, például a kender feltapadása az adagoló garatba vagy dugulás.

A kompaund gyártás során sikerült 20 %-os töltöttségi

szintet elérni, amely igazán kiemelkedő eredménynek számított.

A keletkezett biokompozit granulátumokból szálhúzásos technikával működő berendezés segítségével különböző töltöttségű és szemcseméretű filamentek gyártása valósult meg. A filament szálhúzása során a 6,6 %-os töltöttségi érték volt a legnagyobb, amelynél a gyártás zökkenőmentesen végbement. Nagyobb százaléku töltöttség esetén a gyártó berendezés extruder fejében dugulás keletkezett, amelynek köszönhetően az anyag elakadt benne. A problémát a kender anyagából történő lakkszerű kiválás okozta, amely feltehetően – a már korábban említett – kenderrostok olajosságának, és a gyártási folyamat magas hőmérsékletének volt köszönhető (1. ábra).



1. ábra: A tömődés és a lakkszerű kiválás a filament gyártása során

A megvalósított filamenteket a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: A előállított kender-PLA filamentek típusai

Szemcseátmérő [µm]	Töltöttség [m/m %]
0-100	1,68
	3,3
	6,6
100-200	1,68
	3,3
	6,6
200-300	0,83
	3,3
	6,6

Az elkészült különböző összetételű filamentekről általánosságban elmondható, hogy esztétikailag szépek és jellegzetes esszenciát tartalmazó illatuk van, de merevebbek, mint a hagyományos műanyagból készült huzalok.

3. Nyomatási beállítások és tapasztalatok a biokompozit anyagnál

Az általunk használt anyagokkal való nyomtatások során összehasonlításra kerültek a gyártás során az optimális nyomtatási beállítások a hagyományos PLA és az általunk használt kilenc különböző összetételű kender tartalmú PLA anyagminőségek között.

3.1 Nyomtatás folyamán szerzett tapasztalatok

A biokompozit filamentekkel történő nyomtatás nagyobb odafigyelést igényel, mint a hagyományos PLA-val való nyomtatás. Ezekkel az anyagokkal végzett nyomtatások során többször fordult elő meghibásodás a gyártás folyamán. A nyomtatások közben megfigyelt legnagyobb



2. ábra: A vetemedés jelensége

problémát a nyomtató fej eltömődése jelentette, amelyet egy szennyező anyag vagy a biokompozitban található, rossz orientációjú kenderrost jelentette, ezáltal útját állva az anyag szabad áramlásának. A másik jelentős probléma a biokompozit filamentek ridegsége volt, amelynek köszönhetően könnyen eltörték a huzalszálok a nyomtatás közben. Ez a jelenség a magasabb töltöttséggel rendelkező filamentek esetében volt megfigyelhető. A kender tartalmú PLA filamentekre jellemző nyomtatási meghibásodás volt ezeken felül a vetemedés jelensége (2. ábra), amely a nagy felületen tapadó modelleknél volt jellemző. A vetemedés során a próbatetek elhajlása, deformációja volt megfigyelhető. Ezt a problémát a fűthető asztal hőmérsékletének növelésével, illetve a munkadarab tapadási felületének növelésével tudtuk orvosolni.

Az általunk használt anyagokkal történő nyomtatás során megfigyelhető volt a pókhálózás jelensége, amely során az olvadt filament hajszálvékony szájakat hagyott a nyomtatott darab részei között. Az effektus nem okozott nyomtatási problémákat, csak esztétikailag rontotta kis mértékben a munkadarabokat. A jelenséget redukálni tudtuk az anyag visszahúzásával, a hőmérséklet csökkentésével, illetve a nyomtatott modellek közötti távolságok csökkentésével.

3.2 Nyomtatási beállítások összefoglalása

A gyártás megkezdése előtt szükség volt a nyomtatás előtervezésére és az optimális nyomtatási beállítások megtalálására. Ennek kapcsán próbanyomtatásokat végeztünk el a biokompozit anyagokkal. Az általános paramétereket, mint a falvastagság, rétegvastagság, hűtés vagy a burkoló rétegek számát egyezményes értékre állítottuk be, mivel ezeknél az értékeknél nem igényelt egyik anyagminőség sem különös módosítást. Viszont további beállítások esetében a tiszta PLA-hoz képest változtatásokat kellett végrehajtani a kender-PLA anyagok nyomtatása során, ezek összefoglalását a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: Megváltoztatott paraméterek

Megnevezés	Hagyományos PLA	Kender – PLA kompozit
Extruder hőmérséklete	215 °C	185 °C
Fűthető asztal hőmérséklete	60 °C	45 °C
Első réteg nyomtatási sebessége	120 %	150 %
Első réteg extrudálási szélességének százalékos aránya	100 %	120 %

Az eltérő beállítások leginkább a hőmérséklet változtatásában, illetve az első rétegek nyomtatása során volt szükséges, amelyeknek köszönhetően a gyártási folyamat sikeresen végbement.

4. A biokompozitból nyomtatott próbatetek

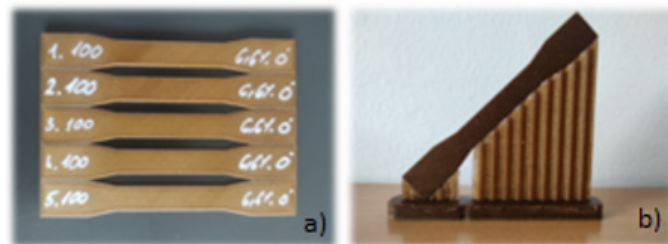
A különböző 3D nyomtatott anyagminőségek mechanikai és szerkezetintegritási viszonyait vizsgáltuk a következő lépésekben.

A mechanikai tulajdonságok meghatározására szakítópróbatesteket, valamint különböző termékek szerkezetintegritási vizsgálatainak érdekében fogaskerék próbatesteket és ortézis talpakat gyártottunk. Az elkészített munkadarabok esetén egyezményesen teljes, vagyis 100%-os kitöltési értékkel dolgoztunk, ennek köszönhetően a próbatetek teljesen tömörnek tekinthetők.

4.1 Szakítópróbatetek

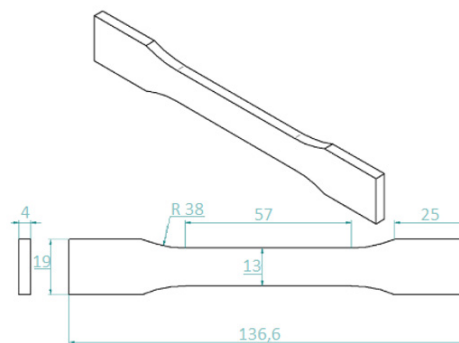
A szakító próbatesteknél kilenc különböző kompozit anyagminőséggel (2. táblázat) és a tiszta PLA-val végzett nyomtatások során a próbatesteket három különböző pozícióban nyomtattuk ki (3. ábra), amelyek a nyomtató asztalon való eltérő elhelyezkedésükben nyilvánult meg:

- Fekvő pozícióban (0°-ban pozicionálva)
- Álló pozícióban (90°-ban pozicionálva)
- Átlós pozícióban (45°-ban pozicionálva)



3. ábra: Szakítópróbatetek
a) fekvő pozícióban
b) átlós pozícióban

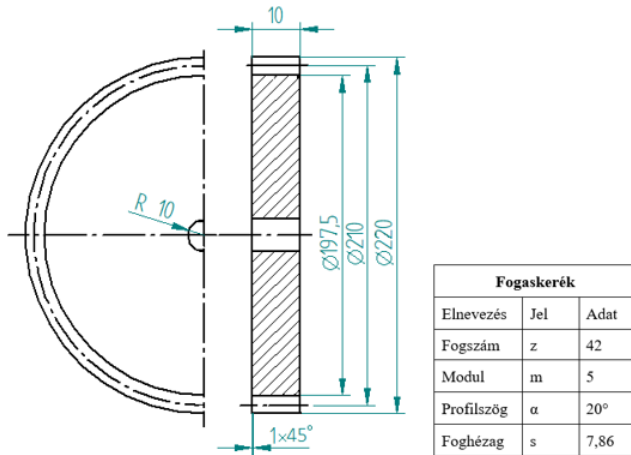
A különböző pozícióknak köszönhetően a nyomtatások során a rétegek eltérő irányban épültek fel, ebből adódóan a rétegek közötti kohézió is megváltozott. Mindegyik anyagból minden pozícióban 5 darab próbatest készült el. Egy próbatest méreteit az előtervezés során a következőkben határoztuk meg: 136,6 x 19 x 4 mm (4. ábra).



4. ábra: A szakítópróbatest befoglaló méretei

4.2 Fogaskerek

A fogaskerék vizsgálathoz választott geometria egy 5-ös modulú fogaskerék, amely 42 darab egyenes, evolvens fogazattal rendelkezik. Az osztókör átmérője 210 mm, fogszélesség 10 mm (lásd 5. ábra).

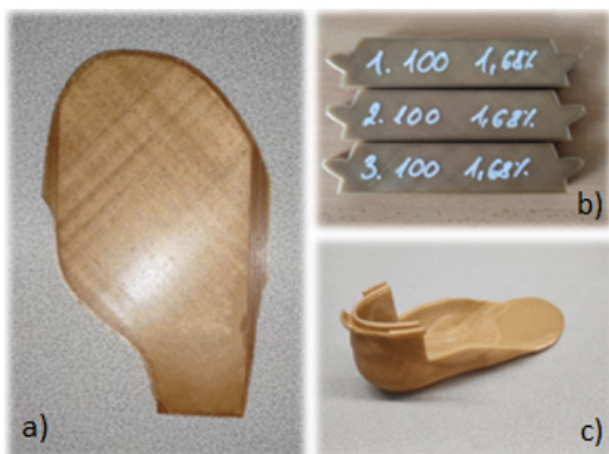


5. ábra: A teljes fogaskerék alkatrészrajza

A vizsgálat célja az adott kompozit anyagból előállított fogaskerék fogának szerkezetintegritási vizsgálata, amely ebben az esetben a fog törésig történő maximális terhelhetőségének a megállapítása volt.

Próbatest geometriaként a fogaskerék egy fogát és a tányérhoz csatlakozó részét vettük figyelembe úgy, hogy könnyedén befogható a vizsgálati szorító pófákba. Anyagtakarékossági megfontolások alapján úgy alakítottuk ki a geometriát, hogy a próbatest végén 1-1 fog helyezkedett el (6.b ábra).

A fogaskerekeket a 2. táblázatban felsorolt anyagminőségekből és a tiszta PLA anyagból nyomtattuk ki. Mindegyik anyagtypusból 3 darab próbatest készült el, azonban a próbatest kialakításának köszönhetően egy anyagtypusnál 6 db terhelési vizsgálat lett elvégezve, amelyeknek átlagolt értékét a 4. táblázat tartalmazza.



6. ábra: Nyomtatott próbatestek
a) ortézis talprész;
b) fogaskerék;
c) teljes ortézis modell

4.3 Ortézis talp

Vizsgálataink ezen részében az ortézis szerkezetintegritási vizsgálatával foglalkoztunk. Az ortézis egy orvosi segédeszköz, amely a test meghatározott pontjait védi, rögzíti vagy támaszt nyújt neki, jellemzően végtag törések, ficamok, szalag-megnyúlások esetén.

Az ortézis talprész jellemző tönkremenetelének oka a megbotlás miatti rossz támpontú terhelés, a lábujjak alatt. Az ortézis talp szerkezetintegritásának ilyen módú megszűnését elemeztük mechanikai vizsgálattal.

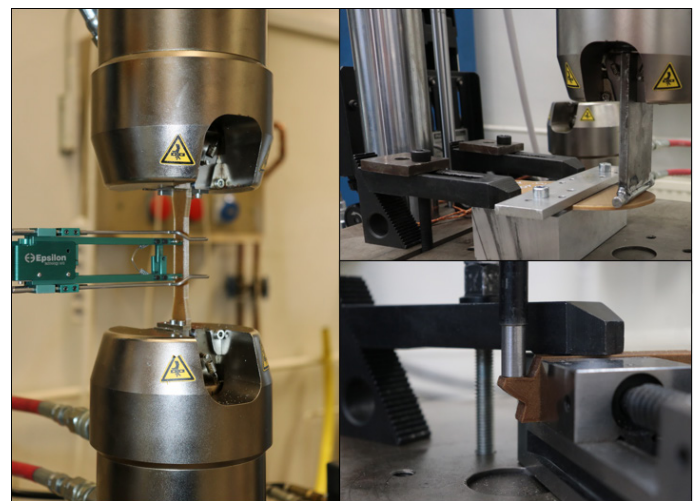
Vizsgálataink első részében a teljes ortézis talp redukálásával, egyszerűsítésével foglalkoztunk a nyomtatás gyorsítása és a szükséges filament mennyiség csökkentésének érdekében. Az egyszerűsítést úgy hajtottuk végre, hogy az a tönkremenetel lefolyását érdemben ne befolyásolja, viszont a próbatest befoghatóságát elősegítse. Az így kapott geometria a 6.a ábrán látható.

Az ortézis talpak esetében a kilenc különböző anyagminőségből (2. táblázat) és a tiszta PLA-ból 5-5 próbatest nyomtatása valósult meg.

5. Nyomtatási mérések és eredmények a kender tartalmú PLA esetében

Az elkészült próbatestek vizsgálata a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Mechanikai Anyagvizsgáló Laboratóriumában valósult meg. A lapos szakítópróbatestek esetében egy Instron E10000 uniaxialis szakítóberendezés állt a rendelkezésünkre. A másik két típusú munkadarab esetén is ezzel a berendezéssel végeztük el a vizsgálatokat, amelyeknél egy-egy befogást alkalmaztunk és vertikális irányban fentről lefelé terheltük a próbatesteket (7. ábra).

Az elvégzett terhelési vizsgálatok kiértékelését követően a maximális erő értékeiket átlagoltuk az eltérő anyagtypusú próbatestek esetében, ezeket az értékeket a 4. táblázat tartalmazza. A szakítópróbatesteknél a fekvő (0°-os) pozícióban kinyomtatott próbatestek értékei vannak feltüntetve, mivel ebben az esetben voltak a terhelési értékek a legnagyobbak.



7. ábra: Próbatest befogások a vizsgálatok során

4. táblázat: Átlagos maximális terhelési értékek

Töltöttség	Átlagos maximális erő [N]		
	Fogaskerék	Ortézis talprész	Szakító próbatest
Tiszta PLA	3272,6	529,0	2343,9
0-100 µm 1,68 % kompozit	2998,6	507,4	2337,8
0-100 µm 3,3 % kompozit	2510,6	456,0	1877,2
0-100 µm 6,6 % kompozit	1577,6	424,4	1191,6
100-200 µm 1,68 % kompozit	2631,9	476,4	2029,1
100-200 µm 3,3 % kompozit	2394,6	439,2	2217,5
100-200 µm 6,6 % kompozit	1704,3	388,0	1568,6
200-300 µm 0,83 % kompozit	2908,9	498,2	2173,5
200-300 µm 3,3 % kompozit	1951,1	436,0	1771,2
200-300 µm 6,6 % kompozit	1351,2	337,2	1068,8

A szakító próbatesteknél kiértékelésre kerültek az átlagos alakváltozási, feszültségi és rugalmassági modulus értékei is a különböző anyagminőségeknél, amelyet az 5. táblázat tartalmaz. A feltüntetett értékek a fekvő (0°-os) pozíciójú nyomtatású próbatestekhez tartoznak.

5. táblázat: Szakítópróbatestek átlagos alakváltozási, feszültségi és Young modulus értékei

Töltöttség	Átlagos szakadási nyúlás [%]	Átlagos szakító-szilárdság [MPa]	Átlagos rugalmassági modulus [GPa]
Tiszta PLA	2,61	46,02	2,87
0-100 µm 1,68 % kompozit	2,17	44,79	3,03
0-100 µm 3,3 % kompozit	2,14	34,59	2,46
0-100 µm 6,6 % kompozit	2,06	22,25	1,86
100-200 µm 1,68 % kompozit	1,90	42,78	3,07
100-200 µm 3,3 % kompozit	2,57	38,19	2,78
100-200 µm 6,6 % kompozit	1,97	29,73	2,52
200-300 µm 0,83 % kompozit	2,63	41,66	2,83
200-300 µm 3,3 % kompozit	2,62	33,74	2,53
200-300 µm 6,6 % kompozit	1,85	20,12	1,76

A kapott eredmények segítségével elkészítettük a munkadarabok erő-elmozdulás diagrammait. A szakító próbatestek esetében pedig a feszültség-alakváltozás görbéket állítottuk elő, és elemeztük. Néhány eredményül kapott diagram a 8. és 9. ábrán látható.

5.1 Eredményekből levont következtetések

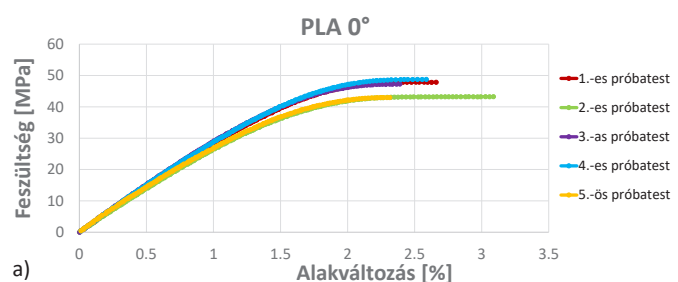
A legyártott termékek mechanikai és szerkezetintegritási vizsgálatai alapján a következő megállapításokat vontuk le:

- A kender szemcseméretének csökkentésével növelhető a termék szilárdsági tulajdonsága, a szakító-szilárdság és a rugalmassági modulus értéke adott töltöttségi szint mellett
- A szemcseméret növelésével a nyomtatott termék szívóssága növelhető az adott töltöttség mellett
- A kenderrel való töltöttség növelése csökkenti a

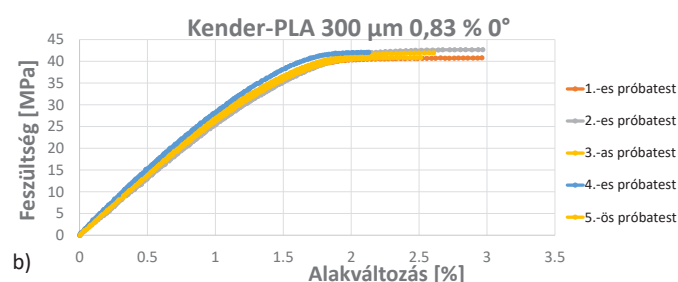
szilárdságot és a szívósságot is, köszönhetően a töltőanyag ismert hidrofíli tulajdonságai miatt létrejövő gyenge adhézióknak a kender-PLA határfelületen.

- Az anyagár minimalizálásához kellő maximális töltőanyag-tömegarány mellett, a legjobb szilárdsági tulajdonságokat 100-200 µm átlagos szemcseméretű kenderőrlemény használatával érjük el.

Továbbá azt találtuk, hogy fekvő nyomtatással 200-300 µm szemcseméret esetén a 0,83-3,3 %-ig szívósabb a kompozit anyag szakadási nyúlása a tiszta PLA-hoz képest. Ugyanennél a nyomtatási beállításnál a 0-100 és 100-200 µm szemcseméretű, 1,68 %-os töltöttségű kender-PLA kompozit esetén a rugalmassági modulus mutatott nagyobb értéket a tiszta PLA-val szemben (5. táblázat).

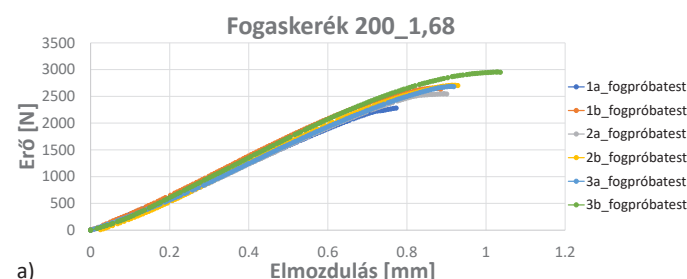


a)

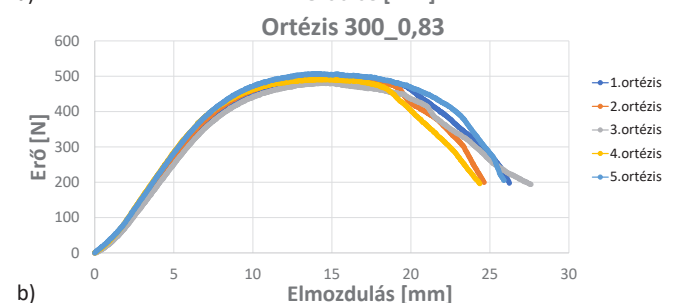


b)

8. ábra: Szakítópróbatest feszültség – alakváltozás diagrammja
a) Tiszta PLA esetén;
b) 200-300 µm 0,83 m/m%-os kompozitnál



a)



b)

9. ábra: Erő – elmozdulás diagrammok
a) Fogaskerék próbatest 100-200 µm 1,68 m/m% kompozitnál;
b) Ortézis próbatest 200-300 µm 0,83 m/m% kompozitnál

6. Összefoglalás

Munkánkban mezőgazdasági melléktermékkel erősített PLA kompozit gyárthatóságát, mechanikai és szerkezetintegritási tulajdonságait vizsgáltuk.

A környezettudatosság jegyében mezőgazdasági hulladékként a kenderrostot választottuk. Az első komolyabb kihívást a kender szitálása, frakciókra bontása jelentette olajossága, hidofil tulajdonságai miatt. A szitálás esetén szitamosást, szárítást, technológiai paraméterek megfelelő optimalizálását kellett alkalmaznunk. A sikeresen elvégzett szitálási folyamat eredményeként a kendert három különböző frakcióra bontottuk a szálméretük függvényében (0-100 µm, 100-200 µm, 200-300 µm-es névleges szemcseméretekkkel, a 300 mikrométer feletti méretet hulladéknak tekintve).

A szárításoknak köszönhetően a kender-PLA-val való kompaundálása sikeresen végbement. A kompaundálás következményeként 20%-os kompaund granulátumot sikerült előállítanunk az eltérő frakciókban. A filament gyártása során a maximálisan elérhető kender térfogat-százaléka 6,6% volt. A kender-PLA filamentet 6,6%, 3,3%, 1,68% és 0,83% tömegszázalékos töltöttséggel tudtuk előállítani. Nagyobb töltöttség esetén a kenderből kiváló anyagból képződő lakkréteg megállította a gyártási folyamatot.

A 3D nyomtatások során a különböző biokompozit anyagok esetén meghatároztuk az optimális nyomtatási beállításokat. A hagyományos PLA-val történő gyártáshoz képest elsősorban a hőmérsékleteken és a nyomtatási sebességeken változtattunk. A beállítások módosításával a nyomtatás hibáit lecsökkentettük, eredményes és fahasztású, esztétikus próbatesteket kaptunk eredményül.

A mechanikai és szerkezetintegritási vizsgálatokhoz a következő próbatesteket terveztük és készítettük el: szabványos lapos szakító próbatest, fogaskerek minta és ortézis talprész. A próbatesteket az adott felhasználásnak vagy szabványos vizsgálati előírásoknak megfelelően

különböző terhelési állapotoknak vetettük alá és értékeltük ki őket az anyagvizsgáló laboratóriumunkban.

Eredményképpen azt kaptuk, hogy bizonyos esetekben a szívósság, illetve a rugalmassági modulus javítható a tiszta PLA-hoz képest, ám a kender őrléménnyel való töltöttség növelésével a szilárdság és a szívósság is csökkent. Továbbá a szemcseméret-növelés csökkenti a szilárdságot, ugyanakkor növeli a szívósságot. Maximális töltöttség mellett a legnagyobb szilárdságot 100-200 µm átlagos szemcseméretű kenderőrléménnyel érjük el.

Köszönetnyilvánítás

A kutatási munka a TKP2020-NKA-18 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2020-4. 1. 1-TKP2020 program finanszírozásában valósult meg.

Köszönetet szeretnénk mondani a Vilhemp Kft.-nek, hogy biztosították számunkra a szükséges mennyiségű kenderőrléményt, valamint munkánk sikeres végrehajtásához nyújtott hozzájárulásukért.

Irodalomjegyzék

- [1] CNC media: Minden, amit a 3D-nyomtatásról tudni kell. <https://www.cnc.hu/2020/05/minden-amit-a-3d-nyomtatásról-tudni-kell/> (2022.11.08.)
- [2] Auras R., Lim L-T., Selke S. E. M., Tsuji H.: Poly(lactic acid) synthesis, structures, properties, processing, and applications. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey (2010).
- [3] Fabio A. Cruz Sanchez, Hakim Boudaoud, Mauricio Camargo, Sandrine Hoppe, Polymer Recycling in an Open Source Additive Manufacturing Context: Mechanical Issues. Additive Manufacturing Volume 17, 2017 October, 87-105.
- [4] Abhijit Sudamrao Getme, Brijesh Patel, A Review: Bio-fiber's as reinforcement in composites of polylactic acid (PLA). Materials Today: Proceedings, Volume 26, Part 2, 2020 March 25, 2116-2122.



Előfizetés megújítás! Még most sem késő!

Ne felejtse el

a meglévő előfizetését megújítani vagy

új előfizetését elindítani!

2023 első száma elérhető márciusban!

Írjon a marovisz@marovisz.hu email címre!



Vörösiszap-maradékanyag építőipari felhasználása

Utilization of treated red mud in construction industry

Grossmann Erika^a, Kopecskó Katalin^b, Török Mátyás^c

^aBay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., junior kutató, erika.grossmann@bayzoltan.hu

^bBudapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, egyetemi docens, kopecsko.katalin@emk.bme.hu

^cBay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., osztályvezető, matyas.torok@bayzoltan.hu

Kulcsszavak

másodlagos nyersanyag,
vörösiszap,
cementkiegészítő anyag,
hidraulikus aktivitás,
meddő iszap

Keywords

secondary raw materials,
red mud, supplementary
cementitious material,
hydraulic activity,
treated red mud

Absztrakt

A másodlagos nyersanyagok felhasználása napjaink egyik fő kutatási iránya. A vörösiszappból, a benne található értékes komponensek kinyerését követően, hulladék keletkezik. Kutatásunkban a kezelt vörösiszap építőipari alkalmazhatóságát tanulmányoztuk: a visszamaradó meddő iszap másodlagos nyersanyagként történő alkalmazásának lehetőségét cementkötésű anyagokban. Vizsgálataink alapján a kezelt vörösiszap cementkiegészítő anyagként használható, mert hidraulikusan aktív; továbbá előnyös tulajdonságai közé tartozik, hogy a cement hidratációs hőfejlődését jelentősen csökkenti, amely fontos szempont, pl. tömegbetonban történő alkalmazás esetében.

Abstract

One of the main research directions nowadays is the use of secondary raw materials. After extracting the valuable components contained in the red mud, waste is generated. In our research, we studied the applicability of the treated red mud in the construction industry: the possibility of using the residual red mud as a secondary raw material in cement-bound materials. Based on our tests, the treated red mud can be used as a supplementary cementitious material because it is hydraulically active, and one of its beneficial properties is that it significantly reduces the heat of hydration in cementitious material, which is an important aspect e.g. in the case of application in mass concrete.

1. Bevezetés

Napjaink egyik fő ipari kutatási kihívása a másodlagos nyersanyagok felhasználása. Rengeteg olyan hulladék keletkezik, amelyekből értékes anyagok nyerhetők ki és forgathatók vissza további ipari felhasználásra; ilyen a vörösiszap is. Az építőipar egyik leggyakrabban használt alapanyaga a betontechnológiában alkalmazott cement. Tulajdonságai számos cement kiegészítő anyaggal befolyásolhatók, módosíthatók; ezek hatása elsősorban puccolános aktivitásuknak köszönhető. A kutatás során a vörösiszap kezelése után visszamaradó meddő iszap (treated red mud, TRM) építőipari felhasználhatóságát vizsgáltuk. Ehhez megvizsgáltuk a TRM cementkiegészítő anyagként történő alkalmazásának lehetőségét, amelyhez többek között meghatároztuk a meddő iszap hidraulikus aktivitását. A vizsgálati eredmények alapján a kezelt vörösiszap cementkötésű anyagokban másodlagos nyersanyagként történő alkalmazásának lehetőségét igazoltuk.

2. A vörösiszapról

A fémipari alapanyagok közül az alumínium az egyik legszélesebb körben alkalmazott fém (járműipar, csomagolóipar, építőipar, elektronika, háztartás stb.), melyet timföldből nyernek ki, leggyakrabban az ún. Bayer-eljárással [1]. A timföldgyártás melléktermékeként nagy mennyiségű vörösiszap keletkezik (átlagosan egy tonna timföld előállítása egy - másfél tonna hulladék vörösiszappal jár) [2], ami erős lúgossága és kis szemcsemérete miatt veszélyes az élővilágra és a környezetre. Sajnálatos hazai példa erre a 2010. október 4-i katasztrófa, amikor is Ajkán átszakadt a vörösiszap-tározó gát [2-3]. A teljes vörösiszap-mennyiség gazdaságos ipari feldolgozása és kiaknázása jelenleg még nem megoldott, ezért az erre a célra létesített zagy-tározókban tárolják.

A vörösiszapok összetétele elsősorban a bauxitok összetételének és az előállítási módnak a függvénye. A vörösiszapban megtalálhatók mind a bauxit feltáratlan

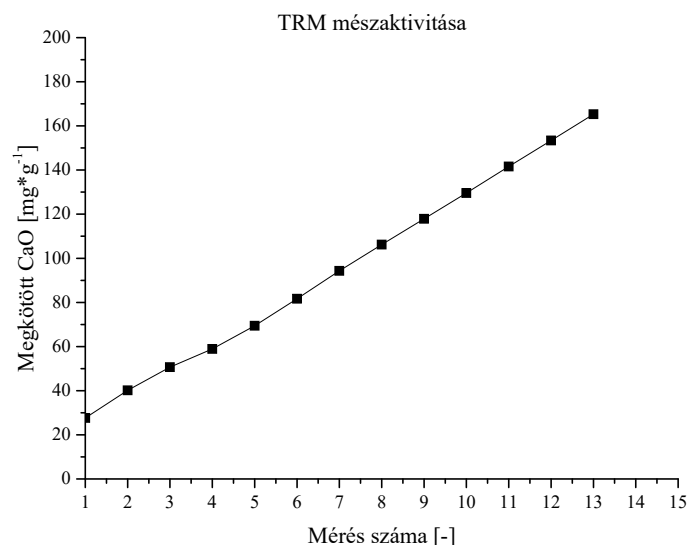
ásványos összetevői (vas- és titán-oxidok), mind a nátrium-aluminát oldat és a bauxitban előforduló egyes ásványok reakciójának kristályos termékei (nátrium- és kalcium-alumínium-hidroszilikátok stb.), ezen kívül amorf fázisok is. A vörösiszapban koncentrálódik a titán-dioxid és nagy jelentősége van a ritkafém tartalomnak is.

A Bay Zoltán Kutatóintézet egy korábbi projektje során olyan technológiát fejlesztett, amely az Ajkán található vörösiszap-tározóban lerakott zagy hasznosítására irányult. Céljuk a vörösiszap vastartalmának csökkentése volt, és az elért eredmények alapján a projekt folytatásaként egyéb értékes komponensek kinyerésére fókuszáló kutatás zajlik. Az ennek során keletkező, nagy mennyiségű meddő iszap, mint technológiai hulladék hasznosítása is szerepel a projekt célkitűzései között. A meddő iszap építőipari kötőanyagként történő hasznosítását célzó kutatást a BME Építőmérnöki Karán végeztük, amelynek eredményeképpen egy vegyészmérnöki MSc diplomamunka is született.

3. A meddő iszap hidraulikus aktivitásának vizsgálata

A cementhelyettesítő anyagok aktivitásának meghatározására számos módszer terjedt el, többek között a puccolánosság vizsgálatára szolgáló Frattini-teszt [4] és a hidraulikus aktivitás vizsgálata mészfelvétellel [5]. A puccolánok olyan természetes vagy mesterséges látens hidraulikus anyagok, amelyek kalcium-hidroxiddal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, portlandit) reagálnak és a betonban kristályfázisokat hoznak létre. Betonokban és habarcsokban történő alkalmazásuk előnyös, mert a cement kötések a klinker részecskék közti pórustérben helyezkedik el a kalcium-hidroxid (portlandit), ami a hidratált cementkö 20-25 tömeg%-a (továbbiakban m%). A puccolánok hozzájárulnak a betonok szilárdságának és korrózióval szembeni ellenállásának növeléséhez azáltal, hogy kitöltik a pórustereket és megkötik a portlanditot, továbbá csökkentik a víz-cement tényezőt.

A hidraulikus aktivitás meghatározása egy titráláson alapuló módszer, amelynek alapja az MSZ 4706-2 szabvány [5]. Segítségével meghatározható a vizsgált cementkiegészítő anyag mészkötése (puccolánossága). A szabványban leírtak alapján egy anyag akkor tekinthető hidraulikusan aktív, ha „a természetes cementkiegészítő anyag mészkötése 30 nap alatt legalább 60 mg/g”. Az általunk tanulmányozott kezelt vörösiszap hidraulikus aktivitás vizsgálatának eredménye az 1. ábrán látható. Megállapíthatjuk, hogy a meddő iszap (TRM) mészkötési aktivitása a 26. napon (a 13. mérést követően) is már 165 mg/g fölött volt, így hidraulikusan aktív, tekinthető.



1. ábra: Hidraulikus aktivitás vizsgálat eredménye

4. A meddő iszap cementkiegészítő anyagként történő alkalmazásának vizsgálata

Az előállított meddő iszap építőipari felhasználhatóságát az NVKP_16-1-2016-0019 kutatás kémiai ellenállóképességi vizsgálata során alkalmazott két cementtípussal végeztük el kísérleteinket [6].

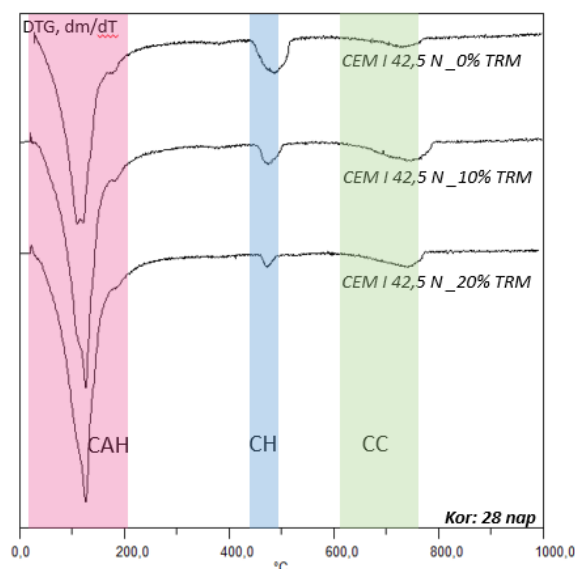
Az alkalmazott cementtípusok:

- CEM I 42,5 N-SR0 szulfátálló portlandcement: Fő alkotórésze a szulfátálló portlandklinker; ezen kívül maximum 5 % mellékalkotórészt és kötőanyagot tartalmazó alkáliszegény cement. Tulajdonságai: nagy szulfátállóság, jó kezdő- és végszilárdság, képlékenyítő-, és folyósító adalékszerekkel együtt alkalmazható, közepes hőfejlesztés. Felhasználható előregyártott vasbeton és feszített betonszerkezetek, agresszív körülményeknek kitett (szulfátok és más agresszív vegyi anyagok) beton és vasbetonszerkezetek, vízzáró betonok, speciális ragasztók, vakolatok, habarcsok esetén.
- CEM I 52,5 R rapid portlandcement: Fő alkotórésze a portlandklinker; ezen kívül maximum 5 % mellékalkotórészt és kötőanyagot tartalmazó cement. Tulajdonságai: jó kezdő- és végszilárdság, gyors szilárdulás, nagy fajlagos felület, jelentős hőfejlődés, jó gőzölhetőség, folyósító adalékszerekkel együtt alkalmazható. Felhasználható nagyszilárdságú

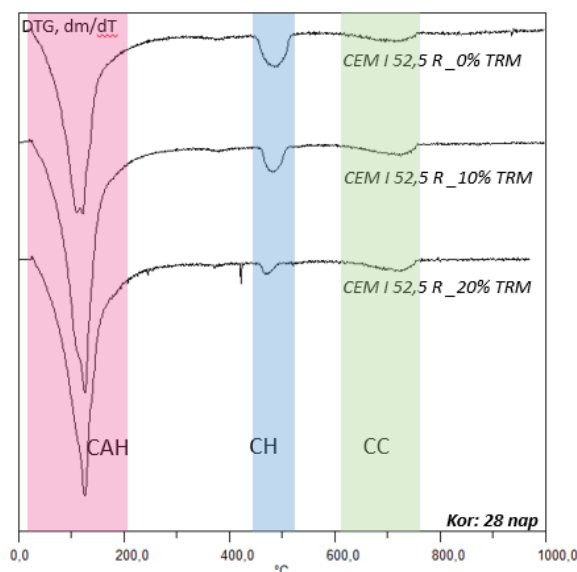
normál-, és különleges betonok, előregyártott vasbeton és feszített betonszerkezetek, pórusbetonok, betontermékek (térfalok, burkoló lapok és betoncserepek), cement alapú ragasztók esetén.

A meddő iszap cementkiegészítő anyagként történő alkalmazásának tanulmányozása során fázisanalitikai (termoanalitikai és röntgendiffrakciós), valamint izoterm kalorimetriás vizsgálatokat végeztünk. A fázisanalitikai vizsgálatokhoz a két különböző portlandcementtel és 0, 10 és 20 % meddő iszap adagolásával készítettünk példányokat. A cement-meddő iszap adagolások a kalorimetriás vizsgálatokhoz készített minták esetében az 1. táblázatban láthatók. A minták készítésekor a víz/cement (v/c), illetve víz/kötőanyag tényező 0,5 volt.

A hidratáció követésére öt különböző (1, 2, 3, 7 és 28 nap) korban végeztünk vizsgálatokat.



2. ábra: DTG görbék, CEM I 42,5 N-SR0 cement és meddő iszap 0, 10 és 20 m% adagolással



3. ábra: DTG görbék, CEM I 52,5 R cement és meddő iszap 0, 10 és 20 m% adagolással

4.1 Termoanalitikai vizsgálatok

A termoanalitikai vizsgálatokat Derivatograph Q 1500-D készülékkel végeztük. A 2. és 3. ábrán a két cementtípus és a meddő iszap 0, 10 és 20 m% adagolásával készített, 28 napos korú minták DTG (derivált termogravimetriai) görbéit láthatjuk. A DTG görbéken látható csúcsok a dehidratációs és termikus disszociációhoz köthető, tömegváltozással járó reakciókhoz köthetők.

A 4. ábrán látható a cementhidratáció egyik legfontosabb jellemzőjének, a kalcium-hidroxid fejlődésnek a változása a minta korával, 28 napos korig mérve. A 4.a és 4.c ábrán a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hőbomlásából származó víz mennyiségét, a termogravimetriai (TG) tömegveszteségeket Δm_{TG} , tehát az eltávozott víz mennyiségét ábrázoltuk, míg a 4.b és 4.d ábrákon az ezen tömegveszteségekből számolt kalcium-hidroxid tartalmak kerültek ábrázolásra (sztöchiometriai szorzófaktor: 4,12).

Az eredményekből megállapíthatjuk, hogy mindkét cementtípus esetében a 10 m% meddőiszap adagolás a kalcium-hidroxid nagyobb mértékű fogyását idézte elő, mint amilyen mértékű portlandit tartalom csökkenés a hígítási jelenséggel magyarázható: tehát nem 10 m%-kal csökkent a portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) mennyisége, hanem annál nagyobb mértékben. Ez azt jelenti, hogy a meddőiszap puccolánosan reagált a kalcium-hidroxiddal, ami annak a további fogyását idézi elő. Ezt az állítást támasztja alá a mésztelítési vizsgálat eredménye is (az anyag hidraulikusan aktív).

A további 10 m% (azaz összesen 20 m%) meddőiszap adagolás nem csökkenti arányosan a kalcium-hidroxid mennyiségét.

Ennek oka általában az, hogy a cementkiegészítő anyagok nagyobb mennyisége a finom részecskék aggregálódása miatt már nehezebben diszpergálható a cementpépben, így a nagyobb mennyiségű cementkiegészítő anyag részben inert töltőanyagként viselkedett a vizsgált korokban.

4.2 Röntgendiffrakciós vizsgálatok

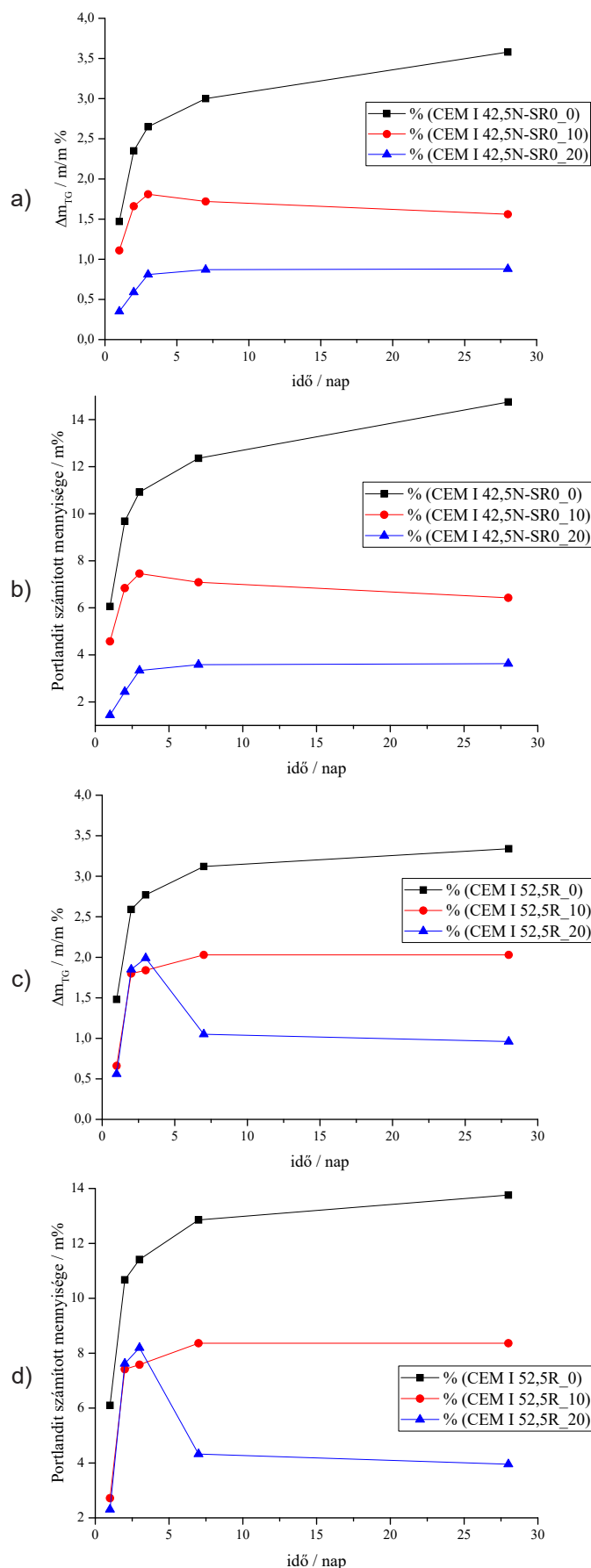
Az 5. és 6. ábrán láthatók a két különböző cementtípussal és a 0, 10 és 20 m% meddőiszap adagolással, 0,5 víz-kötőanyag tényezővel készített cementpép minták röntgendiffrakciós vizsgálatának eredményei. A röntgendiffrakciós mérések 28 napos korban készültek PANalytical Xpert Pro MPD XRD röntgen-pordiffraktométerrel, X'celerator detektorral.

Mindkét vizsgálati sorozat esetében a felismerhető fázisok a kalcium-hidroxid (portlandit), az ettringit, a kalcium-aluminát-szilikát hidratok (CASH), kalcium-karbonát, valamint a még hidratálatlan klinkerásványok.

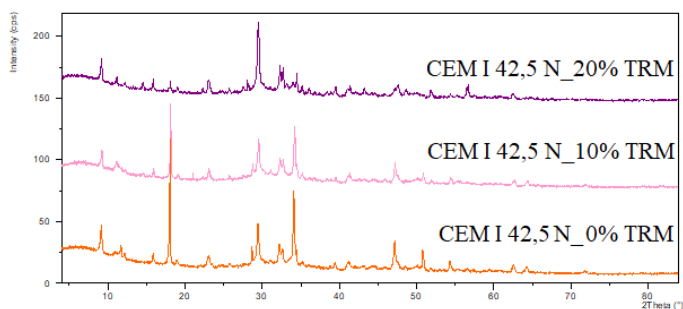
Hasonlóan a termoanalitikai mérési eredményekhez, a portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) jellemző csúcsának ($2\theta = 18,04^\circ$) csökkenő intenzitása látható a növekvő meddőiszap adagolás függvényében.

4.3 Kalorimetriás vizsgálatok

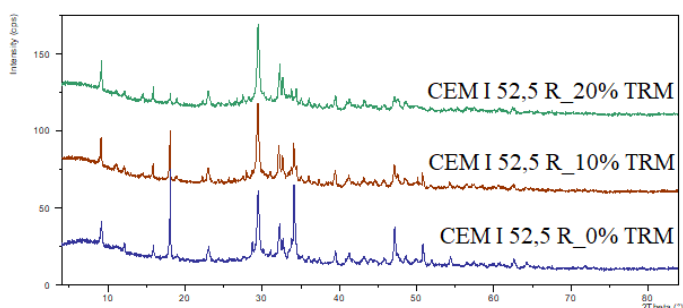
A cementek hidratációs folyamatára több tényező is hatással van, többek között a víz-cement tényező és a



4. ábra: A minták TG tömegveszteségei, valamint az azokból számított portlandit tartalom



5. ábra: Röntgendiffrakciós vizsgálat eredménye, 28 napos korban, CEM I 42,5 N-SR0 cement és meddő iszap 0, 10 és 20 m% adagolással



6. ábra: Röntgendiffrakciós vizsgálat eredménye, 28 napos korban, CEM I 52,5 R cement és meddő iszap 0, 10 és 20 m% adagolással

hőmérséklet. A méréshez alkalmazott izoterm kaloriméter esetén állandónak tekinthető a környezet hőmérséklete, így a hidratációs folyamat során termelődő hőt tudjuk detektálni.

A vizsgálatokat 3 csatornás TAM Air Isothermal Calorimeter eszközzel végeztük. A mért értékek az 1. táblázatban láthatók. A táblázatban a cement jele alatt a meddőiszap adagolás (pl. TRM-5) látható m%-ban.

1. táblázat: A vizsgált cementek és meddő iszap keverékének hőfejlődés adatai

CEM I 42,5 N-SR0 cement		CEM I 52,5 R cement	
Minta neve	Hőfelszabadulás 65 h alatt [kJ]	Minta neve	Hőfelszabadulás 65 h alatt [kJ]
CEMI-S-100	1,471	CEMI-R-100	1,517
CEMI-S-95 TRM-5	1,092	CEMI-R-95 TRM-5	1,281
CEMI-S-90 TRM-10	0,848	CEMI-R-90 TRM-10	1,032
CEMI-S-85 TRM-15	0,755	CEMI-R-85 TRM-15	0,829
CEMI-S-83 TRM-17	0,733	CEMI-R-80 TRM-20	0,725
CEMI-S-80 TRM-20	0,679	CEMI-R-76 TRM-24	0,657
CEMI-S-70 TRM-30	0,466	CEMI-R-70 TRM-30	0,361

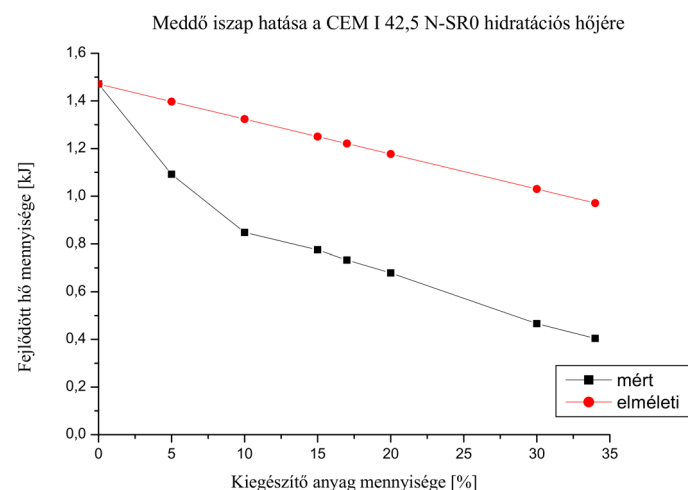
A mérések során kapott hidratációs hőértékek összehasonlíthatósága érdekében kiszámoltuk az elméleti hidratációs hőfejlődést, amikor teljesen inert cementkiegészítő anyag alkalmazását feltételezzük, adott tömeg%-os cement helyettesítések esetén. Ennek módja, hogy a kiegészítőanyag-mentes tiszta cement hidratációs hőjét 100 %-nak tekintjük, és pl. a 10 %-os helyettesítés esetén az előbb megállapított hőfejlesztés 90 %-át vesszük, és így tovább. Ennek értékei a 2-3. táblázatokban láthatók.

2. táblázat: A CEM I 42,5 N-SR0 számolt hidratációs hőmennyiség adott tömegű cementre

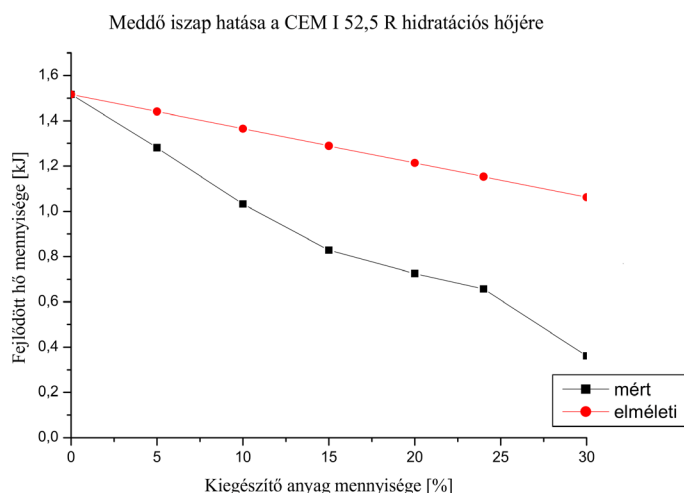
Cement mennyisége [g]	Számolt felszabadult hőmennyiség [kJ]
10,0	1,471
9,5	1,397
9,0	1,324
8,5	1,25
8,3	1,221
8,0	1,177
7,0	1,03
6,6	0,971
6,0	0,883

3. táblázat: A CEM I 52,5 R számolt hidratációs hőmennyiség adott tömegű cementre

Cement mennyisége [g]	Számolt felszabadult hőmennyiség [kJ]
10,0	1,517
9,5	1,441
9,0	1,365
8,5	1,289
8,0	1,214
7,6	1,153
7,0	1,062
6,0	0,91



7. ábra: A CEM I 42,5 N-SR0 hidratációs hőjére gyakorolt hatás a TRM mennyiségének függvényében



8. ábra: A CEM I 52,5 R hidratációs hőjére gyakorolt hatás a TRM mennyiségének függvényében

Az adatok grafikus ábrázolása a 7-8. ábrákon láthatók. A diagramok elemzése alapján az a következtetés vonható le, hogy a számolt elméleti hőfejlődés értékeknél jóval nagyobb a meddőiszapnak a cement hidratációs hőfejlődésére kifejtett, a cement hidratációs hőfejlődését csökkentő hatása. Ez fontos szempont lehet tömegbetonok (pl. gátak, nukleáris létesítmények) esetében, ahol a hidratációs hőfejlesztés csökkentése nagy jelentőséggel bír.

5. Összefoglalás

A kutatás során megvizsgáltuk a vörösiszap kezelése után visszamaradó nagy mennyiségű meddő iszap, mint technológiai hulladék építőipari alkalmazhatóságát. Ehhez meghatároztuk a meddő iszap hidraulikus aktivitását és további analitikai módszerekkel (izoterm kalorimetriával, termoanalitikával és röntgendiffrakciós fázisanalízissel) a cementkiegészítő anyagként történő alkalmazhatóságát. A cementpép minták elkészítéséhez két eltérő típusú portland cementet és változó meddő iszap adagolást alkalmaztunk, 0,5 víz-kötőanyag tényezővel.

A meddő iszap a mézlekötési vizsgálat alapján hidraulikusan aktív, mivel a mérés 26. napján is már 165 mg/g fölötti aktivitással rendelkezett.

A fázisanalitikai vizsgálati eredményekből megállapíthatjuk, hogy mindkét cementtípus esetében a 10 m% meddő iszap adagolás kalcium-hidroxid nagyobb mértékű fogyását idézte elő, mint ami a hígítási jelenséggel magyarázható: ezekben a mintákban nem

10 m%-kal csökkent a portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) mennyisége, hanem annál nagyobb mértékben. Ez azt jelenti, hogy a

meddő iszap puccolánosan reagál a kalcium-hidroxiddal, ami annak a fogyását idézi elő. Ezt támasztja alá a mézselítési vizsgálat eredménye is (az anyag hidraulikusan aktív). Hasonló jelenség figyelhető meg metakaolin cementkiegészítő anyag alkalmazásánál is, ami miatt a cementkiegészítő anyagok optimális adagolását általában meghatározzák (ez metakaolin esetében 10-15 m%) és szabványban szabályozzák.

Az izoterm kalorimetriás összehasonlító vizsgálatok alapján a meddő iszap adagolása mindkét cement típus esetében az inert helyettesítő anyaggal kevert cement elméleti hidratációs hő csökkentésénél nagyobb mértékű.

Köszönetnyilvánítás

A Szerzők köszönetet mondanak a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalnak a „Nemzeti versenyképességi és kiválósági program” keretén belül, az NVKP-16-1-2016-0019 pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért!

Irodalomjegyzék

- [1] Hind, A. R., Bhargava, S. K., Grocott, S. C.: The surface chemistry of Bayer process solids: a review. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1999, pp. 359-374. ISSN 0927-7757
- [2] Bánvölgyi G.G.: The Failure of the Embankment of the Red Mud Reservoir at Ajka (Hungary), *Proceedings of the 36th International ICSOBA Conference*, 2018, pp. 387-400.
- [3] Kopecskó K.: 10 év távlatában: vörösiszap katasztrófa Kolontáron. In the perspective of 10 years: red mud disaster in Kolontár; XXIV. Nemzetközi Építéstudományi Online Konferencia – ÉPKO, 2020, pp. 62-70. ISSN 2734-4525
- [4] Donatello, S., Tyrer, M., Cheeseman, C. R.: Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 2
- [5] MSZ 4706-2:1998 Cement kiegészítő anyagok. Természetes puccolánok
- [6] NVKP_16-1-2016-0019 (2020) Nemzeti Versenyképességi és Kiválósági Program, B alprogram: Anyagtudományi, technológiai nemzeti program – Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózióan fokozottan ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti kifejlesztése. Projektbeszámoló. Szerkesztők: Balázs, Gy; S. Nehme; Lublós, É; Kopecskó K. és Hlavicka V. ISBN 978-963-421-843-2.
https://em.bme.hu/sites/default/files/page/NVKP_16-1-2016-0019%20%20projekt%20A1r%20B3%20kiadv%20A1ny%20FINAL%20web%20HIRES.pdf (Letöltés időpontja: 2022.12.05.)

Az anodizált A356 alumíniumötvözetek felületének és keménységének vizsgálata pásztázó elektronmikroszkóppal és in situ nanoindentációval

Study of Anodic Film's Surface and Hardness on A356 Aluminum Alloys,
Using Scanning Electron Microscope and In-Situ Nanoindentation

Musza Alexandra^a, Ugi Dávid^b, Vida Ádám^c, Nguyen Quang Chinh^d

^aBay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., Gyártási Divízió, tudományos munkatárs, alexandra.musza@bayzoltan.hu

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Anyagfizikai Tanszék, PhD hallgató

^bEötvös Loránd Tudományegyetem, Anyagfizikai Tanszék, kutatási referens, david.ugi@ttk.elte.hu

Természettudományi Kutatóközpont, Anyag- és Környezetkémiai Intézet, fizikus

^cBay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., Gyártási Divízió, divízióigazgató, adam.vida@bayzoltan.hu

^dEötvös Loránd Tudományegyetem, Anyagfizikai Tanszék, egyetemi tanár, chinh@metal.elte.hu

Kulcsszavak

anodizálás,
alumínium ötvözet,
kompozit szerkezet,
SEM,
nanoindentáció

Absztrakt

Az A356 alumínium gyakran használt ötvözet az autópárhányban olyan alkatrészekhez, mint a dugattyúk, a hengerfejek, amelyek mechanikai tulajdonságai eloxálással hatékonyan növelhetők. Ezen munkákban meghatározott paraméterekkel oxálsav oldatban oxidrétegeket alakítottunk ki az A356 alumíniumötvözetben, majd az így kialakult rétegeket a pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) és az in situ nanoindentáció kombinációjával vizsgáltuk. A kutatás célja a szubsztátum és az oxidréteg kapcsolatának megértése annak mikroszerkezetének és nanokeményiségének vizsgálatával. A speciális kompozit mikroszerkezet és ennek megfelelő, nagy keménységet mutató kísérleti eredmények alapján ez az ötvözet a jövőben is több vizsgálat témáját képezheti autópárhány alkalmazások tekintetében.

Keywords

anodizing,
aluminum alloy,
composite structure,
SEM,
nanoindentation

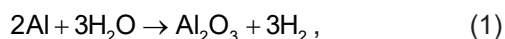
Abstract

The A356 aluminum alloy is a very commonly used alloy in the automotive industry, for parts such as pistons, cylinder heads, and connecting rods, for which the mechanical properties can be effectively increased by anodizing. In this work, oxide layers were formed in oxalic acid solution with defined parameters on A356 aluminum alloy and then studied by using a novel combination of the scanning electron microscope (SEM) and in-situ nanoindentation. The purpose of this research is to understand the relationship between the substrate and the oxide layer by examining its microstructure and nanohardness. Based on the experimental results showing special composite microstructure and corresponding high hardness, this alloy seems to be a good alternative for replacing steel brake disks in an environmentally conscious manner.

1. Bevezetés

A tiszta alumínium kiváló korrózióállósággal rendelkezik, mivel a felületén spontán passzív alumínium-oxid réteg képződik, de ipari léptékben a jóval kedvezőbb sűrűség ellenére az acélhoz viszonyított korlátozott mechanikai tulajdonságai miatt megfontolással használjuk. Bár az alkalmazott ötvözőelemek javíthatják a mechanikai tulajdonságokat, az ötvözet korrózióállósága azonban csökkenhet [1].

Az A356 alumíniumötvözet egy elterjedt Si-tartalmú Al-ötvözet, amely alacsony költséggel, könnyű kezelhetőséggel, a szilárdság és a hajlékonyság jó kombinációjával, valamint a légköri korrózióval szembeni kiváló ellenállással jellemezhető. Az Al-ötvözetek jobb korrózióállóságának elérése érdekében az anodizálás egy költséghatékony felületkezelési módszer egy speciális oxidréteg létrehozására a minta felületén. Az anodizálás egy elektrokémiai folyamat, amely elősegíti az alumínium-oxid növekedését az (1) kémiai egyenlet szerint:



ahol az anodizálandó alkatrészt elektrolitban (általában savas oldatban) anódként használják. Az eljárás növeli a természetes oxidréteg vastagságát és módosítja annak szerkezetét [2].

Az anodizálási eljárás során nanoszerkezetű oxidfilm képződik, amely az alapfémből növekszik, és megfelelő elkészítés esetén kiváló kopási tulajdonságokkal rendelkező, kemény, korrózió- és kopásálló bevonatot kölcsönöz az alampintának. A különböző alkalmazásokhoz az oxidrétegek eltérő morfológiájára van szükség, amely az

anodizálási körülményektől függően változtatható. Ha a keletkező oxid részben oldódik az elektrolitban (például oxálsavban), akkor pórusos oxidok képződnek. Azonban, például bórsav és borkősav elektrolitok használatakor, ha az oxid nem oldódik, az oxidréteg vékony és pórus nélküli lehet. Ez a tulajdonság lehetővé teszi az oxid színezését szerves színezékek, pigment impregnálással vagy különböző fémek elektrolitikus bevonattal történő bevonásával a bevonat pórusaiba [3, 4].

A bevonat vastagságát leginkább a fém/oldat határfelületen áthaladó elektromos töltés, a hőmérséklet és az elektrolit kémiai összetétele befolyásolja [5]. Az alumínium mintákon lévő anódoxid réteg vastagságának, keménységének és kopásállóságának ipari célokra jó minőségűnek kell lennie [6].

Az optimális eloxált réteg eléréséhez ismerni kell a réteg kialakulásának feltételeit. A szakirodalom szerint az alacsony hőmérséklet és a nagy anódos áramsűrűség vastag réteget eredményezhet [7], de a réteg keménysége csökkenhet. A jelenség az oxidréteg egyenetlen növekedésével jellemezhető, amely egyes pontokon a záróréteg kiegyensúlyozatlan kialakulásának és feloldódásának eredménye [8-11], amely a réteg színét is szürkéről feketére módosítja. Ezenkívül a bevonat vastagsága is erősen befolyásolja az anódos alumínium-oxid érdességét és adhézióját [12]. Az oxidréteg kialakulásával együtt az anódfilm keménysége általában nagyobb, mint a hordozóé [13].

Jelen munka főként eloxált, újrahazsírított A356 alumíniumminták mikroszerkezetének és mechanikai tulajdonságainak vizsgálatára irányul a pásztázó elektronmikroszkóp és az in situ nanoindentációs módszerek újszerű kombinációjával.

2. A kísérlet leírása

A kezeletlen minta (A356 Al ötvözet) kémiai összetétele Al-7Si-0,29Mg tömeg%-ban. Az anodizálendő minták téglalap alakúak voltak. Az 1. ábra a kezeletlen mintát mutatja.



1. ábra: A kezeletlen minta

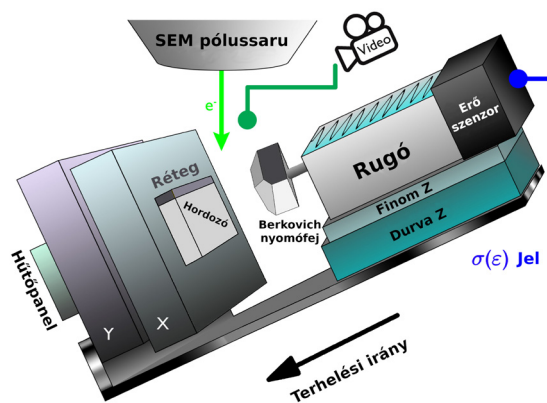
A berendezési egységünkben anódként használtuk a mintát, a katódunk egy alumínium rács volt, mely a mintát szimmetrikusan ölelte körbe. Az anodizálás során a fő paramétereink a sav összetétele és koncentrációja, a hőmérséklet, az áramsűrűség, a feszültség és a folyamat időtartama voltak. Az anodizálás hatékonyságát az elektrolit hőmérsékletének szabályozásával és keverésével (200 ford./perc) növeltük. Az előzetes kísérletek alapján 10 °C-nak választott állandó hőmérsékletet termosztát segítségével biztosítottuk, és hőmérővel folyamatosan ellenőriztük. A kísérleti paramétereket Csokán Pál könyve alapján állítottuk be [14]. Az előzetes eredmények alapján, figyelembe véve a kísérletek megvalósíthatóságának elfogadható feltételeit és a gazdaságossági megfontolásokat, 1-6 A/dm² áramsűrűség mellett 4 óráig terjedő időtartamban anodizáltuk a mintákat.

A minták természetes oxidrétegének eltávolításához 80-2500 grit keménységű SiC papírral csiszoltunk, majd Ø7 µm alumínium-oxid pasztával políroztunk. Ezután szobahőmérsékletű foszfát-fürdőt alkalmaztunk a szennyeződések eltávolításához.

3. Elvégzett vizsgálatok

E cikkben nagy hangsúlyt fektetünk a szerkezetvizsgálatra, mely állt először optikai (Keyence VHX-2000), majd pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatból (TESCAN VEGA & FEI Quanta 3D FEG), az in situ mérésnek megvalapozandóan. Az oxidrétegek vastagságát a minták keresztmetszetén mértük optikai mikroszkóppal.

Az alumínium autóipari felhasználásának egyik fontos feltétele a megfelelő keménység. Eddig mindig az eloxált felületen végeztek keménységméréseket, ami több problémát is felvet. A réteg vékonysága miatt csak kis erővel mérhető, ami kis mintázatot eredményez. Mivel az anodizált felületet nem szabad polírozni, így a mérés nagyfokú bizonytalanságot hordoz magában. Ebben a munkában a standard mikrokeménység mérések mellett in situ nanokeménység vizsgálatokat is végeztünk.



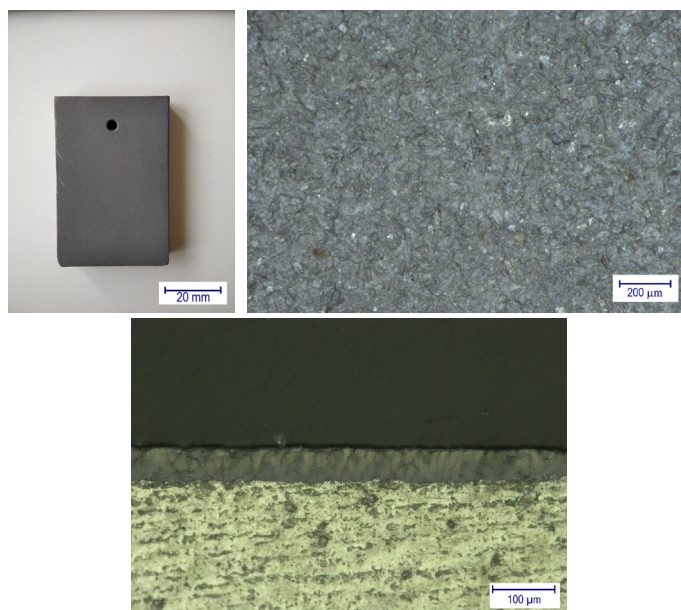
2. ábra: In-situ nanoindenter 3D ábrája

A mikrokeménységi vizsgálatokat Berkovich-fejjel ellátott UMIS indentációs eszközzel, 500 mN maximális terhelés mellett végeztük. Az in situ nanokeménység méréseket egy nemrégiben kifejlesztett mobil nanoindenterrel [15, 16] hajtottuk végre, amely SEM-be integrálható. A 2. ábrán az eszköz sematikus vázlata látható.

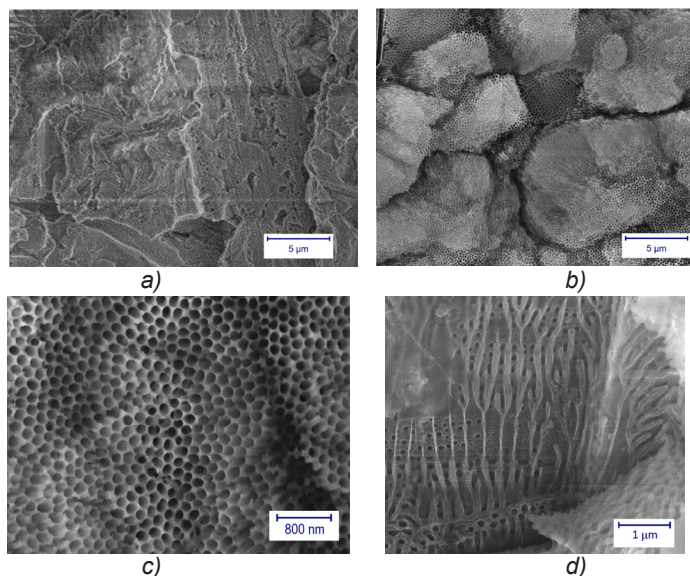
Azáltal, hogy az eszközünk beépíthető az elektronmikroszkópba, a benyomás valamint a deformációs folyamat is nyomon követhető, így az oxidréteg vékony keresztmetszetében nanokeménység méréseket lehet végezni. A benyomódás és a terhelés mérésének pontossága ~1 nm, illetve ~1 µN volt. Az eszköz részletesebb leírását a [15] tanulmány tartalmazza.

4. Eredmények

A 3. ábra $j = 1 \text{ A/dm}^2$ áramsűrűséggel 1 órán keresztül anodizált minták jellemzően szürke színű felületét mutatja (3. ábra fent), valamint annak keresztmetszetét (3. ábra lent), amely a réteget és a szubsztrátumot is tartalmazza. Pásztázó elektronmikroszkóppal kimutatható, hogy az anodizált felület szerkezete erősen függ az anodizált körülményektől, elsősorban az alkalmazott áramsűrűségtől (j).



3. ábra: Az anodizált minta, annak felülete (fent) valamint keresztmetszete (lent) optikai mikroszkóp alatt



4. ábra: Elektronmikroszkópos felvételek az anodizált rétegek mikrostruktúrájáról:

a) kompakt felületet mutatnak anodizálás után
 $j = 1 \text{ A/dm}^2$ -nél 1 órán keresztül,

b, c) méhsejt-szerű szerkezet alakult ki $j = 6 \text{ A/dm}^2$ -nél 1 órán keresztül,

d) a méhsejt szerkezet keresztmetszeti felvétele

Az 4. ábra a SEM képeket mutatja az anodizált felületek két tipikus mikrostruktúrájával. A kis áramsűrűség ($j = 1 \text{ A/dm}^2$) alkalmazása viszonylag tömör felületet eredményezett (lásd 4a. ábra). Nagyobb ($j = 6 \text{ A/dm}^2$) áramsűrűség esetén azonban egészen más felület figyelhető meg a mikroszkópos skálán (4b. ábra). Ebben az esetben – a méhsejt-szerkezethez hasonlóan – pórusos mikrostruktúra képződik. A pórusos szerkezet jól megfigyelhető a felületi (4c. ábra) és az anodizált réteg keresztmetszeti felvételén (4d. ábra) is. Az anodizált réteg porozitás szempontjából kompozit szerkezetnek tekinthető, amely számos előnyös mechanikai tulajdonsággal rendelkezhet. Azt is meg kell jegyezni, hogy az anodizált réteg vastagsága erősen függ az alkalmazott áramsűrűség nagyságától. Az 1 órás anodizálási időre a 4a. ábrán látható $j = 1 \text{ A/dm}^2$ -nél képződött réteg vastagsága kb. $40 \mu\text{m}$, míg a 4b. ábrán látható $j = 6 \text{ A/dm}^2$ -nél kialakuló réteg vastagsága kb. sokkal magasabb, körülbelül $120 \mu\text{m}$.

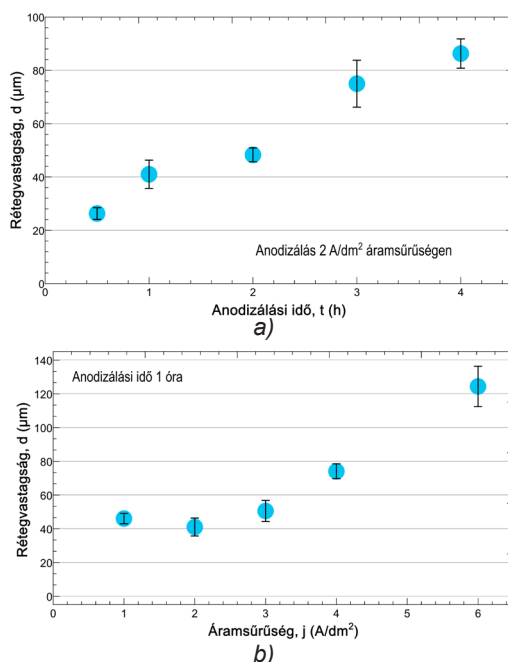
Köztudott, hogy az anodizálás során az oxidrétegek a hordozó külső rétegének kémiai átalakulásával jönnek létre. Így a felületi fémréteg különböző fizikai tulajdonságainak, kémiai összetételének és gyártástechnológiai előzményeinek kombinációja fontos irányító hatással van a kialakuló réteg tulajdonságaira. Az anodizálási körülményektől függően kisebb, nagyobb pórusok is megjelenhetnek, de nem jellemzőek [8]. A jelen kísérleti eredmények azt mutatják, hogy a nagy anodizáló áramsűrűség alkalmazása jól fejlett pórusos réteg kialakulásához vezet.

Az 5. ábra további eredményeket mutat be az alkalmazott áramsűrűség és az anodizálási idő hatásáról az anodizált rétegek vastagságára. Látható, hogy állandó áramsűrűségű anodizálás közben az anodizált réteg vastagsága (d) lineárisan változik az anodizálási idővel (t) (lásd 5a. ábra). Ugyanakkor 1 órás anodizálásnál (lásd 5b. ábra)

az anodizált réteg vastagsága (d) nem változik lineárisan az áramsűrűséggel (j). Feltételezhető, hogy egy bizonyos anodizálási idő alatt a rétegvastagság változását erősen meghatározza az említett pórusok kialakulása. Nem túl nagy áramsűrűségnél, ahol a Joule-hő és az elektromos tér miatti oldódás esetleg nem elég erős, a pórusok nem fejlődtek ki eléggé ahhoz, hogy növeljék az anodizálás intenzitását. Ezért kisebb áramsűrűségnél úgy tűnik, hogy egy bizonyos ideig kialakult rétegvastagság nem függ az áramsűrűségtől. A nagyobb áramsűrűség kellően nagy pórusok kialakulását eredményezheti, ami már növelheti az anodizálás intenzitását, és így a réteg vastagsága az áramsűrűség növekedésével ebben a tartományban növekedhet, ahogy az a 5b. ábrán látható. Ezen kívül nyilvánvaló, hogy az anodizált réteg szigetelő hatása miatt a réteg nem fog nagyobbra nőni egy maximális vastagságnál.

A mikroszerkezet megfigyelésével együtt az anodizált rétegek mechanikai tulajdonságait is vizsgáltuk keménységméréssel mind a felületen, mind a rétegek keresztmetszetén. Mint már említettük, mivel az anodizált felületet nem szabad polírozni, a mérés csak nagyfokú bizonytalansággal értelmezhető. A felületen végzett mikrokeménységi mérések eredményei azonban egyértelműen az anodizálásból fakadó jelentős növekedését mutatják a keménységértékben. Míg a hordozó keménysége körülbelül $0,6 \pm 0,1 \text{ GPa}$, addig az anodizált felületeken kapott érték legalább ennek négyszerese, $2,8 \pm 0,8 \text{ GPa}$ -n belül változik. Megjegyzendő, hogy a jelen munkában kapott hordozó keménységi értéke ($0,6 \pm 0,1 \text{ GPa}$) majdnem megegyezik a [17, 18] -ben közölt értékkel.

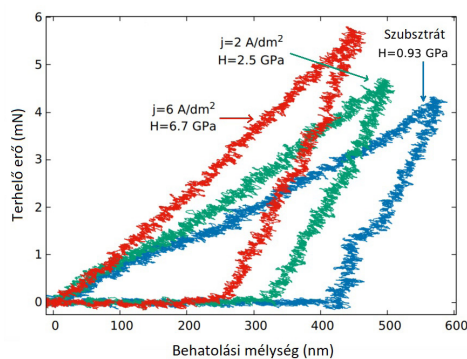
Munkánk során az volt a motivációnk, hogy jobban megértsük az anodizált rétegek mikroszerkezetének a mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását. Ennek érdekében



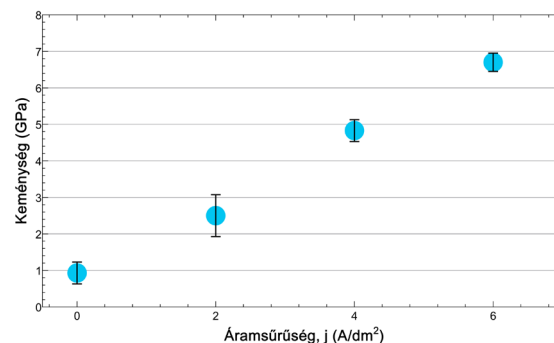
5. ábra: Az anodizált rétegek vastagsága:

a) különböző időpontokban $j = 2 \text{ A/dm}^2$ -nél,

b) különböző áramsűrűségeknél 1 órán keresztül



6. ábra: Különböző áramsűrűség mellett 1 órán keresztül anodizált minta keresztmetszetén kapott benyomódási görbék



7. ábra: Különböző áramsűrűség mellett 1 órán keresztül anodizált minták keresztmetszetén kapott keménység értékek

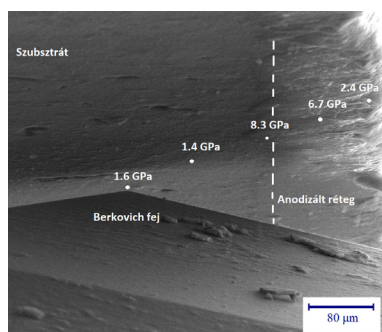
a nanokeményiség méréseket a rétegek keresztmetszetén, a korábban leírt in situ nanoindenter eszközzel végeztük. Legjobb tudomásunk szerint az anodizált réteg keresztmetszetére vonatkozó keménységmérésekről a szakirodalom eddig nem számolt be ilyen felbontással. A technika fejlődésének köszönhetően az alkalmazott terhelés, és elmozdulás, valamint a mérési pozíció könnyen kimutatható és nagy pontossággal meghatározható. A 6. ábra három jellemző mélységi-terhelési (h - F) benyomódási görbét mutat be a 4. ábrán látható mikrostrukturákkal rendelkező két minta hordozójának és anodizált rétegének keresztmetszetén. Ezen görbék tendenciáját figyelembe véve minőségileg belátható, hogy a 2 A/dm^2 -nel anodizált minta mikroszerkezete (a 6. ábrán zöld görbével jellemezhető) lágyabb, mint a 6 A/dm^2 -nel anodizálté (piros görbe).

A különböző áramsűrűségen anodizált minták keménységi értékét a jól ismert Oliver-Pharr módszerrel határoztuk meg [19, 20] és a 7. ábrán mutatjuk be. A keresztmetszeten kapott kísérleti eredmények egyrészt azt mutatják, hogy a réteg keménysége jelentősen megnövekszik a hordozóhoz képest ($j=0\text{ A/dm}^2$), valamint függ az alkalmazott feszültségtől. Az 5b és a 7. ábra alapján azon összefüggés tehető, miszerint a rétegvastagság növekszik annak vastagságával.

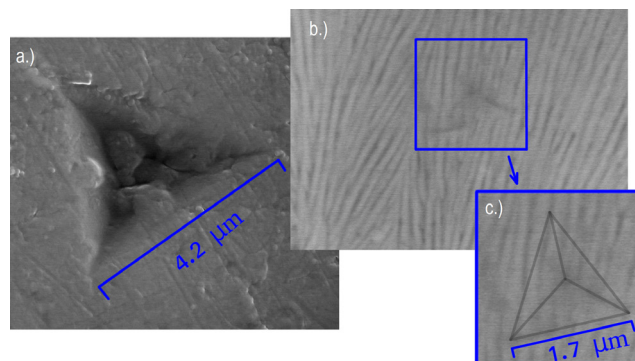
A pásztázó elektronmikroszkóp és az indentáció kombinációja lehetővé teszi, hogy szisztematikusan vizsgáljuk a keménységet a réteg vastagsága mentén egy adott mintán, a 8. ábrán látható módon.

A rétegek kis vastagsága miatt, ezeknél a nanoindentációs méréseknél csak kis, kb. 4 mN maximális terhelést

alkalmaztunk. A jól ismert mérethatás [21-23] következtében a nanokeményiségi értékek általában magasabbak, mint a megfelelő mikrokeményiségi értékek. A réteg keménységének relatív változása a hordozó keménységéhez képest minden esetben egyértelműen az anodizált rétegek erősödését jelzi. Mivel az alapmechanizmus nem jól ismert, további vizsgálatok szükségesek az anodizált réteg keménységi változásának tisztázására. Figyelembe véve a rétegek képződés folyamatát, amely az aljzaton a szilárd oxid képződését és feloldódását, majd a porózus szerkezetet kifelé mutatja, vélhetően a nagyobb porozitás (kisebb anyagsűrűség) alacsonyabb keménységet eredményezhet a réteg külső oldalán. A két mérési módszer kombinációjának másik előnye a mikrostruktúra azonnali vizsgálata a benyomódási minta alatt. A 9. ábra a 7. ábrán bemutatott, 6 A/dm^2 -rel anodizált minta benyomódási görbének megfelelő mintázatokat mutatja (lásd a kék és piros görbét). A nagyobb (9a. ábra) a szubsztrátumot jellemzi, a kisebb esetre (9b. ábra) pedig alig látható bemélyedést kaptunk a réteg közepe közelében. Ennek a Berkovich-mintának a kontúrja a jobb oldali képen látható (9c. ábra). Az is látható, hogy a nagyobb keménység szerint a rétegen megfigyelhető mintázat mérete jóval kisebb, mint a hordozón. Továbbá nagyon érdekes látni a rostos mikrostrukturát a rétegben lévő kisminta alatt és körül. Ezek a szálak a 4. ábrán látható póruscsatornák. Meggyőződésünk, hogy a pórusos csatornákkal ellátott anodizált oxidréteg, amely kompozit anyagként működik, nagymértékben javítja az anodizált minták felületi keménységét, illetve mechanikai tulajdonságait.



8. ábra: Keménységi értékek, melyeket a szubsztráton és az anodizált réteg vastagsága mentén ($j=6\text{ A/dm}^2$, $t=1\text{ h}$) a SEM és a nanoindentáció kombinációjával nyertünk



9. ábra: Elektronmikroszkópos keresztmetszeti felvétel a benyomódási mintákról (a) a szubsztráton és (b, c) az anodizált réteg közepén

5. Összefoglalás

Az A356 alumíniumötvözet felületén kialakult anodizált réteg mikroszerkezetét és mechanikai tulajdonságait SEM, mikrokeménység- és in situ nanokeménységi tesztekkel vizsgáltuk. A fő eredményeket a következőképpen lehet összefoglalni:

1. Kimutattuk, hogy az anodizált A356 alumínium ötvözet felületi rétegének mikrostruktúrája jelentősen befolyásolható az alkalmazott áramsűrűség mértékével. Megfelelően nagy anodizáló áramsűrűség alkalmazása jól fejlett pórusos réteg kialakulásához vezet, amely kompozit szerkezetű filmnek tekinthető.
 2. Kimutattuk, hogy a kialakult filmréteg hatékonyan erősíti az alumínium alapú hordozó felületét. Az anodizált minták keménysége hatszor nagyobb lehet, mint a kiindulási anyagé.
 3. A jelen eredmények egyrészt rávilágítanak a SEM és az in situ nanoindentációs módszerek kombinációjának hasznosságára, másrészt arra utalnak, hogy a pórusos csatornákkal ellátott anodizált oxidréteg, amely kompozit anyagként működik, nem csak növeli a felületi keménységet, de javíthatja az anyag kopásállóságát is. A kapott eredmények nemcsak az alapkutatásban, hanem az újrahaznosítható Al-ötvözetek gazdaságos alkalmazásában is fontosnak tekinthetők.
- Hosszútávú célunk az akár végtelenszer újrahaznosítható, nagy mennyiségben rendelkezésre álló fémhulladék feldolgozása, majd annak környezetbarát módon történő felületkezeléssel járó átalakítása. Ez az elektromos járműiparban jó alternatívája lehet a sokkal nehezebb acél féktárcsáknak, hiszen csökkenthető a jármű tömege, ezáltal a károsanyag kibocsátása/fogyasztása is.

Ennek megfelelően további mechanikai (érdesség, keménység), tribológiai (koptatási) és szimulációs vizsgálatok szükségesek, melyekből bizonyosságot nyerhetünk a megoldás bevezethetőségéről.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők külön köszönetet mondanak Windisch Márknak és Groma Istvánnak a SEM, illetve a nanoindentációs vizsgálatokban nyújtott segítségükért. A Bay Zoltán Kft. kutatása a KIC-RADIUS projekt és a TKP2020-NKA-18 projektszámú, a Kulturális és Innovációs Minisztérium által a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból, a 2020-4.1.1-TKP2020 támogatási keretből finanszírozott támogatással valósul meg. NQC kutatását a 2021-1.2.5-TÉT-IPARI-RU-2021-00001 számú magyar-oroszl kutatási program (TÉT) finanszírozta.

Irodalomjegyzék

- [1] Zhu, B.: On the Influence of Si on Anodising and Mechanical Properties of Cast Aluminium Alloys. Ph.D. Thesis, Jönköping University, Jönköping, Sweden, 2017.
- [2] Whelan, M., Barton, K., Cassidy, J., Colreavy, J., Duffy, B.: Corrosion inhibitors for anodised aluminium. Surf. Coat. Technol. 2013, 227, 75–83.
- [3] Roshani, M., Rouhaghdam, A.S., Aliofkhaezei, M., Astaraee,

- A.H.: Optimization of mechanical properties for pulsed anodizing of aluminum. Surf. Coat. Technol. 2017, 310, 17–24.
- [4] Liu, S., Tian, J., Zhang, W.: Fabrication and application of nanoporous anodic aluminum oxide: A review. Nanotechnology 2021, 32, 222001.
 - [5] Grubbs, C.A.: Anodizing of aluminum. Metal Finish. 1999, 97, 476–493.
 - [6] Kwolek, P.: Hard anodic coatings on aluminum alloys. Adv. Manuf. Sci. Technol. 2017, 41, 35–46.
 - [7] Sheasby, P.G., Pinner, R., Wernick, S.: The Surface Treatment and Finishing of Aluminium and Its Alloys, ASM international: Materials Park, OH, USA, 2001, Volume 1, p. 231.
 - [8] Liu, S., Tian, J., Zhang, W.: Fabrication and application of nanoporous anodic aluminum oxide: A review. Nanotechnology 2021, 32, 222001.
 - [9] Bensalah, W., Feki, M., Wery, M., Ayedi, H.F.: Thick and dense anodic oxide layers formed on aluminum in sulphuric acid bath. J. Mater. Sci. Technol. 2010, 26, 113–118.
 - [10] Bensalah, W., Elleuch, K., Feki, M., Wery, M., Ayedi, H.F.: Optimization of anodic layer properties on aluminium in mixed oxalic/sulphuric acid bath using statistical experimental methods. Surf. Coat. Technol. 2007, 201, 7855–7864.
 - [11] Yokoyama, K.: Anodic oxidation of aluminum utilizing current recovery effect. J. Met. Finish. Soc. Jpn. 1977, 28, 314–318.
 - [12] Aerts, T., Dimogerontakis, T., De Graeve, I., Franssaer, J., Terryn, H.: Influence of the anodizing temperature on the porosity and the mechanical properties of the porous anodic oxide film. Surf. Coat. Technol. 2007, 201, 7310–7317.
 - [13] Gabe, D.R.: Hard Anodizing—What do we mean by hard? Metal Finish. 2002, 100, 52–58.
 - [14] Csokán P.: Az alumínium elektrokémiai felületkezelése. Műszaki Kiadó. 1975
 - [15] Ispánovity P.D., Ugi D., Péterffy G., Knappek, M., Kalácska S., Tüzes D., Groma I.: Dislocation avalanches are like earthquakes on the micron scale. Nat. Commun. 2022, 13, 1–10.
 - [16] Kalácska S., Dankházi Z., Zilahi G., Maeder, X., Michler, J., Ispánovity P.D., Groma I.: Investigation of geometrically necessary dislocation structures in compressed Cu micropillars by 3-dimensional HR-EBSD. Mater. Sci. Eng. A 2020, 770, 138499.
 - [17] Gecu, R., Karaaslan, A.: Relationship between nanoindentation and wear properties of stainless steel-reinforced aluminium matrix composite. Tribol. Lett. 2017, 65, 164.
 - [18] Vencel, A., Bobic, I., Arostegui, S., Bobic, B., Marinković, A., Babić, M.: Structural, mechanical and tribological properties of A356 aluminium alloy reinforced with Al₂O₃, SiC and SiC+ graphite particles. J. Alloy. Compd. 2010, 506, 631–639.
 - [19] Pharr, G.M., Oliver, W.C., Brotzen, F.R.: On the generality of the relationship among contact stiffness, contact area, and elastic modulus during indentation. J. Mater. Res. 1992, 7, 613–617. Coatings 2022, 12, 1528 13 of 13
 - [20] Oliver, W.C., Pharr, G.M.: An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. J. Mater. Res. 1992, 7, 1564–1583.
 - [21] Hektor, L.G., Schmid, S.R.: Simulation of asperity plowing in an atomic force microscope Part 1: Experimental and theoretical methods. Wear 1998, 215, 247–256.
 - [22] Schmid, S.R., Hector, L.G.: Simulation of asperity plowing in an atomic force microscope. Part II: Plowing of aluminum alloys. Wear 1998, 215, 257–266.
 - [23] Chinh N.Q., Gubicza J., Kovács Z., Lendvai J.: Depth-sensing indentation tests in studying plastic instabilities. J. Mater. Res. 2004, 19, 31–45.



XIII. RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLÓ KONFERENCIA ÉS KIÁLLÍTÁS

2023. március 21–23.

Roncsolásmentes vizsgálatok a szerkezetek életciklusában

**A XIII. Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Konferencia és Kiállítás
2023. március 21–23. között kerül megrendezésre
a Hotel Eger & Park**** patinás szállodai komplexumában.**

**Bővebb információ:
<https://2023.marovisz-rakk.hu/>**

Úton NDE 4.0 felé – Előzetes

Towards NDE 4.0 – Preliminary

A MAROVISZ, együttműködve az ESIS Magyar Nemzeti Bizottsággal szakmai előadássorozatot (roadshow) tervez a szakmai szervezetek és a tagság kapcsolatának az erősítése érdekében, hazánk különböző nagyvárosaiban 2023-ban „Paradigmaváltás a roncsolásmentes vizsgálatban – úton az NDE 4.0 felé” címmel.

Az előadássorozat meghirdetésének háttere és célja:

Forradalmi átalakulás zajlik a világban, az élet szinte minden területén. A digitalizáció, a kiber-fizikai rendszerek, a felhőalapú informatika és a mesterséges intelligencia térhódítása, azaz az információs technológia és az automatizálás összefonódása testesül meg az Ipar 4.0 kifejezéssel leírt negyedik technológiai forradalomban. A fejlődés törvényszerűen megjelenik a roncsolásmentes vizsgálat/értékelés területén is. NDE (Non-Destructive Evaluation) 4.0 néven már átgondolt koncepciók látnak napvilágot és pozicionálják a roncsolásmentes vizsgálat területén zajló technológiai fejlődést, azaz a jövőt az Ipar 4.0-hoz képest, illetve azzal összhangban. Az NDE 4.0 már a technológia olyan új területeire is kiterjed, mint az additív gyártással (3D nyomtatással) előállított termékek vizsgálata, az intelligens szenzortechnológia (Structural Health Monitoring, SHM), az ember-gép kapcsolat vagy a vizsgáló személyek képzése.

A technológia forradalma a 18. század végén kezdődött, amikor az emberi erőt felváltották a víz és a gőz energiáját hasznosító gépek, majd a 19. század második felében folytatódott a villamos energia alkalmazásának, illetve a tömeggyártásnak a bevezetésével. A 20. század második fele hozta meg a következő forradalmi változást, amikor is a mikroelektronika és a számítástechnika átvezetett a digitális korszakba és megkezdődött a folyamatok automatizálása.

Az Ipar 4.0 célja egy tökéletesebb tervezés, gyártás, karbantartás, ellenőrzés az adatok (információ) feldolgozása eredményeként, aminek eszközrendszeréhez olyanok tartoznak, mint a dolgok internete (Internet of Things, IoT), a digitális iker (Digital Twins), a mesterséges intelligencia (Artificial Intelligence), a gépi tanulás (Machine Learning), a virtuális valóság (Virtual Reality) és sorolhatnánk.

A roncsolásmentes vizsgálat/értékelés is átment egy hasonló folyamaton. Ahogy az első ipari forradalom előtti időszakot a kézművesség jellemezte, úgy az NDE esetében az emberi érzékelés tekinthető a kiindulási alapnak. Tágabb értelemben ide sorolható a látás, a hallás, a tapintás, a szaglás és az ízlelés útján szerzett információ. Ezt változtatta meg az NDE 1.0, ami alkalmas eljárások és eszközök használatának a bevezetésével javított az emberi érzékelés hatékonyságán, de a vizsgálat ekkor még csak a tárgyak látható felületére korlátozódott. Az NDE 2.0 terjesztette ki a vizsgálati tartományt a tárgyak belsejébe, mert ekkor kerültek alkalmazásra azok a fizikai ismeretek, amelyek ezt lehetővé tették (az elektromágneses sugárzás

vagy az ultrahang és a szerkezeti anyag kölcsönhatása). A vizsgálati technika ekkor még analóg elven működött. A digitalizáció hozta meg az NDE 3.0 időszakot, aminek eredményeként ma már mindennapi használatban van a digitális radiográfia, a komputer tomográfia vagy a fázisvezérelt ultrahangos vizsgálat. Mindezek ismeretében az NDE 4.0 nem más, mint a negyedik technológiai forradalom vívmányainak az alkalmazása a roncsolásmentes vizsgálat/értékelés területén, aminek eredményeként az NDE szimbiózisba kerül az Ipar 4.0 technológiával.

Az NDE 4.0 terület világszerte kitüntetett figyelemnek örvend. Nemzeti és nemzetközi munkacsoportok alakulnak, nemzeti és nemzetközi konferenciákat tartanak és sorra hirdetnek meg, szakcikk sokasága jelenik meg, egy terjedelmes kézikönyvet is publikáltak ebben a fejlődési folyamatban vezető szereplők 2022-ben és saját YouTube csatornával is rendelkezik a terület. Erről a vonatról nem szabad lemaradni!

A tervezett előadássorozattal ennek a folyamatnak – paradigmaváltásnak – a legfontosabb elemeibe nyújt betekintést, első sorban a nemzetközi tapasztalatokat felhasználva, továbbá irányt mutatva a hazai érintetteknek.

A jelenleg kidolgozás alatt lévő tematika a következő területekre fog előreláthatólag kiterjedni:

- Mérnöki szerkezetek biztonsága, a biztonság szerepe a gazdaságban, a követelmények evolúciója;
- Az ipari forradalmak története, történelmi hajtóerők, az Ipar 4.0 csúcstechnológiái;
- Az NDE 4.0 kialakulása, fejlődése, célja, tulajdonságai, kapcsolata az Ipar 4.0-val;
- A biztonság és az NDE 4.0 kapcsolata;
- Az NDE 4.0 technológiái (digitális iker, gépi tanulás, távolsági NDE, mesterséges intelligencia, robotika, smart NDE, SHM, virtuális/kiterjesztett valóság, szimuláció....);
- Az NDE 4.0 jövője (a várható fejlődés, az NDE 4.0 Moore törvénye);
- Esettanulmányok.

Az előadássorozat természetesen ki kívánja jelölni a MAROVISZ és az ESIS Magyar Nemzeti Bizottság hazai lehetőségeit és szerepét is ebben a korszakváltó folyamatban a mechanikai és az NDE szimulációs szemléleteinek összekapcsolásában rejlő lépések érzékeltetésével.

Trampus Péter Tóth László

Beszámoló az NDE 4.0 nemzetközi konferenciáról

Report on the International Conference on NDE 4.0

2022. október 24. és 27. között rendezte meg a Német Roncsolásmentes Vizsgálati Társaság (DGZfP) Berlinben az NDE 4.0 (Non-Destructive Evaluation 4.0, Roncsolásmentes értékelés 4.0) nemzetközi konferenciát. A rendezvénynek kissé hányatott sorsot adott a pandémia. A 2020-ban meghirdetett első időpont 2021. június volt, a helyszín München. Ezt később a szervezők úgy módosították, hogy két részre bontották a rendezvényt: 2021. áprilisában megrendeztek egy virtuális konferenciát, majd végül idén októberben a személyes részvételűt.

Ahhoz, hogy el tudjuk helyezni a konferencia témáját, azaz az NDE 4.0 koncepciót¹, rögzíteni kell, hogy az Ipar 4.0 teljesen új alapra helyezi a folyamatokat, és ezen belül új utat jelöl ki az NDE számára is. Az új út nem lehetőség, hanem a helyzetből adódó szükségszerűség. Jelenlegi felfogásunk szerint a negyedik ipari forradalomban az NDE beintegrálódik a technológia (általános) forradalma eredményeként kialakuló világba. Az Ipar 4.0 lényegében a meglévő elemek fejlett hálózatának kialakítása a digitális kor eszközeivel, a folyamatban képződő információk felhasználásával a jövő piaci igényeinek a kielégítésére. Vigyázat: a jövő piaci igényei nem azonosak a jelenével, némelyiket még nem is tudjuk megfogalmazni. Ezt a világot kell kiszolgálnia az NDE-nek. Ha az Ipar 4.0 irányából nézzük a jövőt, akkor megállapíthatjuk, hogy az NDE lehetőséget kapott a technológiai forradalom vívmányainak az alkalmazására. Ennek az eredményei beépülnek az NDE technikai megoldásaiba és technológiáiba (pl. robotizáció, különös tekintettel a drónok használatára) vagy az adatfeldolgozásba és értékelésbe (pl. gépi tanulás). A technológiai feltételek lehetőséget teremtenek az NDE adatok statisztikai feldolgozására, egyebek mellett a vizsgálat megbízhatósága, a vizsgálat teljesítőképessége, az eredmények konzisztenciája, a vizsgálatok kompetenciája és végső soron a vizsgálat értékének a megállapítása terén. Az NDE 4.0 irányából szemlélve – talán nem túlságosan öntelten – kijelenthetjük, hogy a roncsolásmentes vizsgálatok szállítják az Ipar 4.0 számára az egyik legnagyobb tömegű és legértékesebb információt. Ehhez természetesen szükség van az IoT-be (dolgok internetébe) történő integrációra, az adatok átláthatóságának biztosítására,

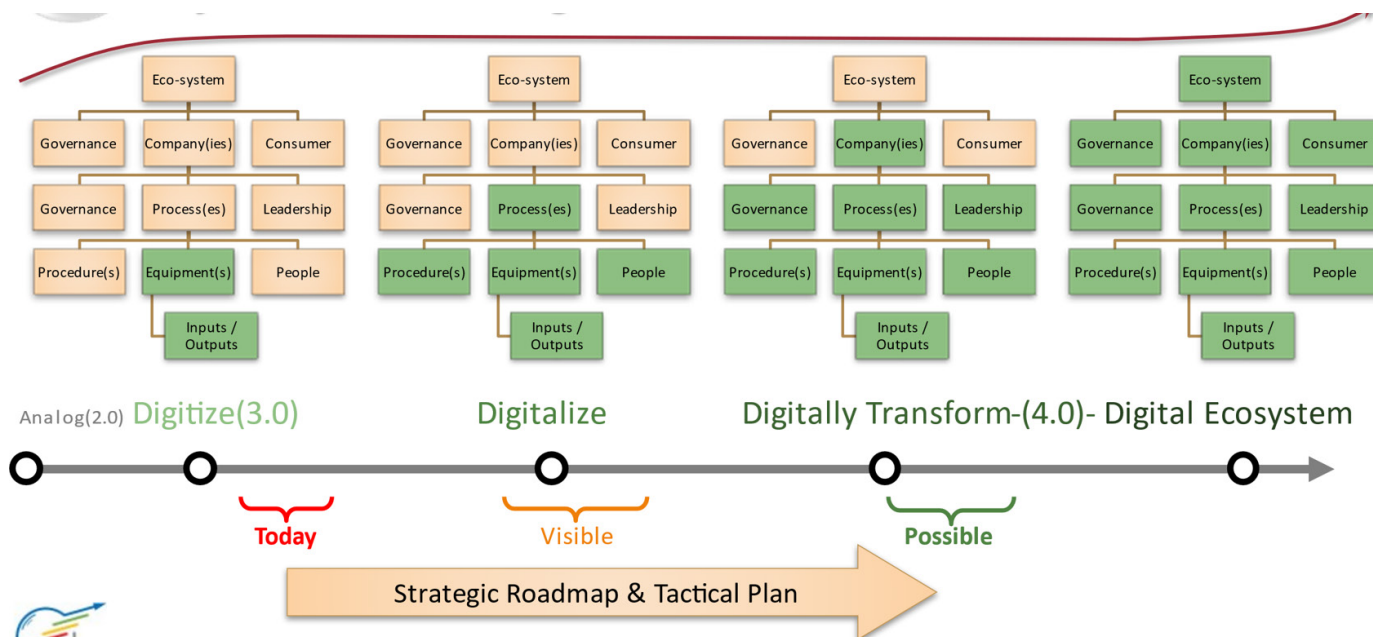


A konferencia elnöke és "társelnöke" két résztvevővel (a konferencián készült kép)

illetve olyan további eszközök használatára, mint a digitális iker vagy a párhuzamosítás (thread).

A nemzetközi konferencia elnöke a német Johannes Vrana, az NDE 4.0 európai zászlóvivője volt, de jelentősen kivette részét a rendezvény arculatának a kialakításában Ripi Singh, a téma amerikai-indiai vezér alakja az amerikai kontinensen, lásd a fotót (balról a második Vrana, a harmadik Ripi). Több szekciót és nem csak a plenárist, kettőjük provokatív hangulatot szimuláló „verbális párbaja” vezetett be, amely segített a hallgatóságnak az adott szekció súlyponti kérdéseinek a megértésében és természetesen segített a kérdések megfogalmazásában is. Ugyan az NDE maga egy szigorúan műszaki terület, de amikor az NDE 4.0 kiterjesztést értelmezzük, abban a műszaki jelleget már felülírja a digitális adatok kezelésének az elsődlegessége. Ennek jó példája a Ripi Singh egyik átfogó előadásában bemutatott folyamatábra, ami lényegében az NDE 4.0 stratégiai útterve. Látható a képen, hogy hol tartunk ma (NDE 3.0), látható továbbá, hogy mi a látótávolságunkban felsejlő és reálisan elérhető jövő, valamint látható a teljes öko-szisztémának a digitális átalakulást követő arca, azaz az NDE 4.0.

¹ A Felelős Szerkesztő megjegyzése: Az Ipari Forradalom (Ipar 1.0) kezdetétől az emberiség periodikusan találkozott olyan forradalmi hajtóerőkkel, amelyek átalakították a gondolkodásmódot és ezen belül mind a társadalmi, mind a gazdasági körülményeket, viszonyokat. Napjaink szemléletét egyértelműen a „digitális technika” irányítja függetlenül attól, hogy szolgáltatásról, gyártásról vagy vizsgálati módszerekről beszélünk. A „digitális technikákkal nyert adatainkat” pedig, bárhol tárolhatjuk és bármikor hozzáférhetünk. Így napjainkban alapvető kérdés az, hogy ezen előnyöket miképpen tudjuk a leggyorsabban ki- és felhasználni. A társadalmak fejlődését szolgáló új érték előállítását szolgáló anyagi alap megteremtéséhez az Ipar 4.0 programban kétségtelenül legfontosabb lehetőségek, irányok lettek megfogalmazva. Ehhez kötődve, a saját szakmai területek is léptek, megfogalmazva a legjelentősebb fejlődési irányukat. „Kétszer ad, aki gyorsan ad” – mondja egyik bölcs közmondásunk. Ezt elősegítendő, már részben tananyagga formálódott a Debreceni Egyetem Műszaki Karán az NDE 4.0 a „Szerkezetintegritás és roncsolásmentes szakmérnöki szakirányú továbbképzés” keretében, immáron a második kifutó évfolyamon is. Igaz, hogy e témakör az ipari termékek gyártóit és üzemeltetőit külön-külön is, de egymás kapcsolatát is érinti, mégis elhanyagolható azon szakemberek száma, akik mélységében is képesek felmérni e gondolkodásmód jelentőségét és lehetőségeit. A MAROVISZ éppen a fentiekből kiindulva keresi azokat a lehetőségeket, amellyel az NDE 4.0-át a mindennapi gyakorlatba átültesse, azaz megvalósítsa az „NDE 4.0 in Action” programot.



Az NDE 4.0 stratégiai útterve [1]

A konferencián közel 130 fő vett részt a világ különböző országaiból. Az összesen 67 előadást a szervezők 16 szekcióba sorolták be. Ezek a szekciók a következők voltak:

1. Plenáris (keynote)
2. Az NDE 4.0 célja és értéke
3. Mesterséges intelligencia I
4. Mesterséges intelligencia II
5. Mesterséges intelligencia III
6. Mesterséges intelligencia az RT és CT területén
7. Digitális iker
8. Humán szempontok
9. Additív gyártás
10. Virtuális és kiterjesztett valóság
11. Vezetés és irányítás
12. Megbízhatóság
13. Adatformátum és -tárolás
14. Robotika, drónok
15. Ipari alkalmazások
16. Megelőző és állapotfüggő karbantartás

Minden szekció végén a szekció levezető elnöke panelbeszélgetésre kérte az előadókat. Az előadásokat többnyire élénk vita követte, ami jellemző volt a panelbeszélgetésekre is. A konferencia kezdetén átadták az NDE 4.0 díjat két – egyéb elfoglaltságuk miatt – interneten bejelentkező tudós, Norbert Meyendorf professzornak és Bernd Valeske professzornak, mindketten a német Fraunhofer intézetlanc alkalmazottai. A sikeres konferencia végén kihírdették, hogy a soron következő, immár a 3. NDE 4.0 nemzetközi konferenciát, 2025 februárjában rendezik meg Indiában.

A konferencia honlapján a Programme and Papers menü pont alatt több előadás letölthető:

[NDE 4.0 > Start \(nde40.com\)](https://nde40.com)

Trampus Péter

Irodalomjegyzék

- [1] R. Singh: Digital Transformation Roadmap - A Case Study, Int. Conf. NDE 4.0, Berlin, Germany, October 24-27, 2022

Sikeres rendezvény Siófokon

Successful event in Siófok

2022. november 17-19. között került megrendezésre a GTE és a MAHEG szervezésében, a MAE közreműködésével a 42. Balatoni Ankét, a nyomástartó rendszerekkel foglalkozó szakemberek éves találkozója.

Az ankét témáját röviden a címében fogalmazták meg: **Kihívások és válaszok a nyomástartó rendszerek gyártása, javítása, karbantartása, vizsgálata területén.**

A fő kihívást idén a hidrogén növekvő népszerűsége jelentette az energiaellátás területén. A hidrogén előállítása, tárolása, szállítása mind megannyi új kihívást hozott a nyomástartó rendszerek anyagainak megválasztása, tervezése, kivitelezése, vizsgálata szempontjából, amikre időben megfelelő válaszokat kell találnunk. Az előadások jelentős része ezzel a témával foglalkozott olyan kiváló szakemberek tolmácsolásában, mint Dr. Major Zoltán prof. (Johannes Kepler Egyetem, Linz), Dr. Lukács János prof. (Miskolci Egyetem Szerkezetintegritási Intézet), Lepsényi István miniszteri biztos (Innovációs és Technológiai Minisztérium), Dr. Trampus Péter prof. (Dunaújvárosi Egyetem), Dr. Szilágyi Zsombor címzetes egyetemi docens (Magyar Mérnöki Kamara), Lovas László és Mérő Tamás folyamat mérnökök (Magyar Földgáztároló Zrt.) és Halász Gábor alkalmazástechnikai szakértő (Messer Hungarogáz Kft.).

A nyomástartó rendszerek azonban a használatuk során folyamatosan újabb és újabb kihívásoknak vannak kitéve az ipari létesítményekben. Ezzel foglalkozott az ankét egy másik szekciója.

A MOL Petrolkémia Zrt. területén előfordult tanulságos meghibásodásról Joó Gyula (műszaki felügyelet vezető), a MOL Dunai Finomító HFA üzem élettartam növelő projektjéről Zemanovics Attila (állapotfelügyelet MOL vezető), a késleltetett repedéses törés eseteivel Dr. Bacskay Antal (szakértő), a biztonsági szelepek kiválasztásának kérdéseivel Kürti Mihály (Brunnbauer-Budapest Kft.), a lángzárak viselkedéséről Tóth Ádám (Protego képviselő), a korszerű szilárdsági méretezés kérdéseivel Dr. Nagy András, Lesták Norbert, Horváth Dániel (BME oktatók) foglalkoztak.

A kihívásokra adandó válaszok közül most a kollaboratív robotok alkalmazási lehetőségeit is tárgyalta a rendezvény. Dr. Galambos Péter intézetigazgató (Óbudai Egyetem) és Papp László értékesítési menedzser (Doosan Robotics) tartottak erről előadást. A robot technikának egyik kiegészítője a drón technika, aminek új lehetőségeiről számolt be Horváth Márk értékesítési menedzser (IEM Kft.).

A szakmával kapcsolatos kérdések közül nem maradt ki soha a szabványosítás. Ennek keretében Szabó József főosztályvezető (Magyar Szabványügyi Testület) és Dr. Somogyi Sándor (ASME) szakértő tartottak előadást.

A következő ankét témáinak előkészítéseként az oktatás kérdéseiről Dr. Siménfalvi Zoltán dékán (Miskolci Egyetem) és a nukleáris energia ipar legújabb eredményeiről Dr. Aszódi Attila professzor adtak ízelítőt.

Az idei rendezvényre 191 szakember regisztrált, akik elégedettek voltak a kapott új információkkal és sikerült új szakmai kapcsolatokat is kialakítani az előadásokat követő eseményeken.

Az előadásokat szakmai bemutatók egészítették ki az Eurosmart Kft., az Uniford-R.M. Kft., az IEM Kft. és a NARVAL Kft. szakmai közreműködésével.

Minden évben mesterkurzus is segít egy-egy témakör jobb megismerésében. Idén a hőcserélőkkel kapcsolatos tapasztalatokat osztották meg a résztvevőkkel a téma legjobb szakemberei.

Az ankét minden évben foglalkozik ipartörténettel is, hogy emléket állítson a múlt szakembereinek és műszaki alkotásainak. Ennek a szekciónak a szerkesztője Fehérvári Attila az egykori Vasipari Kutatóintézet osztályvezetője.

Az ankét keretében adták át ötödik alkalommal a „Nyomástartó Rendszerek Biztonságáért” Díjat, amit idén Németh János nyugalmazott MOL karbantartás vezető részére ítéltek oda a Dr. Tóth László prof. vezette kuratórium.

Amennyiben sikerült felkeltenünk olvasóink érdeklődését, akkor 2023-ban találkozunk a 43. Balatoni Ankéton november 16-18. között a Hotel Magisternben!

Illyi János



„Nyomástartó Rendszerek Biztonságáért” Díjat Németh János vehette át

Beszámoló az ECF23 Konferenciáról – II. rész

Report from the ECF23 Conference - Part II

1. Bevezetés

Az ECF23-at – azaz a „23rd European Conference on Fracture” konferenciát – 2022. június 27. és július 1. között rendezték meg Funchalban, Madeira fővárosában. Amint azt írásunk első részében [1] már említettük, az eseményen több mint 500 előadás hangzott el, ezért az elhangzottak áttekintő ismertetését – terjedelmi okokból – két részre osztottuk. Az első részben röviden bemutattuk a konferencia helyszínét, vázlatosan áttekintettük az ECF konferenciák történetét, és ismertettük a plenáris előadásokat. Jelen a rész a szekciókban végzett munkát ismerteti.

2. A szekciók munkájának áttekintése

Amint az előzőkben már többször említettük, az előzetesen beküldött tartalmi összefoglalók alapján a konferencia programjában mintegy 500 elfogadott előadás szerepelt. Ezeket a szervezőbizottság a következő 20 tematikus szekcióba osztotta be:

1. Fáradás;
2. Additív gyártástechnológiával készített alkatrészek szerkezetintegritási kérdései;
3. Hidrogén okozta elridegedés;
4. Statikus és kvázistatikus terhelések hatása;
5. Numerikus módszerek;
6. Mikromechanizmusok;
7. Hegesztett kötések szerkezeti integritása;
8. Kompozit anyagok;
9. Dinamikus törés és a fázisátalakulások dinamikája;
10. A biológiai anyagok és a medicinában használatos anyagok szerkezetintegritási kérdései;
11. Véges törésmechanika;
12. Környezeti hatások okozta repedések;
13. Betonszerkezetek szerkezetintegritási problémái: innovatív anyagok és megoldási stratégiák;
14. Nagyméretű műszaki szerkezetek kockázatelemzése és biztonsági számításai;
15. Alacsony és magas hőmérsékleten üzemelő komponensek problémái;
16. Roncsolásmentes vizsgálati módszerek;
17. Variációs módszerek a törésmechanikában;
18. Fejlett kerámiák és azok törési tulajdonságai;
19. Polimerbázisú szerkezeti anyagok törésének vizsgálatai – újszerű módszerekkel;
20. A törés és a károsodás jelenségeinek tárgyalása a mérnöki munkában.

A felsorolásban az egyes szekciókat az azokban elhangzott előadások száma szerint csökkenő sorrendben ismertettük. A sorrend felállításával azt próbáltuk érzékeltetni, hogy a konferencián megjelenők és a mögöttük álló szakmai műhelyek nagyjából milyen témákkal milyen arányban foglalkoztak vagy éppen foglalkoznak. Alább, a szekciók fenti sorrendjében haladva összefoglaljuk az azokban elhangzott főbb témákat. Bizonyos szekciók munkájának

ismertetése során az összefoglalókat olyan megjegyzésekkel, reflexiókkal egészítettük ki, amelyek – reményeink szerint – megkönnyítik azok gyorsabb megértését.

Fáradás

A mérnökök és a tudósok a fáradás jelenségével, a mérnöki szerkezetek véges élettartamának és törésének problémájával a 19. század közepső harmadában kezdtek el szisztematikusan foglalkozni. Elsőként az 1840-es évek elején Rankine – a vízgőz alapú termodinamikai Carnot-Rankine-ciklus atyja – foglalkozott vasúti tengelyek fáradási szilárdságának problémájával [2]. Az 1850-es évek elején a francia Morin alkalmazta az élettartamra történő tervezés koncepciójának korai változatát az akkori – lovak vontatta – postakocsik tengelyeinek biztonságos élettartamára végzett vizsgálataiban [3]. A fáradás kifejezést először az angol Braithwaite használta 1854-es publikációjában [4]. Wöhler 1850 és 1870 közötti elméleti és kísérleti munkája [5] teremtette meg a szisztematikus fáradást vizsgáló alapjait. A fáradásos öregedés számításokkal történő követésére alkalmas első modellt Palmgren alkotta meg; eredményeit 1924-ben publikálta [6]. A Palmgren-féle elmélet két évtizedig elkerülte a mérnök-társadalom és a tudományos közösség figyelmét, és csak Miner 1945-ben, Palmgren gondolatait népszerűsítő cikkének megjelenését [7] követően terjedt el szélesebb körben. Ezt a modellt nevezik Palmgren-Miner szabálynak, vagy a lineáris halmozódó károsodások elméletének; mint ilyen, a fáradásos öregedés leírására azóta kidolgozott különböző modellek archetípusának tekinthető, beleértve a fáradásos repedésterjedési számítások alapját képező Paris-Erdogan modellt [8] is. Bár manapság soha nem látott teljesítményű informatikai erőforrások állnak rendelkezésre, a fáradásos öregedés és törés alapjait ma sem értjük megfelelően, ugyanakkor a legkülönbözőbb technológiai fejlesztések és mérnöki alkalmazások – pl. a hibátűrő tervezési koncepció elvei mentén konstruált szerkezetek tervezési élettartam-elemzése és szerkezetintegritási számításai – egyre jobban igénylik a pontosabb és megbízhatóbb modelleket, mert a biztonság szempontjából kritikus helyen üzemelő berendezések és komponensek esetleges, idő előtti, meghibásodásai könnyen katasztrofális következményekhez vezethetnek. Ezért a fáradással foglalkozó kutatások és fejlesztések világszerte egyre több erőforrást használnak fel, és egyre komplexebbé válnak. A témakör jelentőségét mutatja, hogy egyfelől a meghívott plenáris előadások közül, ld. [1], 4 foglalkozott ennek különböző aspektusaival, másfelől a fáradással foglalkozó prezentációk száma összesen 97 volt – ami az összes előadás mintegy ötödét jelentette –, valamint az, hogy az ide benyújtott előadásokat három altémára bontották, úgymint: (1) A mérnöki szerkezetek és anyagaik fáradása (49 prezentáció); (2) Ciklikus terhelések (34 előadás); (3) Rendkívül nagy ciklusú fáradás (14 prezentáció).

Additív gyártástechnológiával készített alkatrészek szerkezetintegritási kérdései

Amint a plenáris előadásokat áttekintő részben [1] említettük, az additív gyártási módszerek súlya a gyártási technológiák között az utóbbi egy-két évtizedben számottevően megnövekedett, és a közeli jövőben további térnyerésük várható. Ezek a gyártási eljárások számos előnnyel bírnak a hagyományos technológiákkal szemben, pl. kisebb mértékű vagy zéró anyagvesztés, kevesebb gyártási lépésből álló gyártástechnológia, következőképp magasabb termelékenység, azaz az olcsóbb gyártás lehetősége, valamint a geometriai formák kialakításának nagyobb szabadsága. A téma súlyát jól mutatja, hogy a két plenáris előadás mellett 41 prezentáció ismertette a kutatások és fejlesztések mai állását. Az előadások témáit áttekintve megállapítható, hogy az additív gyártástechnológiák bevezetése során hangsúlyozottan növekszik a technológia fejlesztése során alkalmazott szimulációk megbízhatóságának jelentősége, mert a gyártás során a szerkezeti anyagok a klasszikus gyártási eljárásokat jellemző terheléstörténettől jelentősen eltérő terhelési történettel rendelkeznek; ez a különbség pedig hosszú időtávon tapasztalható viselkedésüket, öregedésüket is befolyásolja.

Hidrogén okozta elrögzedés

A fosszilis üzemanyagok visszaszorítása érdekében végzett fejlesztések egyik iránya a hidrogén – mint alternatív energiahordozó – felhasználása a különböző belsőégésű motorteknológiákban. Ma a hidrogén-technológia alkalmazásának egyik komoly akadálya, hogy a hidrogén a vele érintkező szerkezeti anyagokat sokkal gyorsabban öregíti, mint a hidrogénnél lényegesen nagyobb atomokból vagy molekulákból, illetve azok keverékéből álló más közegek. Az alkalmazások felől jelentkező, egyre sürgetőbb igények mielőbbi kielégítése érdekében a hidrogén okozta öregedés mechanizmusának kutatásai az utóbbi években egyre intenzívebbé váltak. A területen végzett kutatások egyik fő irányáról Z. Zhang számolt be az első részben [1] ismertetett plenáris előadásában [9], melyet a szekcióban további 34 prezentáció követett. Ezek többek között a hidrogén kiváltotta öregedés mechanizmusaival, a hidrogénnek a szerkezeti anyag alakváltozási mechanizmusára gyakorolt hatásával, a hidrogén hatására gyorsuló repedezés jelenségével foglalkoztak. A hidrogén okozta elrögzedés leírására a plenáris előadásban [9] ismertetett Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) modellen [10-13] kívül a prezentációkban többek között bemutatott egy, a fázismezők elméletén alapuló, egy többskálás elméletre alapozott, valamint egy „local approach” modellt is.

Statikus és kvázistatikus terhelések hatása

A statikus és kvázistatikus üzemi körülmények, terhelési módok és a különféle szerkezeti anyagok statikus és kvázistatikus körülmények közötti viselkedésének tanulmányozása a mérnöki tudományok kezdetei óta szerves részét képezi a tervezési módszereknek és a biztonsági elemzéseknek. A statikus és kvázistatikus terhelési viszonyok között végzett anyagvizsgálatok a kísérleti

úton szerzett mérnöki és tudományos ismeretek komoly hányadát képviselik. A tématerülethez tartozó kutatások újabb eredményeit 34 előadás ismertette, melyek között elméleti és numerikus modellezéssel foglalkozó munkákat ugyanúgy találhattunk, mint különféle szerkezeti anyagokon végzett kísérletek bemutatását is.

Numerikus módszerek

A „Numerikus módszerek” szekció előadói a ma élenjárónak tekinthető – numerikus eljárásokkal megoldható – modellek fejlesztésében elért új eredményeket, továbbá numerikus modellekre épített alkalmazásokat ismertettek. Az előadások többek között a szerkezeti anyagok kontinuum károsodási modelljeivel, a repedések keletkezésének és terjedésének szimulációjára fejlesztett modellekkel – mint pl. a kohéziós zóna vagy a különböző fázismező elméletekre épülő modellek –, továbbá az anyagvizsgálatok során a próbatestekben kialakuló alakváltozási-, feszültség- és károsodási állapot meghatározására végzett szimulációkkal, valamint a tényleges szerkezetekben az üzemeltetés közben kialakuló állapot meghatározására alkalmas numerikus eszközök fejlesztéseinek kérdéseivel foglalkoztak. A szekcióban 28 előadás kapott helyet. Ezek közül említésre méltónak tartjuk az első részben [1] már említett Konfigurációs Erők elméletén [14] alapuló fejlesztést bemutató prezentációt, amely az elmélet fáradásos repedésterjedésre történő alkalmazását mutatta be. Ebben a szekcióban kapott helyet az „Extending Reliability of FEM simulations, based on Optically Assisted Tensile Tests – a Digital Twin” című előadás [15] is, melynek szerzői Fekete Tamás, Antók Dániel, Tatár Levente és Bereczki Péter voltak. A prezentáció az EK és a Dunaújvárosi Egyetem közötti együttműködés keretében a Dunaújvárosi Egyetemen készített, optikai adatgyűjtőrendszerrel felszerelt szakítóméréseket és az azok kiértékelésére kidolgozott, a digitális pár koncepción alapuló mérés-kiértékelő rendszer fejlesztésének eredményeit mutatta be, amelynek fejlesztését az NKFIH-1267-2/2020 számú, Roncsolásmentes folyamatkövetés tématerület című projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Tématerületi Kiválósági Program 2020 (2020- 4.1.1-TKP2020) pályázati program finanszírozta.

Mikromechanizmusok

Ebbe a szekcióba mindazokat az előadásokat sorolták, amelyek a különböző anyagok – a fémek szerkezeti anyagoktól kezdve, a műanyagokon át a biológiai környezetben létező és a gyógyászatban felhasználható anyagokig – mikro- és nanoszerkezetével és ezeken a hossz-skálákon mutatott viselkedésével, valamint a rövid hossz-skálákon megfigyelhető tulajdonságok és a makroszkopikus leírás viszonyával foglalkoztak. Általánosan fogalmazva, az érdeklődők a szekcióban a többskálás modellek fejlesztési területén zajló elméleti és kísérleti kutatások mai állásáról kaphattak ízelítőt. Az előadások témái között megtalálhatók voltak – többek között – az atomi szintű modellek fejlesztése terén elért elméleti és

kísérleti eredmények, a nanoszerkezetű anyagok kutatásai során elért kísérleti, valamint szimulációs modellek segítségével meghatározott eredmények, a fáradás és a törés mikroszkopikus információkat is magukba integráló kontinuummodelljei, ideértve a ridegtörés „local approach” módszereit is. A szekcióban 27 prezentáció hangzott el. A fent ismertetett témakon túlmenően, előadások foglalkoztak a képlékeny nyúlás és a nyúlásgradiens törésmechanikai modellekbe történő beépíthetőségével, a kémiai inhomogenitások, a hőkezelés reaktoracélok törési mechanizmusaira, illetve a makroszkopikus törési tulajdonságaira gyakorolt hatásával. A szekcióban hangzott el Chahboub Yassine és Szávai Szabolcs „Damage prediction of ferritic pipeline using Artificial Neural Network” című előadása [16].

Hegesztett kötések szerkezeti integritása

A hegesztett kötések kialakítása a komplex mérnöki szerkezetek építésének hosszú évtizedek óta használt technológiai eszköze; ez azonban még nem jelenti azt, hogy a hegesztett kötések viselkedését a szakma teljes mértékben értené és uralni tudná. A hegesztett kötések szerkezeti integritása ezért még mindig aktuális kutatás-fejlesztési téma. A hegesztéstechnológiai eljárások közelmúltban elért fejlesztési eredményei lehetővé tették ugyan a hegesztett kötések fáradással és töréssel szembeni ellenállóképességének javítását, ám a téma még mindig sok nyitott kérdést tartalmaz. A hegesztett kötések kialakítására alkalmazott gyártási eljárások olyan komplex lokális termomechanikai terhelést, illetve terhelési szekvenciákat indukálnak az anyagban – kezdetben gyors felolvasztást és gyors megszilárdulást követő erőteljes hűtést, majd a továbbiakban, szilárd állapotban elszenvedett több-kevesebb további termomechanikai igénybevételt –. Ezek fárasztó hatására az elkészült kötés a továbbiakban emlékezni fog, ami a komponens további célokra történő felhasználhatósági idejét erősen befolyásolja. A technológia erősen inhomogén mikroszerkezetű eredményez, amelyet az anizotrópia, a nagy gradiensekkel jellemezhető alakváltozási és maradófeszültség mezők, továbbá a mechanikai tulajdonságok inhomogén eloszlásai jellemeznek – az inhomogenitásba beleértve az olyan sajátosságokat is, mint a kötésben a készítés során megjelenő nemkívánatos szennyezők helyben maradása, illetve a porozitás –. A szimpózium a hegesztett kötések szerkezetintegritási kérdéseinek kutatásai során elért legújabb eredményeket mutatta be. Az elhangzott 21 prezentáció között legnagyobb számban olyanok szerepeltek, amelyek metallurgiai, korróziós és öregedési kérdéseket is tárgyaltak.

Kompozit anyagok

A műanyag alapú kompozitokat egyre szélesebb körben használják fel olyan iparágakban, ahol a kellő szilárdság megtartása mellett a tömeg csökkentése kulcsfontosságú. Ilyen felhasználási területek például a repülőgép-ipar, az autóipar és a sportszeripar. Az iparban használt kompozitok jellegzetes típusai a kitüntetett irányokban futó szállakkal vagy szövetekkel megerősített polimermátrixok. A

kompozit-alapú, biztonság szempontjából kritikus szerkezetek, illetve komponensek károsodásának és végső tönkremenetelének kellő pontosságú előrejelzése kulcsfontosságú a belőlük alkotott rendszerek műszakilag megengedhető üzemidejének meghatározása szempontjából, ezért a fejlesztések célja a kellő prediktív erővel bíró, megbízható szimulációs eszközök fejlesztése, validálása és az ipari alkalmazhatóságukat bizonyító verifikációja. A szekcióban elhangzott 20 előadás a különféle laborokban zajló, ezirányú kutatás-fejlesztési munkákba engedett bepillantást.

Dinamikus törés és a fázisátalakulások dinamikája

A szekcióban a nagy sebességű, dinamikus hatásokra bekövetkező károsodási és törési folyamatok „voltak terítéken”. A nagy sebességű, lökészerű terhelések a szerkezeti anyagokat extrém módon megterhelik; ilyen terhelési viszonyok hatására azok a statikus és kvázistatikus terhelési viszonyoknál megszokottól egészen eltérő, akár rendkívüli viselkedéssel reagálnak. A tématerülettel összesen 20 előadás foglalkozott, amelyek többek között kísérleti vizsgálatokból, valamint a nagysebességű terhelés hatására a szerkezeti anyagokban beinduló folyamatok numerikus szimulációiból származó eredményeket mutattak be. A prezentációk érintették a dinamikus modellek szükségszerűen több hossz- és időskálát felölelő jellegét, valamint a gyors irreverzibilis folyamatok leírásának problémáit, ideértve a gyors és extrém terhelések hatására bekövetkező fázisátalakulások dinamikáját is. Érdekes kutatási irány a nagysebességű alakváltozási, károsodási és törési folyamatok atomisztikus szimulációk segítségével történő vizsgálata.

A biológiai anyagok és a medicinában használatos anyagok szerkezetintegritási kérdései

A szekció a biológiai szövetek és az orvoslásban használatos biológiai, vagy a biológiai szervezetek által biztosított környezettel hosszú távon összeférhető, biokompatibilis anyagok szerkezetintegritási kérdéseit tekintette át. A témakör különböző aspektusaival 18 prezentáció foglalkozott, amelyek kiegészítették V. Silberschmidt idevágó – az első részben [1] ismertetett – plenáris előadását [17]. Az előadások érintették az orvoslásban használatos anyagok és a biológiai szövetek jellemzésének és vizsgálati protokolljainak kérdéskörét a különböző – in vitro vs. in vivo – körülmények között, továbbá ezen anyagok elméleti leírásának problémáit – a biomechanika néhány aktuális kérdését –, ideértve a biológiai anyagok viselkedését leíró konstitutív egyenletek és a korszerű numerikus szimulációs rendszerek fejlesztésének és alkalmazásainak kérdéseit. Megjegyezzük, hogy a biológiai szövetek és az orvoslásban használatos anyagok markánsan öregszenek, következésképpen az életkor előrehaladtával – az élettel együtt járó terhelésektől erősen befolyásoltan – a mechanikai teljesítőképességük, a terhelésekkel szembeni ellenállóképességük csökken. Mindez megköveteli, hogy a medicinában a különböző (ortopédiai, fogászati, szív- és érrendszeri stb.) implantátumokat és orvostechnikai eszközöket a szerkezetintegritás koncepciójának figyelembevételével tervezzék meg, építsék be és ellenőrizzék.

A szekcióban ismertették az orvosi implantátumokban használt anyagok fáradásával, kúszásával és biológiai lebomlásával kapcsolatos eredményeket; az érdeklődők előadásokat hallgathattak meg az orvosbiológiai anyagok mechanikai teljesítményének élő környezetben, hosszú időtávon történő alakulásáról, valamint a biológiai és a gyógyászatban alkalmazott anyagok és a belőlük épített szerkezeteknek az egyéni igényekre szabott, numerikus szimulációval segített adaptációjának kérdéseiről.

Véges törésmechanika

Bár a szekciót „Véges törésmechanika” címen hirdették meg, az elhangzott 15 előadás egy része nemcsak a szigorúan vett véges törésmechanikával, hanem egyéb olyan módszerekkel is foglalkozott, amelyekben a klasszikus törésmechanikában fellépő szingularitást megszüntették vagy valamilyen eljárással elkerülték – amivel a leírást teljesen végezzé tették –. A matematikában a leképezések szingularitásainak megszüntetését desingularizációnak – ld. pl. [18-21] –, a szingularitás megszüntetésének stratégiáját pedig desingularizációs eljárásnak nevezik; a desingularizáció szinonimájaként használják a regularizációt, vagy a szingularitás felbontását – ld. [22-23] – kifejezést is. A törésmechanikában a szingularitás megjelenése ahhoz az aszimptotikus viselkedéshez kapcsolódik – amit Griffith az Inglis-féle modellben hajtott végre –, amikor egy véges r sugarú bemetszésből a sugár $r \rightarrow 0$ hoz való közelítésével leszámaztatják az idealizált repedéscsúcs-modellt. A szingularitás a modellből eltűnik, ha a leírásba egy olyan $h > 0$ hosszparamétert – a karakterisztikus hossz – vezetnek be, amelynél kisebb távolságon belül a fizikai mező értékét vagy állandónak tekintik, vagy ott az $r > h$ távolságon alkalmazott közelítéstől eltérő, finomított leírást használnak. A karakterisztikus hossz megállapítása modellezési stratégia kérdése. A legegyszerűbb eljárás a klasszikus törésmechanikába egyszerű heurisztikus paraméterként bevezetni azt; ezt teszik a véges törésmechanikában. Ennél bonyolultabb a helyzet, ha a törésmechanikai modell alapjául szolgáló elméleti keretrendszer tágítja, és a leírást valamilyen nemlokális elméletre alapozzák, legalább valamilyen gyengén nemlokális modellre; a karakterisztikus hossz egy ilyen elméletben is megjelenik, ám itt az elmélet belső logikája kényszeríti ki a karakterisztikus hossz bevezetését. A karakterisztikus hossz értékét mindkét megközelítés esetében a kísérletekkel történő összevetés alapján kell megállapítani. Ez az indoka annak, hogy a szekcióban figyelmet szenteltek a véges törésmechanika és a fázismező elméletek valamelyikén alapuló modellek összevetésének is. A szekciót D. Leguillon szervezte, aki a véges törésmechanika általa kidolgozott változatát – az előző részben ismertetett – plenáris előadásában ismertette. A szekcióban elhangzottak közül kiemelnénk a véges törésmechanika dinamikus repedésterjedésre kiterjesztett változatát ismertető prezentációt.

Környezeti hatások okozta repedések

A szekció minden olyan témát befogadott, amely a szerkezeti anyagok és a környezet közötti kölcsönhatások következményeként a szerkezeti anyagban fellépő

öregedési/károsodási jelenségeket érintett, így az előadások a következő kérdésekkel foglalkoztak: környezeti hatások okozta korrózió és repedezés, korrózióval gyorsított fáradás, súrlódás indukálta korrózió, valamint a különböző törési mechanizmusok. A 14 előadás egy része kísérleti munkákat ismertetett, másik része szimulációs modellek fejlesztésével és azok alkalmazásaival foglalkozott.

Betonszerkezetek szerkezetintegritási problémái: innovatív anyagok és megoldási stratégiák

A szekcióban a nagyméretű, elsősorban vasbetonból vagy feszített vasbetonból készített építészeti alkotások szerkezetintegritási problémáinak megoldása érdekében végzett kutatásokról és fejlesztésekről számoltak be az előadók. A tématerület fontosságára mutattak rá a G.A.Ferro plenáris előadásában [24] már ismertetett tények is – ld. az előző részt [1] –. A 13 prezentáció többek között olyan kérdésekkel foglalkozott, mint a betonalapú anyagok fáradása és törése; ezen anyagok mikro- és nanoszerkezete, a mikro- és nanoszerkezet kísérleti felteképezése, valamint elméleti- és szimulációs eszközökkel történő vizsgálata; betonalapú anyagok 3D nyomtatási technológiáinak fejlesztési irányai; betonszerkezetek állapotának monitorozása mély gépi tanulással, betonszerkezetek rehabilitációja.

Nagyméretű műszaki szerkezetek kockázatelemzése és biztonsági számításai

A szekció – a címen túlmenően – a klasszikus értelemben vett nagyméretű műszaki alkotások, úgymint hídszerkezetek, épületek, gátak, vasutak, földalatti építmények, szélerőmű és egyéb tornyok, tengerre épített olaj- és gázkitermelő infrastruktúrák, nagykapacitású távolsági csővezetékek, hajók, atomerőművek és repülőgépek élet-tartam- és biztonsági elemzéseinek témakörét némileg tágítva teret adott az autópárházban felmerülő problémák, fejlesztések ismertetésének is. Az elhangzott 13 előadás túlnyomó többsége nagyméretű szerkezetek fáradásos igénybevétel – mint öregedési mechanizmus – figyelembevételével végzett maradék-élettartam elemzések eredményeit ismertette, de elhangzott néhány, a szerkezeti anyagok törésmechanikai viselkedésének jellemzésére végzett újabb kísérletet bemutató előadás is. A szekcióban ismertetett prezentációkat összefoglalóan értékelve egyfelől megállapítható, hogy azok a mai kor mérnöki ismeretei alapján végrehajtott, igen magas színvonalú, kísérleti munkákkal és numerikus szimulációkkal támogatott fejlesztések eredményiről számoltak be. Másfelől a nagyméretű szerkezetek biztonsági elemzéseinek témakörére is igaz az a – plenáris előadásban C. Ruggieri szájából elhangzott, tényszerű – megállapítás, melyet magunk is osztunk, hogy „eddig még nincsen olyan elméleti leírás és arra épülő modellrendszer a kezünkben, amelynek segítségével képesek lennénk a mai számításoknál pontosabban megjósolni egy mérnöki szerkezet műszakilag megengedhető üzemidejét” [25].

Alacsony és magas hőmérsékleten üzemelő komponensek problémái

A szekcióba azokat az előadásokat sorolták, amelyek

témái még ideiglenesen sem választhatók el a termikus kölcsönhatásoktól. A 12 prezentáció közül egy foglalkozott korrózióálló ausztenites acélok nagyon alacsony ($T < -150^\circ\text{C}$) hőmérsékleten mutatott képlékeny- és törési viselkedésének kérdésével. Egy előadás a műanyag alapú kompozitokban használt bizonyos ragasztók -40 és 60°C hőmérsékleti tartományban végzett termomechanikai fárasztóvizsgálatainak eredményeit ismertette. A többi előadás magas hőmérsékleten ($T > 650^\circ\text{C}$) üzemelő szerkezeti anyagok öregedési folyamatainak kérdéseivel foglalkozott, amelyek a termomechanikai fáradásos kísérleteken és azok szimulációval támogatott kiértékelésén túlmenően olyan elméleti problémákat érintettek, mint a repedés élén fellépő hajtóerő meghatározása kúszó közegben, üreghalmozódás időfejlődésének leírása a mátrix kúszás dominálta alakváltozása esetén, valamint repedés terjedésének leírása termomechanikai fárasztó-igénybevétellel terhelt, oldalbemetszéseket tartalmazó, illetve CTOD próbatestek esetén.

Roncsolásmentes vizsgálati módszerek

A mérnöki szerkezetek, technológiák utóbbi évtizedekben elért egyik legátütőbb fejlesztési eredményének kétségkívül a kiberfizikai rendszerek tekinthetők. A kiberfizikai rendszerek olyan – mérnöki – rendszerek, amelyek fizikai és számítás-intenzív tevékenységre alkalmas informatikai komponensek szorosan csatolt, szinergisztikus együttműködésén alapulnak [26]. Az IT mára elért fejlettségi szintje lehetővé teszi, hogy egy fizikai rendszerről valós – vagy megközelítőleg valós – időben olyan mennyiségű és minőségű információt gyűjtsenek és dolgozzanak fel, melynek segítségével technológiai folyamatok a szükségleteknek megfelelően, gyorsan irányíthatók, vagy szerkezetek öregedési folyamatai követhetők. A kiberfizikai rendszerek modelljén alapuló technológiai megoldásokkal elérhetővé vált, hogy az egy-két évtizede csak speciális körülmények között alkalmazható különböző roncsolásmentes vizsgálati módszerek egy szerkezet gyártás utáni, majd működés közbeni állapotáról az igényeknek megfelelően folyamatosan információt gyűjtsenek, lehetővé téve pl. az adott berendezés gyártás utáni állapotának, majd üzem közben a szerkezeti egészségének/állapotának folyamatos követését, majd ezekre alapozva a karbantartások, javítások valóban igény szerinti megtervezését, végrehajtását stb. A szekcióban bemutatott 12 prezentáció azt bizonyította, hogy a roncsolásmentes vizsgálati eljárásokon alapuló, megfelelő IT kapacitásokkal ellátott rendszerek a legkülönbözőbb helyzetekben felhasználhatók új gyártmányok minőségének ellenőrzésére, szerkezetek „egészségi állapotának” követésére, valamint mérnöki szerkezetek maradék élettartamának meghatározására végzett szerkezetintegritási elemzések támogatására. Az előadások közül külön említésre méltónak tartjuk azt a munkát, amely kompozit szerkezet nagy sebességű terhelése hatásának ultrahangos (utó)vizsgálati eredményeinek felhasználásával, az ugyanazon folyamat numerikus modelljén végzett szimulációkkal határozta meg annak maradék élettartamát. Ugyancsak többek érdeklődését felkeltette az az előadás, amely egy olyan üvegszál-optikára épített rendszert

fejlesztését mutatta be, amely nagyméretű betonszerkezet(ek) szerkezeti állapotának követésére alkalmas; a rendszert már mindennapi alkalmazásba vették.

Variációs módszerek a törésmechanikában

A variációs számítás az elméleti fizika páratlan hatékonyságú fegyvere szerkezetek stabilitási problémáinak, újabban pedig akár folyamatok elméleti modelljeinek és a modellek numerikus megoldásainak megalkotásában. A klasszikus variációs módszerek általánosításainak az optimalitási elvek tekinthetők [27]. A szekcióban prezentált 11 előadás közül egy foglalkozott fejlesztés alatt álló reaktoracél képlékeny károsodási és tönkremeneteli folyamatainak kisméretű lyukasztóvizsgálatok numerikus kiértékeléssel támogatott jellemzésével; a károsodási és tönkremeneteli folyamatok követésére a GTN anyagmodellt [10-13] használták. Egy további előadás a modern nemegyensúlyi termodinamika alapjaival kompatibilis variációs módszer alkalmazásával kidolgozott elméleti modellt ismertetett, melyet a fáradásos repedésterjedés modellezése során egy, a Paris-Erdogan szabályhoz [8] hasonló, de annál általánosabb anyagmodell kimunkálásában használt. A többi prezentáció a napjainkban a kutatók között egyre jobban ismertté váló, a fázismezők elméletén alapuló modelleket, illetve a modellek alkalmazásával végzett numerikus szimulációk eredményeit ismertette. A fázismezők elmélete az eredetileg a L. D. Landau által a másodrendű fázisátalakulások fenomenológiai leírására kidolgozott rendparaméterek elméletén alapul, amelyet később V. Ginzburg és L. D. Landau továbbfejlesztett, és először a szupravezetés leírására alkalmazott [28] 1950-ben. Ezt a modellt nevezik Ginzburg-Landau elméletnek. A Ginzburg-Landau elmélet lényege az, hogy a felírják a rendszer szabadenergia-funkcionálját a fizikai mezők és egyéb, az aktuális problémától függő paraméterek – és eloszlásaik – függvényében, ahol a problémafüggő paramétereket fázismezőknek nevezik (ezeket Landau eredetileg rendparamétereknek nevezte). A rendszerről azt feltételezik, hogy az az idő függvényében a szabadenergia-funkcionál extrémálisai által meghatározott pályán fog fejlődni. A modell extrémálisait leíró egyenleteket a variációs számítás módszereivel határozzák meg; ezeket az egyenleteket nevezik Ginzburg-Landau egyenleteknek. A Ginzburg-Landau modell nagyon általános elméleti keretet biztosít különféle jelenségek modelljeinek megalkotására: megfelelő fázismezők bevezetésével előszeretettel használják pl. az olvadás és a megszilárdulás folyamatainak leírására [29], mert a fázisátmenetek/fázisátalakulások során kialakuló mezo- és mikrostruktúrák jellemzésére, és azok időfejlődésének leírására is használható (ld. pl. Tóth Gyula, Pusztai, Tamás és Gránásy László 2015-ben megjelent publikációját [30]). Manapság a fázismezők elméletét egyre szélesebb körben alkalmazzák többszálú modellek koncepciójának kimunkálása során. Bár a Ginzburg-Landau teória nagyon mély alapokon nyugvó fizikai elmélet, a termodinamikával való kapcsolata még laza; ugyanakkor a rá épített fázismező modellek megfelelő típusú mezők választásával termodinamikailag konzisztenssé tehetők, ami a rájuk épülő a jövőbeli alkalmazások

szempontjából kulcsfontosságú. A fázismezőkön alapuló modellek egy-két évtizede jelentek meg a törésmechanikai kutatásokban – ld. pl. [31-33] –. A fázismező modellek és a törésmechanika alapjául szolgáló Griffith-féle modell alapjait összehasonlítva megállapítható, hogy azok egy töről fakadnak: mindkettő energetikai megfontolásokon alapul, azonban az először 1950-ben publikált [28], és azóta sokak által továbbfejlesztett Ginzburg-Landau elmélet mai állapotában mind alapjait, mind matematikai eszköztárát tekintve sokkal kifinomultabb, mint a Griffith modellben használt megfontolások és eszközök. Ezért talán a szakirodalom részletes ismertetése nélkül sem túlzás azt állítani, hogy elvileg a fázismező elméleteket felhasználva is kidolgozható a törésmechanika olyan modellje – vagy olyan törésmechanikai modellek –, amely(ek) egy anyag mikroszerkezetét, a mikroszerkezet fejlődését és a repedések kölcsönhatásait képes(ek) egységes, termodinamikailag is konzisztens elméleti keretben leírni. A szakirodalomból azonban az is jól kirajzolódik, hogy a különféle fázismezőkre épített modellek akkora elméleti apparátust mozgatnak és akkora számítási erőforrás-igénnyel bírnak, hogy rövid- és középtávon jórészt csak a kutatásokban fogják felhasználni azokat. Ám a mélyebb elméleti meg-alapozással bíró elméleti és numerikus modellek ígéretes eszköznek tűnnek az ipari alkalmazásokban használható, egyszerűsített modellek fejlesztési munkái során.

Fejlett kerámiák és azok törési tulajdonságai

A szekció az ipar, az űrtechnológia és az orvoslás-gyógyászat igényeinek megfelelni kívánó, az egyes alkalmazási területek mai átlagos igényeit túlszárnyaló, ún. fejlett kerámiák előállítására érdekében végzett fejlesztési munkákba is betekintést engedett. A hét prezentáció többsége a klasszikus kutatási módszertan szerint végzett – kísérleteken alapuló, majd azok eredményeit már többnyire szimulációval kiértékelő – fejlesztési munkák eredményeiről számolt be. Az elhangzott előadások közül külön említésre méltó Raul Bermejo előadása, amely a hibátűrő kerámiák fejlesztésében elért kutatási eredményekről számolt be [34]. A kerámiák más, megfelelően szívós anyagokkal történő kombinációja ugyanis kivételes műszaki képességekkel rendelkező hibrid rendszerek előállítását teszi lehetővé. Ma a kerámia-alapú komponensek felhasználhatóságát nagymértékben csökkentik, hogy a kerámia rideg volta miatt abban egy repedés terjedése gyakorlatilag megállíthatatlan. Ugyanakkor – az előadó által bioinspiráltnak nevezett koncepció alkalmazásával – megvalósíthatónak tűnik, hogy a jövő alkalmazásaiba a jelenleginél kevésbé törékeny, azaz hibátűrő kerámia alapú anyagokat építhessenek be. Ha egy alkotórészt több rétegből építenek föl, úgy, hogy a rideg, de szilárd rétegek közé megfelelő védőrétegeket ágyaznak, akkor ez nagymértékben növelheti a komponens „szívósságát”, és a szilárdsága sem csökken. Ha sikerül elérni, hogy a kerámia-rétegek közé ágyazott rétegekben a maradé feszültségek egy előírt tartományba essenek, akkor ezek képesek lehetnek a felületi hibákból kiinduló repedések terjedését lefékezni, meggátolni, biztosítva a konstrukció hibátűrő voltát. Közbevetőleg jegyezzük meg, hogy hasonló

alapelve alapuló konstrukció alkalmazásával érték el az autóiparban, hogy az autók színre fényezett műanyag lökhárító-elemei kisebb koccanásokat az elem javíthatatlan tönkremenetele nélkül elviseljenek. Kezdetben – az 1980-as évtizedben – ugyanis a műanyag lökhárítók olyan alapanyagokból készültek, amelyek képtelenek voltak a rideg fedőfényezésből kiinduló repedéseket megállítani, így azok a legkisebb koccanások hatására is elhasadtak.

Polimerbázisú szerkezeti anyagok törésének vizsgálata újszerű módszerekkel

A szekcióban az érdeklődők összesen hét prezentációt hallhattak és vitathattak meg. Ezek egyik része kifejezetten a repülőgépiparban alkalmazott, a tervezési munkákat – ideértve a méretezési és a tervezési élettartam bizonyítására használt tervezői biztonsági számításokat is – támogató, szabványos anyagvizsgálati módszereket felülvizsgáló kísérletek eredményeit ismertette. A kutatások célkitűzése szerint a nagyobb, részletgazdagabb információhalmaznak a jövőben felhasználhatónak kell lennie a repülőgépipar komponensek tervezési és szerkezetintegritási elemzéseiben, és segítségével el kell érni az elemzések megbízhatóságának növekedését. Az eredmények azt mutatják, hogy a ma használt szabványos – a klasszikus anyagvizsgálati módszereire alapozott, alapvetően a vizsgált mintadarab makroszkopikus jellemzőinek meghatározására szolgáló és a kísérletekről igen korlátozott mennyiségű információt gyűjtő – mérési eljárások nem szolgáltatnak olyan adatokat, melyek alapján a szerkezetek várható élettartama kellő időben az elvárt megbízhatósággal megjósolható lenne. Ugyanakkor a klasszikus vizsgálatokat megfelelő – ma hozzáférhető – roncsolásmentes vizsgálati eljárásokkal párhuzamosan követve, azokból olyan – finomabb hosszúságskálákról tudósító – információk nyerhetők ki, amelyek követhetővé teszik a mérések során a mezo- és mikroskálán lezajló folyamatokat is. Az ezen információkat megfelelően felhasználni képes elméleti modellekre alapozott szerkezetintegritási elemzések megbízhatósága minden várakozás szerint növekedni fog. Az előadások másik, jelentős része a fázismezők elméletén alapuló modellek polimerek, illetve általában a szerkezeti anyagok károsodásának és törésének vizsgálatába történő bevonását megcélzó kutatás-fejlesztési munkákról számolt be. A fázismezőkön alapuló elméleti apparátus és a törésmechanika kapcsolatát néhány mondatban vázoltuk a „Variációs módszerek a törésmechanikában” szekcióban elhangzottak ismertetése során. A szekcióban bemutatott prezentációk egyike üvegszál-erősítésű kompozitok károsodási és törési viselkedésének követésére alkalmas, többskálás modell fejlesztésének eredményiről számolt be [35]. A modell újdonsága, hogy a makroszkopikus törésmechanikai modellt a fázismezők bevezetésével termodinamikailag konzisztenssé és az anyagi anizotrópia figyelembevételére alkalmassá tették. Egy másik, figyelemreméltó előadás olyan kutatások eredményeit mutatta be, amelyben polimetil-akrilát törési vizsgálatait egy termodinamikailag konzisztens, a ridegtörés leírására adaptált fázismező modellel követték. A prezentációban ismertetett modellek újszerűségéhez nem férhet kétség;

azok ma akadémiai kutatások tárgyát képezik. A fázismező modellek kétségkívül nagymértékben hozzájárulhatnak a törésmechanika mélyebb megértéséhez, azonban szélesebb körben történő elterjesztésükhöz további intenzív kutatási és fejlesztési munkákra van szükség. Ipari problémákra történő alkalmazásukkal kapcsolatban továbbra is érvényesnek tartjuk a „Variációs módszerek a törésmechanikában” szekció bemutatása végén írtakat.

A törés és a károsodás jelenségeinek tárgyalása a mérnöki munkában

A szekcióban elsősorban olyan előadások hangzottak el, amelyekben a törési és károsodási folyamatokat tágabb környezetükbe ágyazva tárgyalják, legyen szó akár gyártástechnológiai folyamatok gyártási paramétereinek meghatározásáról, akár nagyméretű nyomástartó rendszerek állapotának szerkezetintegritási elemzésekkel történő követéséről. A prezentációk közül érdekes volt hallgatni azt, amelyik bemutatta, hogyan használják fel a kritikus távolságok elméletét 3D nyomtatási eljárással készített beton próbatestek anyagvizsgálatainak kiértékelése során, figyelembe véve azok inhomogén szerkezetét és a bennük a készítés során létrejövő repedéseket is. Egy másik előadás témája folyamatos üzemű megleghengerléses technológia paraméterei és az alakítást elszenvedő gyártmány anyagának károsodási állapota közötti kapcsolat feltérképezése volt. Érdekes prezentáció mutatta be, miként hatnak a fogaskerekű pitting (felületi kipattogzás) folyamatok dominálta károsodási folyamataira a tervezés során meghatározott tribológiai paraméterek, a gyártási technológia és az alkalmazott kenőanyagok. Ebben a szekcióban kapott helyet a szerző „Structural Integrity Calculations for Ageing Large Scale Systems” című előadása [36]. A prezentáció az Energiatudományi Kutatóközpontban a nagyméretű nyomástartó berendezések – elsősorban VVER, illetve PWR típusú atomerőművek primerkörei, illetve primerköri nagyberendezései – szerkezetintegritási elemzési módszertanának továbbfejlesztésére a szerző által irányított és végzett kutatások jelenlegi állását foglalta össze. A kutatásokat azzal a céllal indítottuk, hogy: (1) jobban megértsük a mérnöki szerkezetekben végbemenő öregedési folyamatokat, és (2) közép- és hosszú időtávon a szerkezetintegritási számítások olyan módszertanát dolgozzuk ki, amely koherensebb elméleti megalapozottsággal rendelkezik, mint a jelenlegi nemzetközi jó gyakorlatban alkalmazott különféle biztonsági elemzési módszerek. Az eddigi munka során egységes koncepcióban – az életciklus paradigmába – foglaltuk a tervezői biztonsági számításokat és a szerkezetintegritási elemzéseket, előrejutottunk a szerkezetintegritás legfontosabbnak tartott alapelvei megfogalmazásában, valamint olyan fizikai elméletet kerestünk, amely alkalmasnak látszik a szerkezetintegritási elemzések feladatainak helyes megfogalmazására és a feladatok megoldására. Elméleti keretrendszernek a modern termodinamikát választottuk, mert a termodinamikában gyökerező elméleti modellek nemcsak formai szempontból kompatibilisek a termodinamikával, hanem a modellek működése is minden valószínűség szerint termodinamikailag konzisztens lesz. Ez

nagyon fontos szempont az elméleti keretrendszer megválasztása során, ugyanis a valós rendszerek viselkedése irreverzibilis; nem mindegy tehát, hogy az elmélet pusztán formálisan elégíti ki a termodinamikai konzisztencia követelményeit, vagy az elméletből levezetett modellek tényleg a termodinamika törvényeinek megfelelő megoldásokhoz vezetnek-e. A termodinamika választása mellett szól az a megfontolás is, hogy a fázismező elméletek és modellek alapjául szolgáló Ginzburg-Landau egyenletek a klasszikus elméleti megalapozástól függetlenül, termodinamikai úton, a termodinamika második főtételeiből ugyancsak levezetethetők (ld. pl. [37, 38]). Úgy tűnik, hogy az előadásban ismertetett modell ígéretes szerkezeti anyagok öregedési folyamatainak makroszkopikus szintű jellemzésére, és kiinduló pontja lehet a többskálás modellek fejlesztésére vonatkozó, további kutatásoknak is.

3. Összefoglalás

Az ECF23 konferenciát az ESIS – normális körülmények között – minden második évben megszervezett konferenciáinak sorozatában kivételesen nem a 2018-ban tartott ECF22-t követő második, hanem – a 2020 elején kitört Covid-járvány miatt – az ECF22 utáni negyedik évben tartották, Madeira fővárosában, Funchalban. Jelmondata a „Fracture Mechanics and Structural Integrity” címet viselte. A konferencia-program keretében 12 meghívott plenáris előadást, továbbá a 20 tematikus szekcióban mintegy 500 előadást hirdettek meg. A poszter-szekcióban 62 posztert mutattak be. A plenáris előadásokat hét, manapság szakmai szempontból jelentősnek tekintett témakörből válogatták: (1) polimer kompozitok; (2) additív gyártástechnológiával készített fémes szerkezeti anyagok; (3) ridegtörés; (4) fáradásos öregedés; (5) biomechanikai kérdések; (6) hidrogén okozta elridegedés; (7) feszített vasbeton hidak szerkezetintegritási kérdései. Az előadók az egyes témakörök nemzetközileg nagy reputációval rendelkező kutatói voltak.

Az esemény legtöbb előadást számláló szekciói a fádassal, az additív gyártástechnológiával készített alkatrészek szerkezetintegritási kérdéseivel, a hidrogén okozta elridegedéssel, a statikus és kvázistatikus terhelések hatásait elemző vizsgálatok bemutatásával, a numerikus módszerek fejlesztési kérdéseivel, a mikromechanikai modellek és a mikromechanizmusok kutatási problémáival, hegesztett kötések szerkezetintegritási kérdéseivel és a kompozit anyagok témájával foglalkoztak. Külön szekciót szenteltek a biológiai anyagok és a medicinában használatos anyagok szerkezetintegritási kérdéseinek. A manapság legnépszerűbb témák mellett jelen voltak olyan témakörök is, amelyek a jövőben vélhetően felértékelődnek, mint például a törésmechanika variációs módszereken alapuló tárgyalása és az azon alapuló modellek bevonása a mérnöki munkába, a roncsolásmentes vizsgálati módszerek bevonása a roncsolásos anyagvizsgálatok követésébe és az online állapotfelügyeletbe stb. A szervezők professzionális háttérrel segítették az esemény gördülékeny lebonyolítását. Összefoglalva elmondhatjuk,

hogyan a konferencia magas színvonalú, jelentős esemény volt az ESIS életében; a Covid-járvány utáni újrakezdés első nagy eseménye.

Fekete Tamás

Irodalom

- [1] Fekete, T., 2022. Beszámoló az ECF23 Konferenciáról – I. rész, Anyagvizsgálók Lapja, 2022/III 36–43.
- [2] Rankine, W.J.M., 1842. On the causes of the unexpected breakage of the journals of railway axles, and on the means of preventing such accidents by observing the law of continuity in their construction. Institution of Civil Engineers, Minutes of Proceedings, 2 105–108.
- [3] Morin, A., 1853. Leçons de mécanique pratique – résistance des matériaux. Paris, Librairie de L. Hachette et Cie, 456–460.
- [4] Braithwaite, F., 1854. On the fatigue and consequent fracture of metals. Institution of Civil Engineers, Minutes of Proceedings, 13 463–474.
- [5] Wöhler, A., 1870. Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl, Zeitschrift für Bauwesen, 20 73–106.
- [6] Palmgren, A.G., 1924. Die Lebensdauer von Kugellagern. VDI Zeitschrift, 68 14 339–341.
- [7] Miner, M.A., 1945. Cumulative Damage in Fatigue. Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME, 67 159–164.
- [8] Paris, P. C., Erdogan, F., 1963. A critical analysis of crack propagation laws, Journal of Basic Engineering, 85 4 528–533. doi:10.1115/1.3656900
- [9] Zhang, Z., 2022. Void-based predictive framework for hydrogen embrittlement, presentation, ECF23 Conference, Funchal
- [10] Gurson, A. L., 1977. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth. Part I – Yield Criteria and Flow Rules for Porous, Ductile Materials, Journal of Engineering Materials and Technology 99 2–15.
- [11] Tvergaard, V., 1981. Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Conditions, International Journal of Fracture 17 4 389–407.
- [12] Tvergaard, V., Needleman, A., 1984. Analysis of the Cup-Cone Fracture in a Round Tensile Bar, Acta Metallurgica et Materialia 32 1 157–169.
- [13] Tvergaard, V., Needleman, A., 2006. Three Dimensional Microstructural Effects on Plane Strain Ductile Crack Growth, International Journal of Solids and Structures 43 6165–6179.
- [14] Steinmann, P., 2022. Spatial and Material Forces in Nonlinear Continuum Mechanics. A Dissipation-Consistent Approach. In: Solid Mechanics and Its Applications 272. Springer Nature, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-89070-4>
- [15] Fekete, T., Antók, D., Tatár, L. és Bereczki, P., 2022. Extending Reliability of FEM simulations, based on Optically Assisted Tensile Tests – a Digital Twin, presentation, ECF23 Conference, Funchal
- [16] Chahboub, Y., Szávai, Sz., 2022. Damage prediction of ferritic pipeline using Artificial Neural Network, presentation, ECF23 Conference, Funchal
- [17] Silberschmidt, V.V., 2022. Mechanical behaviour of biomedical materials, presentation, ECF23 Conference, Funchal.
- [18] Arnold, V.I., 1984. Catastrophe Theory. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo.
- [19] Gilmore, R., 1993. Catastrophe Theory for Scientists and Engineers. Dover Publications, Inc., New York
- [20] Stewart, I., 1981. Applications of catastrophe theory to the physical sciences, Physica D: Nonlinear Phenomena, 2 2 245–305.
- [21] Thom, R., 1975. Structural Stability and Morphogenesis, An Outline for a General Theory of Models. W. A. Benjamin Inc, Reding, MA.
- [22] Spivakovsky, M., 2020. Resolution of Singularities: an Introduction, In: Molina J.L.C., Lê, D.T., Seade, J. (Eds.). Handbook of Geometry and Topology of Singularities I, Springer Cham, 183–242
- [23] Kollár J., 2007. Lectures on Resolution of Singularities, Volume 166 in the series Annals of Mathematics Studies. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- [24] Ferro, G. A., 2022. Structural Integrity of prestressed bridges, presentation, ECF23 Conference, Funchal
- [25] Ruggieri, C., 2022. Revisiting Cleavage Fracture Modeling in Steels: From the Griffith Assumption to the Beremin Model, and Beyond, presentation, ECF23 Conference, Funchal
- [26] NSF Program: Cyber-Physical Systems (2021), <https://www.nsf.gov/pubs/2021/nsf21551/nsf21551.pdf> (2021. 12. 09.)
- [27] Fradkov, A. L.: Application of cybernetic methods in physics. Physics–Uspekhi, 48:2 (2005) 103–127.
- [28] Landau, L.D., Ginzburg, V.L., 1950. A szupravezetés elméletéről, Zsurnal Eksperimentalnoj i Teoreticeszkj Fiziki 20 1064–1066. (orosz nyelven)
- [29] Boettinger, W. J.; Warren, J. A.; Beckermann, C.; Karma, A., 2002. Phase-Field Simulation of Solidification, Annual Review of Materials Research. 32 163–194. doi:10.1146/annurev.matsci.32.101901.155803.
- [30] Tóth, Gy., Pusztai, T., Gránásy, L., 2015. Consistent multiphase-field theory for interface driven multidomain dynamics, Phys. Rev. B, 92 18 184105 <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.92.184105>
- [31] Bourdin, B., Francfort, G.A., Marigo, J.J., 2000. Numerical experiments in revisited brittle fracture, Journal of the Mechanics and Physics of Solids 48 4 797–826. doi:10.1016/S0022-5096(99)00028-9
- [32] Bourdin, B., Francfort, G.A.; Marigo, J.J., 2008. The Variational Approach to Fracture Journal of Elasticity 91 1–3 5–148. doi:10.1007/s10659-007-9107-3
- [33] Karma, A., Kessler, D., Levine, H., 2001. Phase-Field Model of Mode III Dynamic Fracture, Physical Review Letters 87 4 045501. arXiv:cond-mat/0105034
- [34] Bermejo, R., 2022. Exploring new concepts to design “damage tolerant” ceramics using additive manufacturing, presentation, ECF23 Conference, Funchal
- [35] Lacave, A.M.F., Welschinger, F., De Lorenzis, L., 2022. Multiscale phase-field modeling of fracture in short glass fiber reinforced polymers, presentation, ECF23 Conference, Funchal
- [36] Fekete, T., 2022. Structural Integrity Calculations for Ageing Large Scale Systems, presentation, ECF23 Conference, Funchal
- [37] Ván P., 2002. Weakly nonlocal irreversible thermodynamics – the Ginzburg-Landau equation. Journal of Mechanical Science and Technology 22 2:104–110.
- [38] Ván P., 2005. The Ginzburg-Landau equation as a consequence of the Second Law. Continuum Mechanics and Thermodynamics doi:10.1007/s00161-004-0195-z

Résztétel a Paksi Atomerőmű öregedéskézelési programjainak támogatásában

Participation in supporting the Paks Nuclear Power Plant's ageing management programmes

Bevezetés

Az atomerőművek hosszú távú, biztonságos üzemelésének meghatározására szolgáló módszer alapját egy szisztematikus öregedéskézelési eljárás képezi. Ezen folyamat egyik alapvető része az atomerőműi rendszerelemek integritásának a bizonyítása. Ezért az üzemelési biztonság megítéléséhez, a várható élettartam értékeléséhez elengedhetetlen a berendezések szerkezeti anyagaiban a meghatározó károsodási folyamatok ismerete, pontos leírása és üzemelés közbeni monitorozása, értékelése.

Ezáltal kiemelt fontosságú az atomerőmű üzemeltetési biztonságának biztosítása és biztonságos üzemidejének támogatása, növelése. Az ehhez kapcsolódó K+F programok olyan tudományos és műszaki háttér megteremtését célozzák meg, melyek keretein belül ésszerű, hatékony együttműködéssel válnak segíthetővé a hazai és az európai nukleáris kutatásokkal foglalkozó közösségek, azok eredményeit felhasználó üzemeltetők a nukleáris villamosenergia termelés fenntartható fejlődése érdekében. Ezzel összhangban a Bay Zoltán Nonprofit Kft. Szerkezetintegritási és Gyártástechnológia Osztálya és Anyagvizsgáló osztálya több tíz éves múltta visszatekintve vesz támogatja az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. (Paksi Atomerőmű) Öregedéskézelési osztályának a munkáját, s épít kompetenciát, projektpartner különböző nemzetközi

kutatásokban az öregedéskézeléshez szorosan kapcsolódó problémakörök megvalósításának a tekintetében.

Az atomerőmű rendszerelemeinek integritás értékelése hagyományosan a törésmechanikai megközelítésen alapul, a meglévő szabályzatok és előírások szerint, amely magában foglalja az üzem közbeni ellenőrzéseket és a sugárzás okozta károsodás becslését vagy a reaktorban, a reaktormaghoz közeli kiválasztott helyeken besugárzott korlátozott megfigyelési minták vizsgálatát, amelyek előre jelzik a később várható degradációt. Ezekhez a tevékenységekhez korszerű numerikus és anyagvizsgálati módszereket alkalmazunk a több, mint 15 éve végzett kutatás-fejlesztési projektek megvalósításai során. A továbbiakban, a közös együttműködés részletekbe menő ismertetése céljából a napjainkban futó kutatási projektek rövid ismertetésére térnénk rá.

Résztétel egyesült SNETP AISBL keretében az öregedéskézeléssel kapcsolatos kutatásokban

Az SNETP – Sustainable Nuclear Energy Technology Platform, más néven Fenntartható Nukleáris Energia Platform célja a nukleáris energia szerepének erősítése a biztonságos, fenntartható, versenyképes és lényegében karbonmentes energiamix megteremtésében Európa számára. Az SNETP kiemeli a kutatás fontosságát a nukleáris



1. ábra: Az SNETP három fő szakmai pillére [1]

ágazatban, hogy a magas szintű biztonság fenntartható legyen, hogy a szektor megtartsa a szakértelmet és a know-how-t, ezzel egyre versenyképesebb legyen. Az SNETP ennek érdekében biztosítja a fokozott koordinációt a nemzeti programok között, egyúttal garantálva a leghatékonyabb felhasználását a programok finanszírozásának. Így alapvető célja a különböző országok résztvevőiből álló konzorciumok által végrehajtott olyan kutatási projektek támogatása, amelyek új tudás, új technológia, termékek vagy közös kutatási célú erőforrások létrehozására irányulnak. A kutatási programok finanszírozását az EURATOM és más kapcsolódó H2020-as programok biztosítják.

A szövetség kiindulási célja egy kutatás-fejlesztési és innovációs (K+F+I) hálózat/platform létrehozása volt, ezáltal az egyesület együttműködési projektek és nemzetközi együttműködés révén tudományos és technikai alapot biztosít a K+F+I stratégiák kidolgozásához, az innovatív és fenntartható megoldások megvalósításának és telepítésének támogatásához, beleértve az innovatív reaktor és az üzemanyagciklus koncepciókat is, emellett pedig a nukleáris energia villamosenergia termelésre történő felhasználását is. A szövetségnek mozgósítania kell az iparágakat, a tanulmányi- és kutatóközpontokat, a Technikai Támogató Szervezeteket (TSOs), a kis- és középvállalkozásokat (KKV-kat) és más érdekelt feleket (részvényeseket) az Európai Unióban (EU), hogy partnerségben működjenek, és hozzájáruljanak az innovációhoz és a tudomány jelenlegi (legkorszerűbb) állásának a követéséhez, fejlesztéséhez a K+F+I eredmények megvalósításának és terjesztésének használatával.

Az SNETP 2007-es alapítása óta a szervezet nagymértékben kiforrott. Robusztussága a három műszaki és tudományos pilléren alapul, melynek tematikus felépítése az 1. ábrán látható:

- NUGENIA (Nuclear Generation II&III Alliance): a nukleáris iparban a kutatás-fejlesztési és innovációs tevékenységért felelős.
- ESNII (European Sustainable Industrial Initiative): a IV. generációs nukleáris erőművek fejlesztésért felel.
- NC2I (Nuclear Cogeneration Industrial Initiative): célja az atomenergiában rejlő potenciál felszabadítása és felhasználása a villamos energián túlmenően.

A 2019-es években jelentős változás állt be a nukleáris energiatermeléssel kapcsolatos EU-n belüli kutatás-fejlesztési törekvések koordinálása területén. A NUGENIA nemzetközi szövetség megállapodott a Fenntartható Nukleáris Energia Technológiai Platformmal (SNETP), hogy egyetlen nemzetközi szövetséget hozzon létre. Az egyesülés által a SNETP és három szakmai pillér (NUGENIA, ESNII és NC2I) egyetlen jogi személy - belga jog szerinti nemzetközi nonprofit szervezet - működtetésére került sor. Együtt törekednek arra, hogy megerősítsék a nukleáris energiaipar pozícióját a mai és holnapi európai energiamixben, és megszilárdítsák az európai kutatási, fejlesztési, demonstrációs és innovációs technológiákat (K+F+I). Ez az egyesülés fontos mérföldkő, amely kiemeli az európai tudományos közösség (kutatóközpontok,

biztonsági támogató szervezetek és egyetemek) és az ipar (közmuvek, technológiai szolgáltatók, gyártók...) részvételét a biztonságos, versenyképes, hatékony és innovatív nukleáris energia biztosítása érdekében, s mint alacsony széndioxid kibocsátású energiatermelés, hozzájárul az európai energiaellátás biztonságához és az éghajlatváltozás mérsékléséhez. Az Európai Bizottság Kutatási és Innovációs Főigazgatósága és a Foratom képviselői üdvözltek a kezdeményezést, mely erősíti a nukleáris energiával kapcsolatos K+F+I-t képviselő széleskörű közösség helyzetét Európában és azon túl.

Az SNETP azon pillérét, mely a nukleáris iparban a jelenlegi technológiák biztonságos és versenyképes fenntartásáért felelős, a NUGENIA képviseli, melynek keretében a folyó K+F programoknál lehetőségünk van a paksi (VVER) specifikumok (anyagminőség, üzemeltetési adatok stb.) érvényesítésére a témák kidolgozásakor és a keletkező eredmények adaptációjára a Paksi Atomerőmű öregedéskelése során. Így képviselni lehet a hazai érdeket az öregedéskeléshez kapcsolódó nemzetközi benchmarking elemzésekben és best practice dokumentumokhoz VVER esettanulmányok készítésében, törekedni kell az eredmények Paksi Atomerőműre történő adaptálására.

A NUGENIA égisze alatt jelenleg is számos olyan projekt fut vagy projektjavaslat található, melyek a Paksi Atomerőmű öregedéskelési programját érintheti, s melyek további hasznos információkat szolgáltatnak, és melyek a típus öregedéskelési programok módosítása során felhasználhatók. A Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. (BZN) Szerkezetintegritás és Gyártástechnológia Osztálya és Anyagvizsgálat Osztálya több jelenleg futó EURATOM nukleáris projektben is projektpartner, melyről jelen lapszámban bővebben is olvashat.

Ezáltal a Paksi Atomerőmű megbízta a BZN-t az öregedéskeléshez kapcsolódó nemzetközi kutatási programok eredményeinek feldolgozására és a szükséges elemzésekkel, vizsgálatokkal kiegészített adaptálására a Paksi Atomerőmű részére. A nemzetközi tapasztalatok feldolgozása és adaptálása során az alábbi feladatok valósultak meg:

- bekapcsolódás a nemzetközi programokba, eredmények adaptálása,
- a NUGENIA keretében folyó munkák eredményeinek adaptálása,
- javaslatok kidolgozása az érintett Típus Öregedéskelési Programok (TÖKP) módosítására.

Az előző évek tapasztalatai és a rendelkezésre álló adatok, információk alapján elmondható, hogy az SNETP, illetve annak egyik pillérét jelentő NUGENIA együttműködések keretében döntő mértékben a nyugati országok kutatás-fejlesztésére fókuszál. Mindezek ellenére pozitívként elmondható, hogy a 2022-es évet tekintve egyre több azon támogatást nyert projektjavaslatok száma, mely a VVER-ekre vonatkozó adaptálható eredmények outputjaként szolgálhatnak, ezek a STRUMAT-LTO, APAL, FRACTESUS, ENTENTE és DELISA-LTO projektek, melyben a BZN is érdekelt, mint projektpartner, így

a 2022-es évet tekintve öt olyan pályázat is fut, melyek a Paksi Atomerőmű szempontjából releváns tématerületet ölelnek fel, ezáltal javasolt azok nyomon követése a legújabb kutatási eredményekhez való hozzáférés, másrészt azoknak a VVER viszonyokra történő adaptálása érdekében.

Tranziens varrat-vizsgálat fejlesztési lehetőségeinek kutatása

A hőátadó csövek és a kollektor tranziens varrat kötése az a két pont, ami jelenleg öregedéskezelés szempontjából különös odafigyelést igényel. A jelenleg alkalmazott vizsgálati eljárások egyrészt időigényesek, másrészt a bennük rejlő bizonytalanság miatt nagy biztonsági tartalékot követelnek.

Gőzfejlesztő alsó heterogén hegesztési varrat vizsgálata

A heterogén hegesztett kötések általában gyengén ötvöztött, ferrites acélból és rozsdamentes, ausztenites acélból állnak, amik átmeneti rétegen (párnarétegen) keresztül kerülnek összehegesztésre. A repedések a csonk varratának belső felületéről indulnak. A repedéseket vélhetően feszültségkorróziós folyamatok okozzák, és jellemzően a kemény felületi oxidréteg felől vagy kristályközi korróziós területekről indul, és különösen veszélyes, mivel a kezdeti mikropedések gyors ütemben képesek növekedni. Ennek következtében, mivel a heterogén hegesztési varratok esetében feszültségkorróziós repedések előfordulhatnak, kisebb és nagyobb csővezetéseken, a repedések detektálása kiemelten fontos feladat.

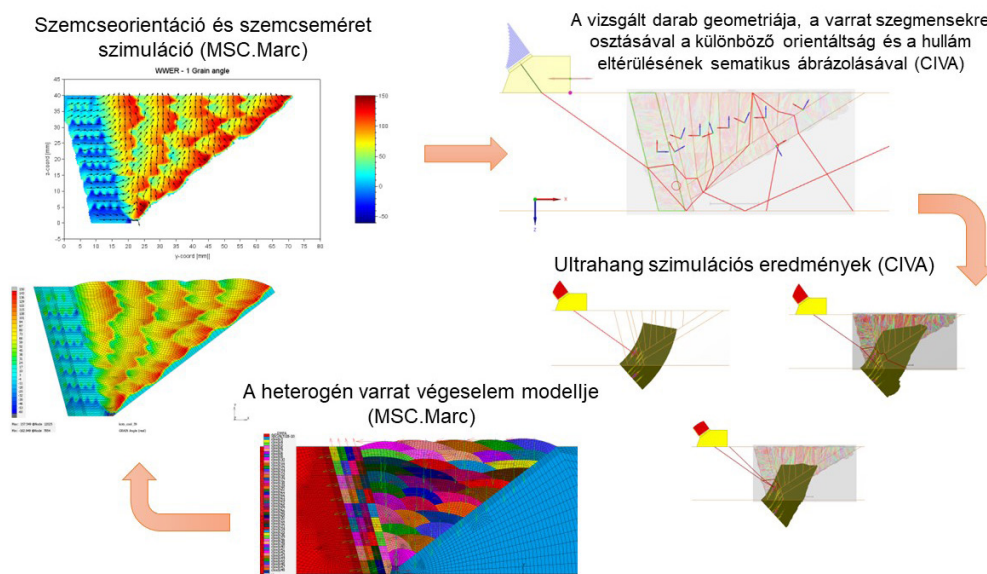
A hibák jelenlétének kimutatása kétféleképpen történhet: roncsolásos és roncsolásmentes módszerekkel. Mivel a roncsolásos módszerek a berendezések károsodásával járnak (anyagvesztés), ezért főként a roncsolásmentes vizsgálati módszereket alkalmazzák. A roncsolásmentes vizsgálati eljárások közül az ultrahangos vizsgálati technika szolgáltat leginkább információt a DMW-k vizsgálata esetében. Az ultrahangos hibakereső vizsgálatok során az anyagba nagy frekvenciájú hangnyalábot juttatunk, ami a hegesztési zónába is eljut, majd a visszaérkező ultrahangos válaszjelből lehet következtetni arra, hogy van-e hiba a hegesztési varratban. A kézi ultrahangos vizsgálatok esetében, amiket széles körben végeznek, a vizsgálatot végző személyek értékelik ki az ultrahangos válaszjeleket és következtetnek a hibák jelenlétére, típusára, elhelyezkedésére és méretére. Ennek következtében az értékelést végző szakemberek szubjektivitása befolyásolhatja az értékelést. Ezen felül a

heterogén hegesztési varrat anizotrópiája megnehezíti a hibák kimutatását, mivel a varrat szemcseszerkezete a hangnyaláb szóródását, eltérülését és a hangnyaláb energiájának csökkenését okozza.

Másfelől a heterogén hegesztési varratok vizsgálata fokozott figyelmet igényel a többi hegesztési varrathoz képest. A szemcseszerkezetük nem egységes, az ultrahangos hullámok sebessége változó a kristályszerkezet orientációjától függően, a hangnyaláb irányának a megváltozása és szóródása következik be, amikor az ultrahangos behatol a hegesztési zónába. Ezen felül a párnaréteg is okozhat hangtorzulásokat.

A tranziens varrat esetén az anyagi inhomogenitások és az orientált durva szemcseszerkezet jelent kihívást az amúgy is erős geometriai megkötésekkel elvégezhető vizsgálat számára, mely kihat a biztonsággal feltárható legkisebb anyagfolytonossági hiányok méreteire. A projekt egyik része a gőzfejlesztő alsó heterogén varratának ultrahangos vizsgálati szimulációval történő fejlesztésére vonatkozik. Így a projekt e tekintetben a következő feladatokat tartalmazza: Az alapanyagok és a varrat hanggyengítései megállapítása különböző frekvenciákon. Ezt követően különböző vizsgálófejek és beállítások mellett kiválasztásra kerülnek a feladat szempontjából ideális paraméterek, melyek értékelésére kimutathatósági valószínűség görbéket veszünk fel szimulációs módszerrel.

A projekt 2022. novemberében zárult, mely során a tranziens varratok (DMW-k) ultrahangos vizsgálati technikájának kivitelezési és értékelési eljárását segítettük elő modellezéssel. Kifejlesztettünk egy módszert a hanggyengítés megállapítására, valamint a kimutathatósági valószínűség értékelésére, amely lehetővé tette ezen adatok meghatározását rendkívül nagy adathalmazt létrehozva és feldolgozva a szimulációs környezetben [2]. Ezen módszerek alkalmazásával az ultrahangos anyagtulajdonságok ismertté váltak és alkalmazhatók más esetekben, valamint a vizsgálati technika kiválasztását is elősegítette.



2. ábra: Tranziens varrat-vizsgálat elemzési metodika [2]

Gőzfejlesztő hőcserélő csövek vizsgálata

A másik potenciális élettartam korlátot jelentő rész az erőmű élettartama során a hőcserélő csövek. A nukleáris iparban a primer és szekunder köri technológiai víz közötti hőcsere a gőzfejlesztőkben történik, ennek következtében a gőzfejlesztők is hőcserélőnek tekintendők. A hőátadó felület maximalizálása és az optimális hőátadási viszonyok elérése érdekében a hőcserélők jellemzően nagy számú, külön-külön kis átmérőjű és falvastagságú, nagy hosszúságú csövekből állnak. A hőátadó felület 5536 db U-alakú vízszintesen elhelyezett, rozsdamentes csőből áll, a csövek a függőlegesen elhelyezett be- és kilépő kollektorokat kötik össze. A primerköri hőhordozó a hőátadó csövek belsejében áramlik, ennek következtében a hőcserélő csövek külső és belső korróziós károsodásra egyaránt hajlamosak, integritásuk megőrzése kiemelt fontosságú.

A Paksi Atomerőműben a hőátadó csövek integritása érdekében 10 évente megtörténik a gőzfejlesztők ellenőrzése, ami nyomáspróbából és a hőcserélő csövek örvényáramos vizsgálatából áll. Az örvényáramos vizsgálati eljárás azonban nagy szakértelmet igényel, valamint időigényes vizsgálat (vizsgálati ideje kb. 5 perc egy csövet tekintve), ennek következtében a hőcserélő csöveinek vizsgálati időtartama is jelentősen csökkenthető, amennyiben az örvényáramos vizsgálatok kiválthatók más fajta roncsolásmentes vizsgálati eljárásokkal, amennyiben ezek a vizsgálati eljárások szintén képesek nagy biztonsággal, rövidebb vizsgálati idő mellett kimutatni a hőcserélő csövek esetleges anomáliáit. A feladat során olyan vizsgálati technika bevezetését elemezzük, mely során a megfelelő eredmény elérése mellett a vizsgálati idő csökkenthető, kiegészítve a jelenleg alkalmazott technikát vagy cserélve azt.

Az atomerőművek hőátadó közegei jellemzően nagy tisztaságúak, így a hőcserélő csöveinek megfelelő tisztasága is garantálható. Az APR (Akusztikus emissziós vizsgálat - Acoustic Pulse Reflectometer) roncsolásmentes vizsgálati technika 6-50 mm-es belső átmérő esetében nem igényel a csőátmérőhöz szorosan illeszkedő alkatrészt, a nukleáris iparban alkalmazott hőcserélő csöveinek belső átmérője pedig jellemzően ebbe a tartományba esik. A vizsgálati módszer jól alkalmazható a csővezeték belső anomáliáinak detektálására és pontos helyének

megadására a csőhossz mentén. Az APR (Acoustic Pulse Reflectometer - Akusztikus emissziós vizsgálat) roncsolásmentes vizsgálati technikával csővenként kb. 20 másodpercre csökkenthető a vizsgálati idő, ami jelentősen redukálhatja a hőcserélő vizsgálatának időtartamát. Az akusztikus emissziós vizsgálat (APR) a 6-50 mm-es belső átmérő esetében nem igényel a csőátmérőhöz szorosan illeszkedő alkatrészt, a nukleáris iparban alkalmazott hőcserélő csöveinek belső átmérője pedig jellemzően ebbe a tartományba esik. A vizsgálati módszer jól alkalmazható a csővezeték belső anomáliáinak detektálására és pontos helyének megadására a csőhossz mentén.

A feladat végrehajtása során próbamérést hajtottunk végre a Paksi Atomerőmű Karbantartási Gyakorló Központjában lévő hőcserélőn a technika alkalmazhatósága (lásd 3. ábra), valamint a módszer értékelése és további, az üzem közbeni alkalmazhatóságra vonatkozó javaslatlét céljából. Összegzőként elmondható, hogy a csővezeték U-alakú geometriája nem zavarta a vizsgálatot, a csövek görbülete, valamint az alátámasztások nincsenek hatással a vizsgálati eredményekre. A lerakódások üzembiztosan detektálhatóak voltak, és pontos távolságuk is meghatározható volt a hőcserélő csövek kezdőpontjától mérve. A vizsgálati eredmények alapján az eszköz a már 5%-os keresztmetszet-csökkenéssel járó lerakódások detektálására is képes. Az erózió vagy pitting korróziós károsodás okozta helyi falvesztés vonatkozásában a 20%-os falvesztéget meghaladó korróziós károsodásokat képes detektálni vizsgáló eszköz, míg teljes átlukadások is detektálhatóak voltak a vizsgált hőcserélő szegmenst illetően. Mivel a gőzfejlesztő a csővezetékének az esetében külső korrózióra is számítani lehet, az APR vizsgálatot örvényáramos vizsgálatokkal kombinálva javasolt alkalmazni.

Használt Charpy próbatetek felhasználása komplex törésmechanikai jellemzők meghatározásához

A kis próbatestes vizsgálati módszerek használata ígéretes módja annak, hogy leküzdjük a reaktortartály (RPV) felügyeleti programok korlátozott anyagproblémáját. A kisméretű próbatetek használata lehetővé teszi a törési szívósság értékelését más használt próbatetek anyagán. Különösen a kisméretű, mini CT próbatestes (0,16 CT,



3. ábra: A primerköri gőzfejlesztő hőcserélő csöveinek APR vizsgálata [2]

4 mm vastagság) törési szívósság meghatározás ígéretes, mivel azok a már tesztelt, normál méretű Charpy mintából állíthatók elő. A projekt átfogó célja az, hogy bemutassa a törésszilárdság vizsgálatának megvalósíthatóságát kisméretű próbatestek felhasználásával. Ebből a célból a Charpy próbatestekből kisméretű, mini CT mintákat veszünk ki. A kapott eredményeket összehasonlítjuk a már elérhető és a szakirodalomban közzétett normál CT vagy Charpy méretű próbatestek vizsgálati eredményeivel, melyből következtetések vonhatók le az eredmények használhatóságára és alkalmazhatóságára vonatkozóan.

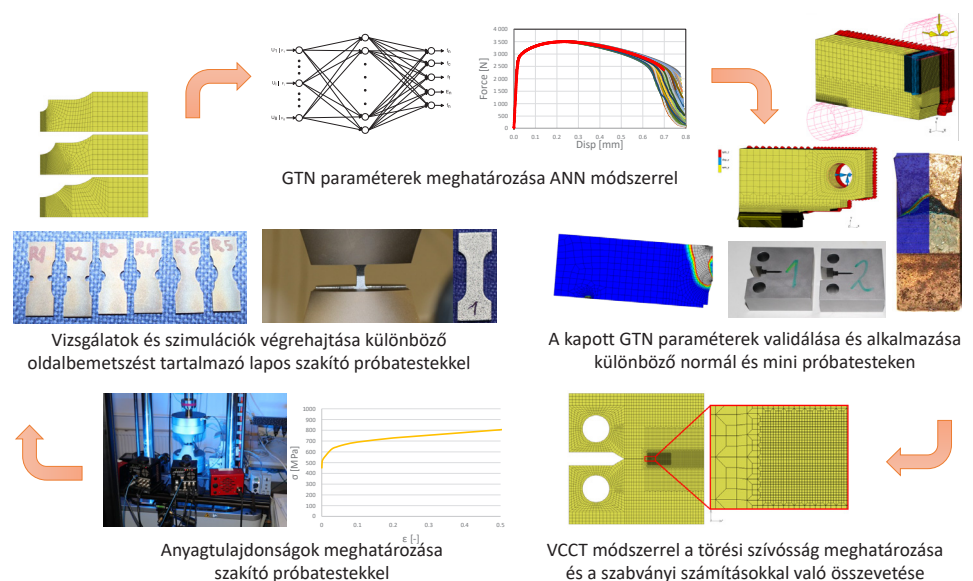
A mini CT próbatestek optimális kialakításának kiválasztása is feladat a projekt megvalósítása során (lyukméret és -helyzet, szikraforgácsolás vagy megmunkált rés, extenzométer-szerelés). A lyuknak elég nagyra kell lennie ahhoz, hogy biztosítsa a csap erősségét, és a maradék keresztmetszetnek elég erősnek kell lennie ahhoz, hogy elkerülhető legyen a próbatest nemkívánatos részein a képlékeny deformáció. A kialakításnak figyelembe kell vennie az erősen besugárzott próbatestek megmunkálási lehetőségeit is. Fontos kérdés a geometria megengedett szórásának meghatározása is. A geometria hatásszóródása a minta méretének csökkenésével növekszik. Így a projekt megvalósítása során technológiát kell kidolgozni a próbatest előfárasztására és a kiinduló repedésméret meghatározására.

A kidolgozás során a mérési technikát is meg kell vizsgálni. A mérési és vezérlőrendszernek elég érzékenynek kell lennie ahhoz, hogy megfeleljen az ASTM 1921 követelményeinek. Az ARAMIS DIC (digitális image correlation) rendszer alkalmazása segít kisméretű próbatestek mérésében, továbbá abban, hogy kiegészítő információkat kapjunk a törés viselkedéséhez és a lokális modell paraméterek meghatározásához használható deformációról.

Azonban, ha csak 0,16CT vizsgálatunk van, akkor nem tudjuk vizsgálni a mérethatast, és ha csak CT geometriánk van, akkor csak egy gátolt alakváltozási állapota van, amely problémát jelenthet a geometria függetlenség igazolásában és a korszerű elemzésekhez szükséges lokális paraméterek meghatározásában. A lokális mikromechanikai modellezésen alapuló módszereket, mint például a Gurson porózus plaszticitási modelljét vagy a Beremin modellt használják a tudományos kutatás területén. A Local Approach és a kohéziós zóna modellezés kombinációja ígéretes módja lehet egy nemlineáris törésmechanikai elemzés eszközének a kialakítására az átmeneti hőmérsékleti tartományban. A modell megjósolhatja a mikrostruktúra és a kényszerek hatását a teljes Erő-COD görbére, a szívós nyírási ellenállásra és hasadási törésre a szívós/

rideg átmeneti tartományban.

Ezért a javaslat, hogy legalább kétféle próbadarab kerüljön előállításra két különböző gátolt alakváltozású próbatesttel. A 0,16CT mellett mini SENB (vagy mini SENT) előállítása is szükséges, melyeket ki lehet vágni a használt Charpy mintákból is. Szintén szükség van miniszakító próbákra is. Az így elvégzett mérések elegendő információt szolgáltathatnak a lokális modellek paramétereinek meghatározásához. Ezenkívül átfogó módszert lehet javasolni a hagyományos értékek, mint a COD, LLD, vagy bármilyen más deformáció vagy nyúlás mérésére, amelyek kisméretű próbatesteken kihívást jelentenek, vagy lehetetlenek lennének a hagyományos érintkezésen alapuló eszközökkel való vizsgálatok meghatározása során. A mérések alapján feladatként be kell mutatni a törésmechanikai jellemzők meghatározását: A feszültség és feszültségmező kiszámítását a repedés elején; A J-integrál és a feszültségintenzitási tényező számítását; mikromechanikai károsodási modellek a használati lokális modellekkel; és végül a mérethatast értékelését; 2D és 3D repedésnövekedés szimulációk végzését. A kiértékelést az általánosan használt modellek (pl. Gurson modell), valamint az XFEM elemeken alapuló viszonylag új modellezési megközelítések vagy kohéziós elemek felhasználásával kell elvégezni, mint például a Frictional Cohesive Zone Model.



4. ábra: Szimulációs eljárás fejlesztése a szabvány által nem kezelt próbatestek törésmechanikai elemzésére [3]

A feladat 2022. novemberében zárult, mely eredményeként egy olyan vizsgálati - szimulációs eljárást dolgozott ki a BZN, mely során a használt, normál méretű próbatestekből kialakított kisméretű és miniaturizált próbatestekkel lehetséges a további törésmechanikai vizsgálatok elvégzése. E feladat során mind a vizsgálati technika fejlesztésre került, és a normál méretű próbatestek vizsgálatára kidolgozott szabványok értékelése is megtörtént, valamint egy olyan szimulációs eljárás lett bemutatva, amely segítségével a szabvány által nem kezelt, egyedi esetek is értékelhetők.

Ellenőrző mikrokeménység mérések végrehajtása és kiértékelése

A VVER440 típusú atomerőművi blokkok üzemelése során a szerkezeti anyagokban olyan változások történhetnek, melyek hatással lehetnek a mechanikai tulajdonságokra és ezen keresztül a további üzemelésre, ezért az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. azt a célt tűzte ki, hogy folyamatosan ellenőrizze a főberendezések állapotát. Ennek egyik lehetséges módja a berendezések kitüntetett (jellemző) helyein végrehajtott műszerezett keménységmérési vizsgálat végzése, mely információt ad a berendezés adott időpontjában annak mechanikai tulajdonságairól.

A fentiekkel összhangban a Paksi Atomerőmű az 1., 2., 3. és 4. blokki primerköri főberendezések szerkezeti anyagai mechanikai tulajdonságainak folyamatos ismerete céljából 2011 óta műszerezett keménységmérést (Automated Ball Indentation Test, ABIT) és adott szempontok szerinti kiértékelést végeztet a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.-vel a kiválasztott főberendezések szilárdsági számítások keretében kijelölt helyein. A feladatokban a BZN Anyagvizsgálati Osztálya, valamint Szerkezetintegritási és Gyártástechnológia Osztálya vesz részt évről évre.

A mérési sorozat napjainkban is tart, általános célja a szilárdsági számításokban használt anyagtulajdonság (folyáshatár és szakítószilárdság) értékek ellenőrzése és az eredmények felhasználásával, illetve gépkönyvi és rendelkezésre álló irodalmi adatok, további korábbi már meglévő mérési adatok alapján az 50+10 éves üzemeltetési időszak végére várható anyagtulajdonság értékek becslése, továbbá, hogy bemutassa az adott anyagtulajdonság változás trendjét és összehasonlítsa az értékeket a PNAE G-7-002 szabvány [4] által megengedett értékekkel.

További cél a 2011-2019 között végzett helyszíni műszerezett keménységmérések eredményeinek ellenőrző vizsszámérése és a kapott eredmények elemzése a korábbi eredmények figyelembevételével. Az anyagtulajdonság változást jellemző trendek bemutatása közvetett mérésre alapuló eredményekkel.

Az első blokki mérések 2011 évében kezdődtek. Évente egy blokk mérésére volt lehetőség, blokkonként 6-10 berendezésnél, kvázi roncsolásmentesen. A viszonylag kevés számú mérési eredmény anyagspecifikus értékeléseket tett lehetővé, figyelembe véve a gyártóművi értékeket és a szakirodalomból vett eredményeket (az irodalomból vett adatok szintén anyagspecifikusak). A mérési pontok számának növekedésével 2020 évében lehetőség nyílt a meglévő becslések pontosítására és berendezés specifikus közelítésekre is. Ennek tükrében a közel 11 éves vizsgálatssorozat a 2011-2022 között elvégzett 1. – 4. blokki mérések eredményeinek összefoglalása, a levonható konzekvenciák tárgyalása, továbbá a felállított trend alapján az 50, ill. 60 évre vonatkozó szilárdsági tulajdonságok előrejelzése (becslése) berendezéscsoportokra került meghatározva a gőzfejlesztő, térfogatkiegénylítő tartály, melegági vezeték, melegági vezeték YP elágazás, melegági FET (főelzáró tolózár), hidegági FET, térfogatkompenzátor YP elágazás, reaktorfedél már kijelölt helyeit tekintve.

Az elemzések során a 2011 – 2022. évre végzett keménységmérési vizsgálatok eredményei, és a vonatkozó berendezések berendezéscsoportokra kigyűjtött gyártási műbizonylatokban szereplő szilárdsági jellemzői (folyáshatár és szakítószilárdság értékei) összegzésre kerültek az üzemidő függvényében, majd az 50, ill. 60 évre vonatkozó szilárdsági tulajdonságokra épülő extrapoláció alapját képezték. A szakirodalomban fellelhető adatok változása a gépkönyvi és a helyszíni keménységmérési eredményekre fektetett lineáris közelítésű trend változásának az ellenőrzésére és igazolására szolgált.

Az értékelés eredményeként a következő főbb megállapítások kerülhetnek levonásra:

- A bemutatott mért értékek a méréshez, illetve a mérési módszerhez tartozó hiba tartományába esnek. Ennek alapján azt lehet megállapítani, hogy az értékek esetleges trendje e tartományon belül marad, és arra enged következtetni, hogy a szilárdsági számítások során figyelembe vett anyagjellemző értékek érvényesek maradnak 50, illetve 60 évre.
- Az eddig meghatározott trendek alapján kijelenthető, hogy a szilárdsági számítások során figyelembe vett anyagjellemző értékek érvényesek maradnak 50 ill. 60 évre vonatkozóan.
- A helyszíni keménységmérések eredményei és a gyártóművi adatok alapján becsült szilárdsági tulajdonságok alapján megállapítható, hogy mindegyik berendezéscsoport esetén az 50 és 60 évre becsült értékek megfelelnek a PNAE által előírt minimum feltételeknek.
- A becslés megbízhatóságának értékelése mutatja, hogy az 50 és 60 évre történő becslés esetén a 95% konfidencia tartomány is az előbb említett PNAE minimum előírás fölött helyezkedik el.
- Az 50, ill. 60 évre számolt megengedett feszültségintenzitási tényezők a vizsgált berendezéscsoportok esetében a PNAE szabvány alapján számított megengedett tervezési feszültségintenzitási tényezőktől magasabb értékeket vesznek fel, így erős bizonyossággal kijelenthető, hogy a meghosszabbított üzemidőre is biztosított a vizsgálat alá bevont berendezéscsoportok integritása.

A becslés bizonytalansága a mérési pontok növelésével csökkenthető, ezért a pontosabb becslés érdekében a helyszíni vizsgálatok folytatása javasolt, melyek során nyert adatmennyiség a Paksi Atomerőmű blokkjai üzemidő hosszabbításának megalapozásaként szolgálhat a jövőre nézve.

Jelentős mértékű szilárdsági növekedést mutató atomerőművi anyagok vizsgálatának fejlesztése fő berendezésekre

A helyszíni műszerezett keménységmérések során egyes csővezetéki és rendszerelemek esetében a 08H18N10T, 08H18N12T, 10H18N9TL anyagokra a helyileg kapott szilárdsági jellemzők némely esetben magasabbak, mint a gépkönyvi adatok. A növekedés mértéke egyes esetekben jelentős is lehet. Ilyenek például a melegági vezetékek,

YP elágazások és a hideg- és melegági FET-ek (főelzáró tolózárak). Ezeknél a szerkezeti elemeknél felvetődik a kérdés: a magasabb értékek az elem kialakításából, igénybevételeből, esetleges öregedési folyamatokból származó anyagszerkezet-változás következménye, vagy a vizsgált szerkezeti elem a leállítás ellenére valamilyen magasabb feszültségállapotban van a vizsgálat alatt és a magasabb mért érték annak következménye-e, hogy a műszerezett feszültség mérési technika érzékeny a vizsgált anyag feszültségállapotára.

Ezen kérdések megválaszolását célozza meg jelen kutatás-fejlesztési projekt, melyben részt vesz a BZN Anyagvizsgáló Osztálya, valamint Szerkezetintegritási és Gyártástechnológia Osztálya.

A projekt 2022. évben indult, s futása során a jelentős mértékű szilárdsági növekedést mutató 08H18N10T és 08H18N12T anyagú elemek további okfeltáró vizsgálatát végezzük el, különös tekintettel az esetlegesen élettartamot korlátozó körülményekre, kiegészítve mikroszerkezeti (mikroszkópi) vizsgálatokkal és ferittartalom méréssel. A helyszíni vizsgálatok megkezdése előtt előkészítő méréseket

szükséges végezni a már üzemelt alapanyagokon (főke-ringtető szivattyú vezetőkerek) és a Karbantartási Gyakorló Központban levő főke-ringtető vezetéken és tolózárakon.

Szávai Szabolcs, Rózsahegyi Péter

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

Irodalomjegyzék

- [1] SNETP STRATEGIC RESEARCH AND INNOVATION AGENDA, SRIA, July 2021, SNETP Sustainable Nuclear Energy Technology Platform
- [2] Tranziens varrat-vizsgálat fejlesztési lehetőségeinek vizsgálata, Kutatás-fejlesztési jelentés, SZR-0352/2022/D1, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., 2022.
- [3] Használt Charpy próbatetek felhasználása komplex törésmechanikai jellemzők meghatározásához, Kutatás-fejlesztési zárójelentés, ENG-SZR-0352/2022/D1, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., 2022.
- [4] PNAE G-7-002-86: Rules of strength calculation for equipment and pipelines of nuclear power plants, 1989.



2023. évi MAROVISZ Díj átadása

a XIII. RAKK keretében valósul meg

2023. március 21 - 23. között.



A kitüntetésre érdemesnek tartott személyekre javaslatot tehetnek 2023. február 17-ig, melyet juttassanak el a MAROVISZ titkárságára (marovisz@marovisz.hu) és egyidejűleg küldjék meg a Kuratórium elnökének (gati@uni-obuda.hu).

Részletek a [MAROVISZ](#) oldalán!

A Bay Zoltán Nemzeti Kutatóintézet-hálózat kialakítása II. ütem

Establishment of the Bay Zoltán National Research Network II. phase

A hazai vállalati innováció segítése és a nemzetgazdaság versenyképességének növelése érdekében a Kormány a 1446/2019. (VII. 26.) Korm. határozatában döntést hozott egy állami finanszírozású alkalmazott kutatóintézeti hálózat intézményrendszerének és finanszírozásának kialakításáról. Ennek keretében az alkalmazott kutatóintézet hálózat kialakítását, a hálózat működtetésre való felkészítését, a csatlakozó tagok felkészítését követően, ezen eredményekre építve, a Bay Zoltán Nonprofit Kft. (BZN) koordinálja és támogatja.



1. A támogatás háttere

A Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. 2020. év végén 2020-2.1.1-ED-2020-00113 azonosítószámú projekt keretében 601 939 000 Ft vissza nem térítendő, 100% intenzitású támogatást nyert a 2020. november 1-től 2023. január 31-ig tartó megvalósítási időszakra.

2. A projekt célja

A projekt célja a Bay Zoltán Nemzeti Alkalmazott Kutatóintézet- Hálózat működésének elindítása az alábbi feladatok tekintetében:

1. A Hálózat I. ütem projekt keretében kialakított, szervezeti, jogi működési elvek mentén az alkalmazott kutatóintézet hálózat továbbfejlesztése. Ezek a korábbi (Hálózat I.) projekthez hasonlóan, javaslatok kidolgozását jelentette, figyelembe véve az operatív működésből származó visszajelzéseket, melyek alapján pontosíthatóak a jogi, szervezeti, működési területek keretrendszerei.
2. A kutatóhálózat, elsődlegesen a Bay Zoltán Nonprofit Kft. hosszú távú fenntarthatóságát biztosító új K+F prototípus (szolgáltatás, termék) fejlesztését célzó projektek megvalósítása.
3. A kutatóhálózat, elsődlegesen a Bay Zoltán Nonprofit Kft. hosszú távú fenntarthatóságát biztosító BZN eszközparknak (hardware és szoftver) a modernizációja.
4. Mindezek mellett a jelen projekt és a projektben megfogalmazott operatív és adminisztrációs feladatok végrehajtása.

3. Kutatóintézet-Hálózat projekt megvalósítása során elért eredményei

A Bay Zoltán Nonprofit Kft. szervezetén belül létrejött „Hálózati Központ” 2022-ben kezdte meg az első teljes naptári évre vonatkozó tevékenységét. A projekt keretében, operatív feladatai körében előkészítette és

megtartotta a Tagi Fórum üléseit, támogatta az Innovációs Tanácsadó Testület munkáját.

A szakmai eredmények közül kiemelkedik a Hálózat Kutatási Stratégiájának elkészítése, amely kijelöli a közös stratégiai célokat és irányokat, valamint meghatározza a Tagok tudományos és kutatói munkájának szakmai kereteit.

A Hálózati Központ alapító szerződésben meghatározott feladata, hogy mérje fel és vezessen nyilvántartást a Hálózat Tagjainál rendelkezésre álló emberi és infrastrukturális erőforrásokról, valamint azokról a K+F szempontból releváns kompetenciákról, amelyek a Tagok munkatársainál rendelkezésre állnak, melynek következtében a kompetenciaterkép elkészítése megkezdődött.

4. Megvalósított K+F alprojektek és tevékenységek

A projektben vállalt célok és eredmények elérésének érdekében a megvalósításban a Bay Zoltán Nonprofit Kft. valamennyi divíziója részt vett. A projektben az alábbi alprojekteket valósítottuk meg:

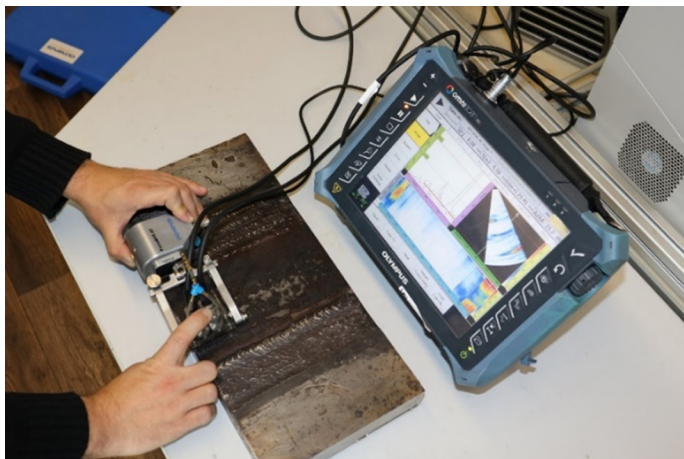
- ECODESIGN KUTATÁS,
- INNOVÁCIÓ ÉRTÉKEKELÉS METHODOLOGIA ÉS TANANYAGFEJLESZTÉS,
- MI ADATGAZDAGÍTÁS ,
- BAYBIT,
- SMART CARE DATAMINING, DRIVER MONITORING,
- NÖVÉNYI HATÓANYAG PROJEKT,
- KÁRFELMÉRÉS TECHOLÓGIAI KUTATÁS FEJLESZTÉS ÉS BIOLÓGIAI KÁRMENTESÍTÉS,
- BIOLÓGIAI KÁRMENTESÍTÉS OLTÓANYAG FEJLESZTÉS,
- FEMTO ÉS TRUMPF,
- TURIZMUSBIZTONSÁG,
- TMK EURAXESS KÖZÉPEURÓPAI HÁLÓZAT,
- NAFEMS.

A felsorolt alprojekteken kívül a projekt megvalósításához kapcsolódik a vízi környezetben való távérzékelési-adatgyűjtési feladatok megvalósítására alkalmas multi-sugaras szonár és kiegészítő eszközök második ütemben megvalósult beszerzése.

A kisseriás laborunk lehetőséget kínál vállalkozások számára gyártási tevékenységük elindításához, ezért ennek korszerűsítése is megkezdődött.

Az anyagvizsgálati eszközpark fejlesztésének célja az ipar kutatási kapacitás spektrumának bővítése volt, mely sikeresen megvalósult az alábbi eszközök beszerzésével: VersaMOUSE szkennerek, bevonat vastagságmérő,

ultrahangos falvastagság mérő, digitális ipari endoszkóp, Terahertz frekvenciájú rétegvastagság mérő. A beszerzések által lehetőség nyílt új, korábban a BZN számára nem elérhető vizsgálati módszerek meghonosítására, illetve meglévő vizsgálati módszerek fejlesztésére. A vizsgálatok fejlesztése által részvételi lehetőség nyílt olyan hazai és nemzetközi pályázatokban, amelyekben korábban az eszközpark hiányossága miatt nem volt lehetőség.



Veramouse scanner

A DKS 25A típusú excenterprés beszerzésével a BZN képessé vált egy kombinált megmunkálás kivitelezésére, melyben egy lézerrel elővágott alakzatot stancol tovább, így biztosítva a pontosságot és a kiváló felületi minőséget.

5. A projekt hatása

A Bay Zoltán Nonprofit Kft. célja a hazai vállalatok versenyképességének és hatékonyságának növelése sikeres innováció és technológia transzfer révén, szoros együttműködésben vezető hazai és külföldi partnerintézményekkel. Megrendelőink és partnereink számára – ez az elmúlt évek során hozzávetőlegesen 400 vállalatot jelent - komplex tudományos és műszaki megoldásokat kínálunk számos szakterületen, amelyek hozzájárulhatnak hatékonyságuk fokozásához.

Jelen projekt eredményeként elindult a Bay Zoltán Nemzeti Alkalmazott Kutatóintézet-Hálózat, megvalósítottunk számos belső kutatási projektet és részprojektet.

A projektben lehetőség nyílt a tudomány és a technika jelenlegi állásának mélyebb megismerésére, az alkalmazás innovatív lehetőségeinek feltárására, az ismeretek kereteit bővítő új eljárások és megoldások felszínre hozására.

Szellemi műhelyként, kutatóink és szakértő csapatunk révén, képesek vagyunk a felmerülő ipari kutatás-fejlesztési igényeket nemzetközi összehasonlításban is magas szakmai színvonalon kiszolgálni, és azokat az ötlettől egészen a megvalósulásig eljuttatni.

Kompetenciáinkat folyamatosan fejlesztjük, képzéseken, továbbképzéseken veszünk részt, annak érdekében, hogy szolgáltatásaink magas színvonalát megőrizzük, valamint hozzájárulunk a szervezet fejlődéséhez és versenyképességéhez.

Partnereinket támogatni tudjuk a nemzetközi piacra lépésben is, szerteágazó nemzetközi kapcsolatrendszerünkön keresztül. Pályázatoknál konzorciumépítésben is sikeresen közreműködünk, illetve európai uniós kutatási, fejlesztési és innovációs pályázatokban is aktív szerepet vállalunk, valamint technológiai inkubációs tevékenységet is végzünk.

A projekt hozzájárult cégünk elismertségének magasabb szintre emeléséhez, a hasonló profilú kutatóhellyel és gazdasági társaságokkal való együttműködés erősítéséhez, valamint hazai és nemzetközi kapcsolataink kiszélesítéséhez, ösztönző hatással bírt új projektjeink generálásához.

Küldetésünknek tekintjük, hogy továbbra is egyfajta katalizátorként, kiemelkedő technológiai színvonalú és nemzetgazdasági szinten is számottevő, magas hozzáadott értéket közvetítő nemzetközi és hazai projektekben vegyünk részt, amelyek hasznosulásukkal jelentős mértékben képesek szolgálni a társadalmi jólétet.

Célunk továbbá az alkalmazott kutatás eredményeivel támogatni a magyar vállalatokat, erősítve a hazai KFI ökoszisztémát és hozzájárulni a magasabb hozzáadott értékű termeléséhez.

Varga Dávid
BAY-TMK divíziógazdátó

Köszönetnyilvánítás

Jelen projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium által a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal, mint kezelő szerv útján a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból valósulhatott meg.

Bővebb információért, kérjük forduljon hozzánk bizalommal!

www.bayzoltan.hu
bayzoltan@bayzoltan.hu


NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL

AZ NKFI ALAPBÓL
MEGVALÓSULÓ
PROJEKT

STRUMAT-LTO projekt: Structural Materials research for safe Long Term Operation of LWR NPPs

Szerkezeti anyagok kutatása az LWR atomerőművek hosszú távú biztonságos üzemeltetése érdekében

1. Bevezetés

A reaktortartályok és fúziós berendezések nagyenergiájú neutron és gamma sugárzásnak vannak kitéve, mely öregedést okoz és meghatározza az élettartamukat. Az élettartam számítások pontosításához és a sugárzás álló acélok fejlesztéséhez az öregedési folyamatok megismerése nemcsak makro-, de mikroszinten is elengedhetetlenül szükséges.

A 2020-ban elfogadott EURATOM kutatási keretprogramok egyike a STRUMAT-LTO (STRUctural MATerials research for safe Long Term Operation of LWR NPPs) projekt, amit magyar intézet, az Energiatudományi Kutatóközpont (EK-CER) vezet a hollandiai Nuclear Research and Consultancy Group (NRG) együtt. **A projekt célja a Mn és Ni ötvözők szerepének tisztázása a nukleáris reaktorok tartály anyagának sugárkárosodásában.** A neutronsugárzás okozta károsodás összetett folyamat. A nagyenergiájú (gyors) neutronok roncsolják a fémek szerkezetét, új rácshibákat hoznak létre, gyorsítják a diffúziós folyamatokat. Egyes szennyező elemek (például a foszfor és a kén) kitudódnak a szemcsék felületére és gyengítik a szemcsék közötti kötések, felkeményedés nélküli elridegést okozva. Az ötvöző elemek egy része a szemcséken belül hoz létre kiválásokat, ezzel az anyag felkeményedését eredményezve. Mind a szemcsék közötti kötés meggyengülése, mind a mátrix anyagának a felkeményedése elősegíti a szemcsék közötti törést, azaz növeli a ridegtörési hajlamot.

Az acélok rácsában a legkönnyebben a réz atomok mozognak. A réz atomok által kialakított rácshibák kiinduló helyei más elemek kiválásának. Szinte valamennyi ötvöző és szennyező elem megtalálható az így keletkezett klaszterekben. Ezek a klaszterek akadályozzák a diszlokációk mozgását, csökkentik a képlékeny alakváltozási képességet, azaz elridegést okoznak. Szerencsés hatás viszont, hogy a foszfor atomok egy része is csatlakozik a klaszterekhez és ezáltal jelentősen csökken a foszfor szemcsehatár menti kiválása, ezzel együtt a ridegtörés veszélye.

A második generációs acéloknak a kiválások hatásának csökkentése érdekében a gyártók igyekeztek a réz, foszfor és kén mennyiségét csökkenteni. A kohászati technológiának azonban vannak gazdaságosságtól függő határai.

Az alacsony réztartalmú reaktorral acélok mátrix anyagában a szabad réz nagyrésze hamar elfogy és a klaszterek keletkezése lelassul. Ekkor azonban megjelennek a Mn-Ni alapú kiválások és esetleg felgyorsítják a sugárzás okozta elridegési folyamatot, megváltoztatják az élettartam számításokhoz felhasznált trendgörbék alakját. A jelenség angol neve „late blooming”. A Mn és a Ni fontos ötvözők az acéloknak, növelik a szilárdságot és a törési

szívósságot. A STRUMAT-LTO projekt célja a Mn és Ni szinergikus hatásának a kutatása.

14 különféle összetételű acél-minta került besugárzásra 2004-től a petteni (Hollandia) High Flux Reactor (HFR) kutatóreaktorban, amely az Európai Közös Kutatóközpont (Joint Research Center – JRC) égisze alatt működik. A besugárzás 2016-ban fejeződött be és ekkor konzorcium alakult a vizsgálatok lefolytatására. 17 EU intézet és egy ukrain kutatóközpont vesz részt a munkában az EK-CER és az NRG vezetésével. A konzorcium 2020-ban elnyerte az Európai Unió támogatását és megindult a kutatás, ami a tervek szerint 2024-ben fejeződik be.



2. A projekt előzményei

Jelenleg a világon működő atomerőművek túlnyomó többsége nyomottvízes reaktorról épült a múlt század második felében. Akkor az élettartamot az öregedéssel kapcsolatos ismeretek hiánya miatt 30-40 évre választották, azért is, mert ennyi idő alatt biztosan megtérül a befektetett tőke. Időközben az erőművek biztonságával és az anyagok öregedésével kapcsolatos kutatások eredményei alapján az atomerőművek jelentős részét korszerűsítették, és az üzemeltetési élettartamukat meghosszabbították. Az atomerőművek másik csoportját pedig a tervezett élettartam végén (néha előbb is, legtöbbször politikai vagy gazdasági okból) bezárták. **A szerkezeti anyagok öregedésének kutatása az élettartam hosszabbításának és a biztonságnak az egyik fő alappillére.** A szerkezeti anyagok öregedését a bennük levő ötvöző és szennyező elemek diffúziója okozza. A diffúziót általában a szerkezeti anyag mikroszerkezete, ezen belül az atomi kötések erőssége, a diszlokációk mérete és jellege, a szennyező atomok mérete és a hőmérséklet határozza meg. A nagyenergiájú sugárzások (gyorsneutronok, nagyenergiájú gamma sugárzás) azonban változtatják a diszlokációs szerkezetet, kiütnek egyes atomokat a helyükről és lokálisan felhevítik az anyagot, ezáltal felgyorsítják a diffúziót és ezen keresztül az öregedést. Ez az öregedési mechanizmus azonban nemcsak a jelenleg üzemelő atomreaktorok problémája, hanem a negyedik generációs reaktorok és a fúziós energetikai berendezések fejlesztésének is alapkérdése, de szerepe van az úrkutatásban és más iparágak esetében is.

Az első reaktorok közönséges szén és alacsony ötvözős acélokból készültek. A legtöbbet lemezekből hajlították és hosszvarratokkal hegesztették össze. Hamar rájöttek azonban, hogy némelyik erősen ridegszik, ami csökkenti a biztonságot. Az 1960-as években az első kutatások nyomán csökkentették az acélok réz és foszfor tartalmát, és a hosszanti varratos lemezek helyett kovácsolt gyűrűkből

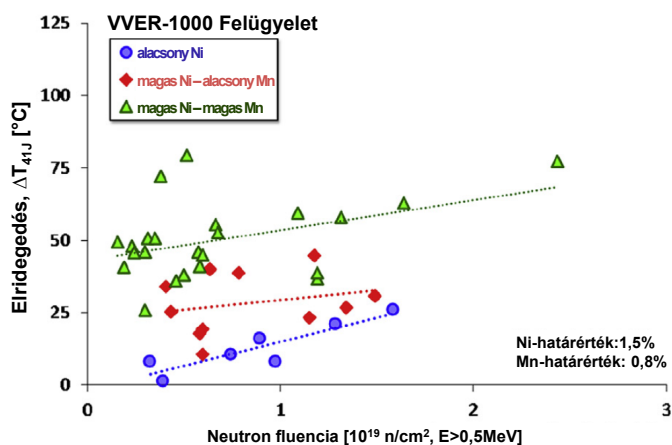
építették fel a reaktortartályokat. 1990-ben a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) elindított egy nagy nemzetközi kutatási programot, amelyben 14 különféle acélt és 6 hegesztési varratot vizsgáltak. A projektet a Japán Atomenergia Bizottság és a japán ipar támogatta, legyártották a szükséges acélokat 1-10 tonnás tételekben. A mintákat 20 országba osztották szét és kutatóreaktorokban besugározták, majd vizsgálták a mechanikai tulajdonságait. A projektben az Atomenergia Kutatóintézet is részt vett és a Budapesti Kutatóreaktorban is történt besugárzás és vizsgálat. A mintegy tíz évig történő kutatómunka legfontosabb megállapítása az volt, hogy 0,08% Cu tartalom felett a neutronsugárzás okozta elridegedés gyorsabb a vártnál [1].

Ezzel párhuzamosan sok sugárkárosodás tárgyú konferenciát rendeztek a NAÜ, az amerikai ASTM és mások szervezésében. Ekkor alakult meg az IGRDM (International Group on Radiation Damage Mechanism) ami a témával foglalkozó kutatások zártkörű platformja, és elkezdte a figyelmet a mechanikai tulajdonságok vizsgálata mellett a mikroszerkezeti kutatások fontosságára is felhívni.

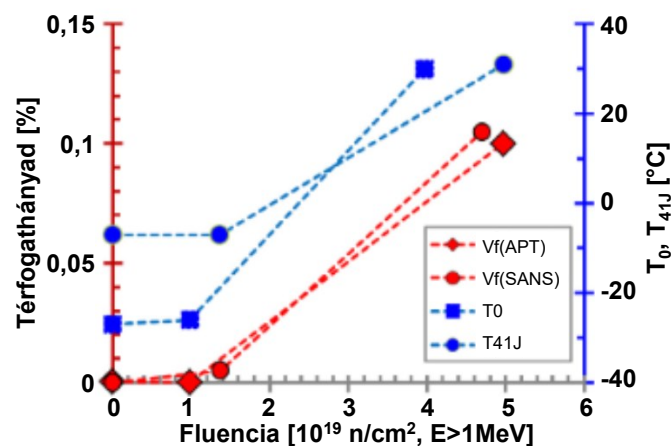
A projekt az USA-ban folytatódott a Heavy Section Steel

programmal, amelyben az amerikai acélok tulajdonságait vizsgálták. 2000 körül a reaktorok ellenőrző programjainak eredményeit elemző szakemberek felfigyeltek arra, hogy a sugárkárosodás trendgörbéje a nagy fluenciáknál nem követi az addig feltételezett telítődési jelet, hanem újra emelkedésnek indul, különösen a korszerűnek tartott alacsony Cu tartalmú acéloknál, illetve eltér a Cu tartalom alapján feltételezett értékektől (lásd 1. és 2. ábra).

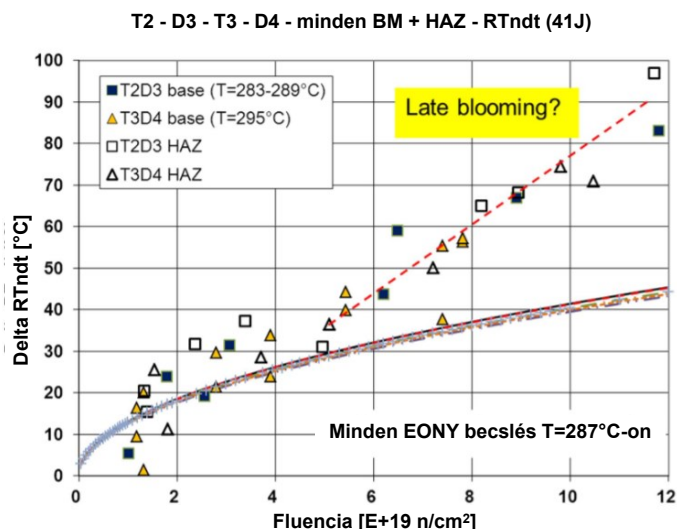
Közben a különböző, elridegedést ellenőrző programok (surveillance) eredményei azt mutatták, hogy a magas nikkel tartalmú acéloknál az elridegedés gyorsabb, mint amit az alkalmazott trendgörbék alapján becsülni lehetett. R. Gerard 2013-ban mutatott be egy érdekes példát alacsony ötvöztetésű acél hőzónájának a feltételezettől eltérő viselkedésére nagy fluenciáknál (lásd 2. ábra). A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség egy technikai dokumentumot adott ki a Ni hatásáról [4]. E. Alstadt és munkatársai [5,6] a kiválások mennyiségét határozták meg sugárkárosodott acélban és úgy találták, hogy a kiválások növekedése egy küszöb fluencia felett gyorsulásba megy



1. ábra: Különböző Ni tartalmú VVER-1000 acél elridegedési trendgörbéje [2]



3. ábra: Neutronbesugárzás által létrehozott SANS (Small Angle Neutron Scattering - kisszögű neutron szórás) és APT (Atom Probe Tomography - atom próba rétegvétel) vizsgálattal mért kiválások térfogata a fluencia függvényében, WMS3NiMo1 anyagban [5]



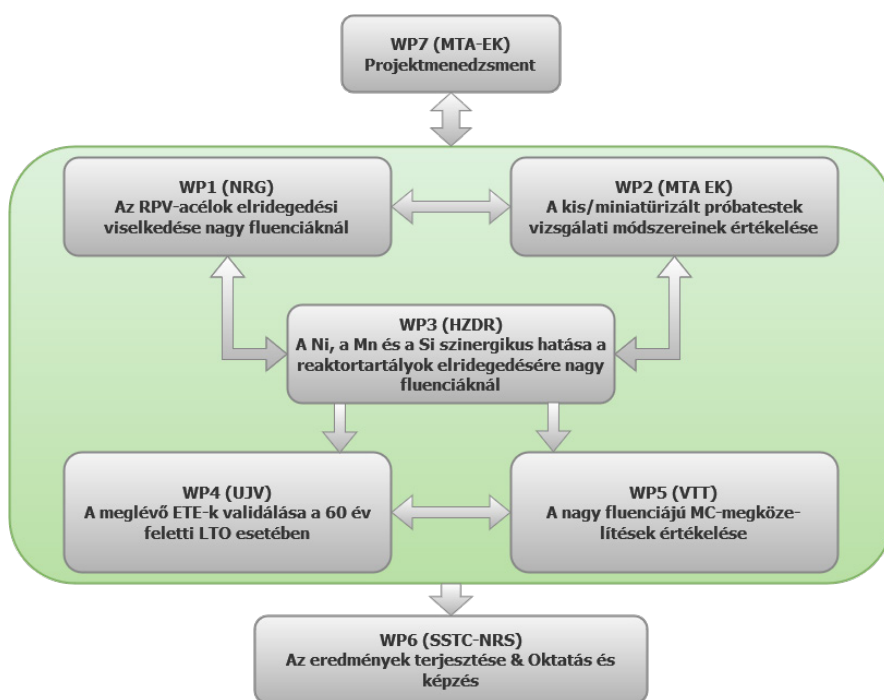
2. ábra: Alacsony ötvöztetésű reaktoracél sugárkárosodása a fluencia függvényében [3]

át (lásd 3. ábra).

Ebből az következett, hogy más elemek is szerepet játszhatnak az elridegedésben. Bob Odette elméleti úton kimutatta a nikkel és a mangán szerepét a sugárkárosodásban. A jelenséget egyre többször említette „late blooming” néven a szakirodalom [7-9].

Az európai LONGLIFE projekt a reaktortartály anyagában a nagy fluensek által kiváltott mikroszerkezeti változásokat vizsgálta (APT, SANS, TEM, AES és PAS) [10, 11].

A jelenség kutatására a petteni JRC intézete és az ott dolgozó vendégkutatók – magyar is volt közöttük – kidolgoztak egy hosszú távú sugárkárosodási programot. A minták besugárzása 2004-ben kezdődött meg a petteni nagyfluxusú kutatóreaktorban és 10 éven át tartott. Ezeknek a mintáknak a vizsgálatára szerveződött meg a STRUMAT-LTO konzorcium, először önkéntes alapon, majd 2019-ben a „Horizont 2020” Európai Unió



4. ábra: A STRUMAT-LTO projekt felépítése [14]

pályázaton nyert támogatást.

3. A STRUMAT-LTO projekt szervezeti felépítése

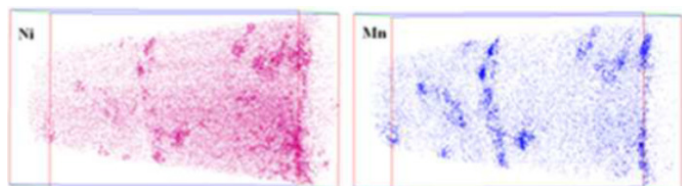
Az Európai Unió Horizont 2020 keretében elfogadott nagy kutatási projektek egyike a STRUMAT-LTO (STRUCTURAL MATERIALS research for safe Long Term Operation of LWR NPPs). A STRUMAT-LTO projektben 17 EU ország és Ukrajna kutatóintézetei vesznek részt, a projekt EU támogatása 5 millió euró, ezt egészíti ki a résztvevők önkéntes hozzájárulásai. A projektet magyar intézet, az Eötvös Loránd Kutatási Hálózathoz tartozó EK-CER vezeti, a holland NRG Intézet a műszaki társvezető.

A projekt 7 feladatkört foglal magába, ahogy ezt a 4. ábra mutatja. Az ábrán zárójelben fel vannak tüntetve a feladatkört vezető intézetek is.

4. A STRUMAT-LTO projekt célkitűzései

A projekt egyik célja a nagy fluenciák hatásának vizsgálata a sugárkárosodásra.

Nagy fluenciák hatása a sugárkárosodásra. A neutronsugárzás okozta öregedésnek három fő összetevője van: a diszlokációs szerkezet (diszlokációk típusa, alakja és sűrűsége) változása, kiválások keletkezése, és egyes elemek (pl. a foszfor) szegregálódása a



5. ábra: Nagy neutron fluenciával besugárzott WWR-440 reaktoracél atompróba vizsgálat eredménye. Jól látszik, hogy a nikkal és a mangán együtt válik ki és képez klasztereket [11]

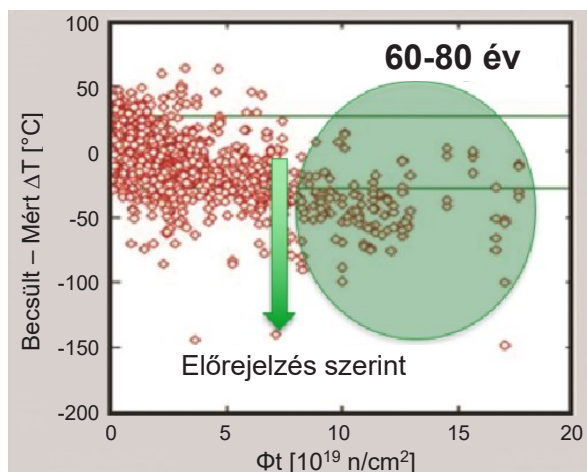
szemcsehatárokon. Az atompróba vizsgálatokkal megnyílt a lehetőség a kiválások összetételének a meghatározására. A LONGLIFE projekt keretében bizonyosságot nyert, hogy réz atomok kiválásával kezdődik a folyamat, erre a magra rakódhatnak rá a további elemek, így stabil klaszterek keletkeznek (5. ábra).

Az alacsony réz tartalmú reaktor acélok (második és harmadik generáció) esetében a szabad réz és foszfor atomok egy bizonyos idő után elfogynak, és ekkor telítésbe kellene menni a kiválásoknak, azaz további, csökkenő sebességű elridegést csak a diszlokációs szerkezet változása okozhatna. Ezzel szemben megfigyelték, hogy $2-3 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ fluencia után az elridegési folyamat felgyorsul. A ma üzemelő reaktorok még ez alatt a határ alatt vannak, vagy kissé fölötté, azaz a jelenség még nem okoz gondot, mert az eltérés kicsi. Azonban jelentős üzemidő hosszabbításnál már számításba kell venni a sugárkárosodás késői gyorsulását

is. A LONGLIFE projektben megtalálták a mikroszerkezeti okot is: Ni-Mn magok válnak ki és ezekre rakódik rá a többi szennyező és ötvöző elem. Szerencsére mind a réz, mind a Ni-Mn klaszterek megkötik a szemcsehatár irányába vándorló foszfor egy részét, jelentősen csökkentve a szemcsehatár menti törés valószínűségét. Az 5. ábra a késői kiválás jelenségének alátámasztására 10^{22} n/cm^2 nagyságrendű ($E > 1 \text{ MeV}$) fluenciával besugárzott 15Kh2MFA acél kiválásait mutatja be. Jól láthatóak a Mn-Ni magok. A projekt egyik fő célkitűzése a késői kiválások hatásának a felmérése. Ehhez különböző Mn és Ni tartalmú modell és ipari ötvözetek kerültek besugárzásra a HFR reaktorban.

A második fő célkitűzés a 60 évet meghaladó erőművi üzemnek megfelelő sugárkárosodás vizsgálata. Az atomreaktorok tartályainak 30-40 évi üzemeléséhez tartozó szerkezeti anyag öregedésére nagyon sok vizsgálat és adat áll rendelkezésre. A 60 évi üzemhez azonban már kevesebb, különösen, ha a sugárkárosodás késői gyorsulása jelentős hatással bír. Feltételezhető, hogy a sugárkárosodás késői gyorsulása nem minden esetben következik be, csak akkor, ha a Ni és a Mn mennyisége egy bizonyos határt meghalad. Ennek a határnak a további tanulmányozása a projekt egyik alapvető célja.

További célkitűzés olyan trendgörbék előállítása, amelyek 60 évet meghaladó üzemeltetés esetén is érvényesek. A trendgörbék olyan összefüggések, amelyek a vegyi összetétel ismeretében leírják a szerkezeti anyagok öregedését a neutronfluencia függvényében. A reaktortervezők és a reaktorfelügyeleti hatóságok ezeket veszik alapul a biztonságos élettartam számításánál és az üzemeltetési élettartamra vonatkozó licenszek kiadásánál. A trendgörbék lehetnek általánosak (egy acélminőségre vonatkozóak), vagy egyetlen adag acélra, egyetlen reaktortartályra érvényesek.



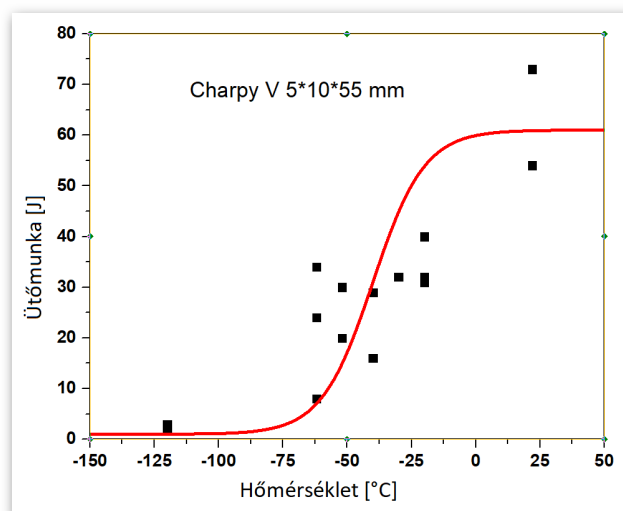
6. ábra: Az időszakos ellenőrző programok során mért adatok összehasonlítása az EONY trendgörbével [12]

A legtöbb trendgörbe felülbecsüli az öregedést a nagy fluenciák tartományában, azaz akadályozza a 60 éven túli üzemeltetést (lásd 6. ábra).

Célkitűzés a Mestergörbe módszer alkalmazhatóságának vizsgálata 60 évi vagy ezt meghaladó üzem esetén is. A törési szívósságot leíró Mestergörbe kifejlesztése a 2000-es évek környékén történt. A Mestergörbe óriási előnye, hogy a törési szívósság mérések relatív kis próbatesteken történhetnek, és az eredmények átszámíthatóak nagyméretű próbatestre vagy vastagfalú tartályokra is. A Mestergörbe alkalmazása a nagy fluenciák (hosszú üzemi élettartam) esetén azonban megkérdőjelezhető a sugárkárosodás fentebb leírt késői gyorsulása miatt. A projekt célja, hogy igazolja a Mestergörbe használatát 60 évi üzem után is, vagy olyan módon fejlessze tovább, hogy megfeleljen a 60 év utáni üzemeltetési biztonsági számításokhoz is.

A projekt negyedik fő célkitűzése a sugárkárosodás kis próbatestes vizsgálatának fejlesztése. A ma üzemelő reaktorokban többnyire Charpy V és szakító próbatestet helyeztek el, amelyek együtt öregedtek a tartályok anyagával, azonban a számuk limitált volt. A legtöbb esetben archív anyagként a hosszú élettartamú üzemeltetéshez csak ezeknek a próbatesteknek a vizsgálatok után megmaradt darabjai állnak rendelkezésre. Ezekből vagy hegesztéses rekonstrukcióval, vagy nagyon kis próbatestek kivágásával és vizsgálatával lehet új eredményekhez jutni. A STRUMAT-LTO projektben két próbatest alkalmazására végzünk fejlesztő munkát: 10x10x4 mm-es CT próbatest és ún. small punch (SP) vizsgálatra. A reaktorból kivett acél próbatestek erős radioaktív sugárzók. Ezért csak megfelelő védelem mögött, távműködtetett eszközökkel lehet a törött Charpy próbatestekből új mini próbatesteket kivágni. Ez számos technikai nehézséggel jár, különösen, ha figyelembe vesszük, hogy a próbatest méret csökkenésével vagy az eredmények szórása nő meg, vagy megmunkálási pontosságot és a megmunkált felületek simaságát kell növelni. Hasonlóan, a mérés is nehezebb, ha a próbatestet csak manipulátorral lehet kezelni. A projekt kis próbatestek gyártásával, mérésével foglalkozó részét szintén az EK-CER vezeti és a problémák megoldásához

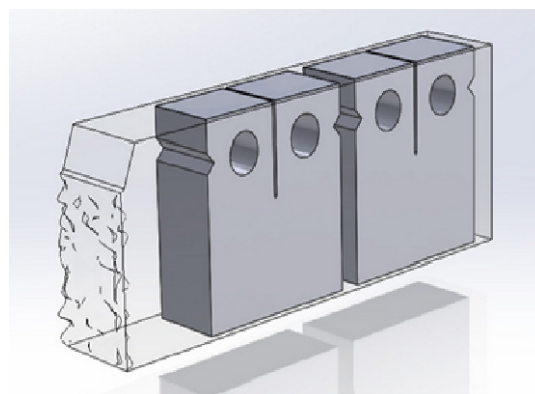
előkészítő és összehasonlító mérésorozatot (ún. Round-Robin vagy körvizsgálatot) indított még besugárzatlan acélon. A vizsgálatban az EK-CER közepes méretű CT és Charpy próbákat gyártott és vizsgált 15Kh2MNFA reaktor



7. ábra: Charpy ütőmunka átmeneti hőmérséklet meghatározása a kispróbatestes Round-Robin program anyagán

acélból. A Charpy mérések eredményei a 7. ábrán láthatóak. A törési szívósság mérése jelenleg folyamatban van. A résztvevők a Charpy próbatestek törött darabjait kapták meg, és ezekből gyártottak/gyártanak mini CT és SP próbatesteket és vizsgálják azokat (lásd 8. ábra). A program befejezése után a tapasztalatokat és eredményeket összehasonlítják egymással és az EK-CER által nagyobb próbatesteken végzett eredményekkel. Az esetleges eltérések okát feltárják, és ezután indul meg a sugárkárosodott STRUMAT-LTO próbatestek maradékainak a feldolgozása kis próbatestekké és vizsgálatuk. A munka megalapozza a kis próbatestek alkalmazását más iparágakban is, ahol kevés az archív anyag a berendezések biztonságának a vizsgálatára.

A projekt során a résztvevők a lényeges eredményeket közzéteszik és nyári iskolákban is ismertetik elősegítve ezzel a szakmabeliek továbbképzését.



8. ábra: Mini CT próbatestek kivágása 5*10*55 mm-es V bemetszésű (fél Charpy) próbatest maradékából



9. ábra: A STRUMAT-LTO projekt fő célkitűzései célkitűzései [14]

A projekt jelenlegi helyzete

A projekt várható eredményeit foglalja össze a 9. ábra. A STRUMAT-LTO projekt jelenleg a futamideje felénél jár, amely során a résztvevő intézetek kidolgozták a munkacsomagokra vonatkozó részletes kísérleti terveket, megtörtént a radioaktív próbatestek kiszállítása Pettenből a résztvevőkhöz, és elindult a vizsgálati program szerinti munka. Az NRG elvégezte és értékelte a besugárzott anyagok szakítóvizsgálatait, számos metallográfiai vizsgálat elkészült, a résztvevő intézetek a minták törésmechanikai vizsgálatait elkezdték. Az első részeredmények már rendelkezésre állnak [13], de még sok vizsgálat van hátra, és csak ezután következhet az eredmények közös értékelése.

További információk a honlapon:

<https://strumat-lto.eu/>

**Gillemot Ferenc^a, Horváth Ákos^a,
Murthy Kolluri^b, Szenthe Ildikó^a,
Móritz Szilvia^a, Hargitai Balázs^a,
Csikós Kristóf Andor^a,
Cinger Dávid^a, Horváth Márta^a**

¹Centre for Energy Research (EK)

²Nuclear Research and Consultancy Group (NRG)

Köszönetnyilvánítás

A projektben közölt kutatás a STRUMAT-LTO projekt keretében valósul meg. Ez a projekt az Euratom 2019-2020-as kutatási és képzési programjától kap támogatást a n° 945272 sz. keretmegállapodás alapján.

Acknowledgments

This project has received funding from the Euratom research and training programme 2019-2020 under grant agreement No 945272. The content of this newsletter reflects only the author's view. The European Commission is not responsible for any use that may be made of the information it contains.

Irodalomjegyzék

- [1] IAEA CRP 3, contract 8251/RB, titled: "Fracture Mechanics Analysis for Coordinated Research Programme on Optimizing of Reactor Pressure Vessel Surveillance Programmes and Their Analyses"
- [2] Kryukov A., Erak D., Debarberis L., Sevini F., Acosta B.: Extended analysis of VVER-1000 surveillance data, Int. J. Press. Vessel. Pip. 79 (2002) 661-664.
- [3] Gerard, R.: Linear embrittlement behaviour of low Cu steels at high fluence. IGRDM-17, Les Embiez, 19-24/5/2013.
- [4] IAEA TECDOC-1441. Effects of Nion irradiation embrittlement of light water reactor pressure vessel steels ISBN 92-0-103305-2, ISSN 1011-4289, Vienna, 2005
- [5] Altstadt, E.: Treatment of long term irradiation embrittlement effects in RPV safety assessment. Final summary report, LONGLIFE D1.9 2014.
- [6] F. Bergner, F. Gillemot, M. Hernandez-Mayoral, M. Serrano, G. Torok, A. Ulbricht and E. Altstadt, "Contributions of Cu-rich clusters, dislocation loops and nanovoids to the irradiation-induced hardening of Cu-bearing low-Ni reactor pressure vessel steels," Journal of Nuclear Materials, vol. 461, pp. 37-44, 2015
- [7] Odette, G. R., Radiation induced microstructural evolution in reactor pressure vessel steels in I.M. Robertson, L.E. Rehn, S.J. Zinkle, W.J. Phythian (Eds.), Materials Research Society Symposium Proceedings, Boston, MRS, 1995, pp. 137-148.
- [8] Odette, G. R. and Lucas, G.: Embrittlement of Nuclear Reactor Pressure Vessels. JOM, vol. 7, no. 53, pp. 18-22, 2001.
- [9] Eason, E. D., Odette, G. R., Nanstad, R. K. and T. A. Yamamoto, "Physically based correlation of irradiation-induced transition temperature shifts for RPV steels. ORNL/TM2006/530; ORNL; 2006
- [10] Hein, H.: Position paper on RPV irradiation embrittlement issues based on the outcome of the EURATOM FP7 project LONGLIFE. 23rd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Manchester, United Kingdom, 2015
- [11] Treatment of long term irradiation embrittlement effects in RPV safety assessment. GAN:249360. Final report on neutron radiation induced microstructure of RPV materials for long term operation
- [12] Server, W. L., Hardin, T. C., Hall, J. B. and Nanstad, R. K.: "U.S. High Fluence Power Reactor Surveillance Data—Past and Future," J. Pressure Vessel Technol., vol. 2, no. 136, p. 021603, 2014.
- [13] Laot, M., Naziris, K., Bakker, T., D'Agata, E., Martin, O. and Kolluri, M.: Effectiveness of Thermal Annealing in Recovery of Tensile Properties of Compositionally Tailored PWR Model Steels Irradiated in LYRA-10. Metals 2022, 12, 904. <https://doi.org/10.3390/met12060904>.
- [14] STRUMAT research for safe Long Term Operation of LWR NPPs (STRUMAT) H2020 project, <https://strumat-lto.eu/>

FRACTESUS projekt: Fracture mechanics testing of irradiated RPV steels by means of sub-sized specimens

Besugárzott RPV acélok törésmechanikai vizsgálata kisméretű próbatestek segítségével

A FRACTESUS projekt az EURATOM 2019-2020 keretprogram NFRP-04 Innovation for Generation II and III reactors felhívásában nyert támogatást a 2020 évben. A projekt a H2020 átfogó program keretébe illeszkedik, amelynek célja a nukleáris biztonság, a védelem és a sugárvédelem folyamatos javítása, különös tekintettel az energetikai rendszer hosszú távú szén-dioxid-mentesítésének hatékonyságára és biztonságos módon történő elősegítésére.

1. A jelenlegi európai helyzet

Az Európában működő atomerőművek többsége üzemidejének második szakaszában van, és meg kell felelnie a nukleáris biztonságról szóló irányelvben meghatározott fokozott biztonságnak. Az atomerőművek öregedéskezeléséről szóló legtöbb kézikönyvben a reaktortartály (RPV) öregedése az első helyen szerepel a biztonsági problémák listáján, mivel [1]

- az RPV az elsődleges gát a radioaktív anyagok környezetbe jutása ellen,
- a tartály tervezésből adódó meghibásodása normál és baleseti forgatókönyv esetén kizárt,
- nem helyettesíthető/cserélhető,

azonban a termikus öregedés és a sugárzás hatására a keményedés és a szívósság romlása következhet be.

Az európai nukleáris program kezdetétől fogva felismerték az RPV-k degradációját. Ezért felügyeleti programokat vezettek be a ridegedés nyomon követésére. Ehhez jellemzően reprezentatív anyagokból készült, Charpy-méretű ($10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$) próbatesteket használtak, amelyeket reprezentatív körülmények között, felügyeleti kapszulákban kellett besugározni. Bár a Charpy-mintával nem lehet közvetlenül mérni a törési szívósságot, eredetileg ezt a mintát választották a gyakorlati helykorlátok és a törésmechanikai szakértelem miatt az 1960-as években. Ezek a felügyeleti kapszulák mára gyakorlatilag kimerültek, sok reaktorban nem áll rendelkezésre több felügyeleti anyag a reaktorba töltve, nincs elegendő archív anyag a felügyeleti programok meghosszabbításához, és így nincs lehetőség a hosszú távú működés előrejelzésére.

A továbbfejlesztett kiértékelési és roncsolásmentes technikáknak köszönhetően azonosították a helyi anyagheterogenitást és a kisebb hibákat a nagyméretű kovácsdarakban, például a reaktorfedélben, a reaktortartályban, a gőzfejlesztőben vagy a nyomáskiegyenlítőben. Ez a kérdés komoly aggodalomra ad okot az üzemeltetők és a szabályozó szervek körében, amelynek nem megfelelő kezelése a meglévő atomerőművek nagyon hosszú leállásához vagy az atomerőművek építésének komoly késedelméhez vezet [2,3]. A helyi anyagtulajdonságok kérdésének megoldásához elengedhetetlen az elfogadott kis méretű minták használata [4,5].

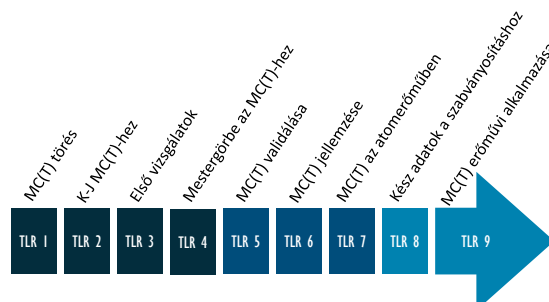
2. A projekt célja

E kérdések és aggályok megválaszolására a projekt egy innovatív megközelítést javasol, amely kisméretű próbatesteket használ a törési szívósság közvetlen mérésére. A referencia kisméretű próbatest a miniatűr CT (compact tensile) (MCT) próbatest ($10 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$), amely lehetővé teszi, hogy egyetlen törött Charpy próbatestből akár nyolc próbatestet is kimunkáljanak. Ez a megközelítés a biztonsági szint drasztikus növelését célozza:

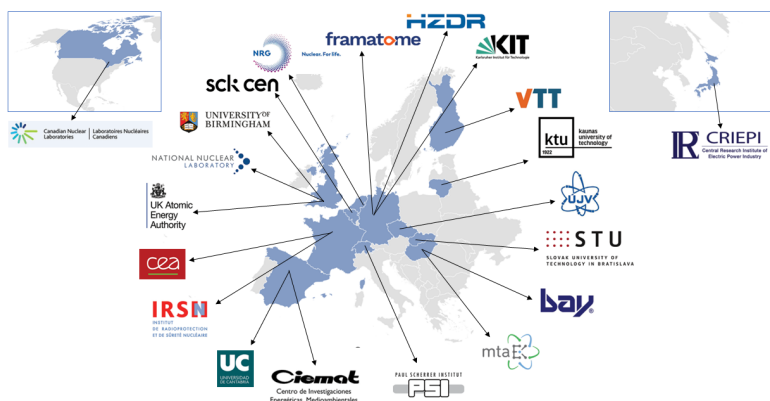
- a törési szívósság közvetlen értékelése a Charpy-méréseken alapuló félig empirikus megközelítés helyett;
- drámaian megnöveli a felügyeleti adatbázist, lehetővé téve az adatok nagyobb megbízhatóságát;
- a helyi anyagtulajdonságok jellemzése anyaginhomogenitások esetén.

Ez az innovatív megközelítés a szén-dioxid-mentesítésnek, az energiaellátás biztonságának és az európai atomenergia versenyképességének növelése követelményeknek is megfelel a költséghatékony hosszú távú üzemeltetés révén. Az atomerőművek hosszú távú működése akkor válik lehetővé, ha azt kiterjesztett felügyeleti programokkal lehet támogatni.

A projekt során a törött Charpy-próbatestek anyagát az reaktortartály ridegségének vizsgálatára fogják használni miniatűr CT próbatestek segítségével. Ez a projekt a III+ generációs és a jövőbeli nukleáris rendszerek számára is előnyös lesz. A jövőbeli nukleáris rendszerek, különösen a IV. generációs és a fúziós rendszerek szerkezeti anyagainak meg kell birkóznuk a nagyfokú sugárzási körülményekkel. A minősítési programok jelentős korlátot jelentenek az új anyagok és technológiák bevezetésében. Az ilyen minősítési programokat speciális besugárzó berendezésekben kell végrehajtani, és teljes mértékben reprezentatívnak kell lenniük a meghatározott működési feltételek szempontjából. Az ilyen eszközökben a besugárzási tér általában korlátozott, így a minősítési programok is nagymértékben profitálhatnak ebből a projektből.



1. ábra: A projekt technológiai készültségi szintjei [6]



2. ábra: FRANCESUS Projekt partnerek [6]

Egy projekt technológiai készültségi szintjei (Technology Readiness Levels - TRL) kilenc szint szerint osztályozhatók az 1. ábra alapján. A kisméretű minták törési szívósságának vizsgálata már elérte az 1-4. szintet, ahol a miniatűr CT (MCT) próbatetekről kimutatták, hogy a vizsgálati hőmérséklettől függően rideg és képlékeny üzemmódban törnek. A projekt lényege, hogy a technológiát a TRL5-től a validálásig, majd az iparilag releváns környezetben történő demonstrációtól a TRL7-ig, azaz a tényleges atomerőművekből származó, ténylegesen besugárzott reaktortartályon történő demonstrációig vigye. Ez a projekt a TRL8-ra való áttérés előkészítéseként a szabályozók és a kódoló testületek számára egy átfogó fájlt fog létrehozni, amely megkönnyíti a felügyeleti programok végrehajtásának módjában szükséges lépésváltást, és lehetővé teszi az MCT próbatetek használatát az atomerőművek üzemeltetői számára.

A projekt 2020 októberében indult és a 2024 szeptember 30-án zárul. A projektben számos európai intézet-labor mellett (2. ábra) részt vesz a Kanadai Nukleáris Laboratóriumok (CNL), valamint a Japán Központi Villamosenergia-ipari Kutatóintézet (CRIEPI) is.

3. A projekt módszertana

A projekt strukturálása érdekében a munkát munkacsomagokra bontják. A projekt módszertana a 3. ábrán látható munkacsomag-szerkezetet követi.

A projekt értékes eredményeinek biztosítása érdekében a tervek szerint folyamatos erőfeszítéseket kell tenni az érdekelt felek aggodalmainak kezelésére a szabályozó szervek, a szabályzat- és szabványosítási bizottságok, a végfelhasználói csoport (EUG) és a tudományos tanácsadó bizottság (SAC) rendszeres bevonásával, mely feladatot a WP1 munkacsoport látja el.

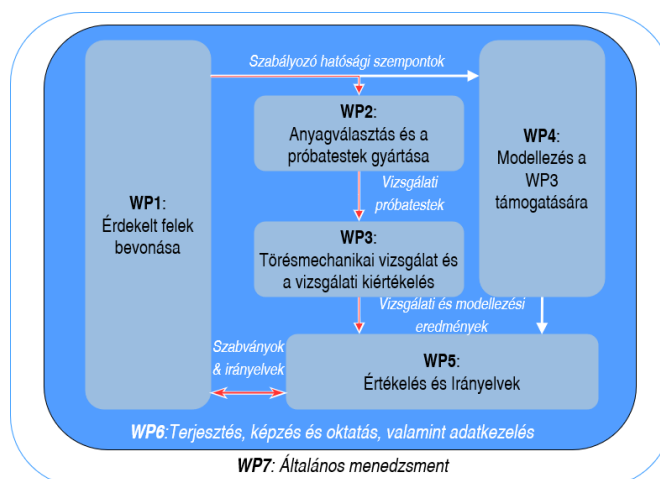
Az anyagválasztás és a vizsgálati mátrix fejlesztése során (WP2) az anyagot gondosan, a meghatározott kritériumok alapján választják ki az anyagra vonatkozó prioritások figyelembevételével (jól jellemzett, nyílt adatok állnak rendelkezésre, besugározható, elérhető).

A besugárzott anyag megmunkálását és vizsgálatát (WP2-3) a költségek megosztása, valamint az ismételhetőség és reprodukálhatóság értékelése érdekében különböző

laboratóriumok közösen végzik.

Modellezéseket (WP4) hajtanak végre az anyagvizsgálatok támogatására. A modellezés azért is olyan fontos, hogy figyelembe vegyünk és foglalkozunk a szabványok és kódok jelenlegi korlátaival a kisméretű próbatetek vonatkozásában.

A 3. ábrán a projekt kritikus útvonala piros színnel van jelölve. Az 1. munkacsoportban a SAC, az EUG, a szabványosítási bizottság, valamint a nukleáris szabályozó szervek üzemeltetőivel és a kutatószervezetekkel folytatott megbeszélések eredményeképpen az érintett felek nyitott aggályait értelmezik. Ezeket a szempontokat beépítik a 2., 3. és 4. munkacsoport tevékenységeibe. A WP2 (anyagválasztás és próbatetek gyártása) a WP3 (törésmechanikai vizsgálatok) inputjaként szükséges. A 3. és 4. munkacsoport eredményeit az 5. munkacsoport használja fel, ahol a jövőbeli tesztesre vonatkozó iránymutatásokat határozzák meg. Ezeket az iránymutatásokat a szabványosítási bizottsággal (WP1) szoros együttműködésben optimalizálják.



3. ábra: FRANCESUS projekt felépítése [6]

4. A BZN szerepvállalása a projektben

A Bay Zoltán Közhasznú Nonprofit Kft. (BZN) két osztálya – az Anyagvizsgáló Osztály (AVO) és a Szerkezetintegritás és Gyártástechnológia Osztály (SZI) – is részt vesz a projektben. Az AVO a WP2 és WP3 munkacsomagokban működik közre, többek között az anyagválasztás, a próbatetek kimunkálása és a tervezett vizsgálatok végrehajtásában, valamint SZI-vel közösen a vizsgálatok támogatásában és kiértékelésében. Feladatuk közé tartozik a besugárzott anyagok vizsgálata különböző próbatetekben.

Az SZI szimulációs tevékenységekkel járul hozzá a projekthez, a vizsgálatok támogatása és kiértékelése mellett, a WP3-4 feladatrészekben. A WP4-en belül szimulációs technikát fejlesztenek ki egy körvizsgálaton belül a partnerekkel, melyet a további feladatokban alkalmazni fognak. A BZN a WP4 valamennyi feladatában részt vesz:

- WP4.1.1 „Numerikus körvizsgálat” feladatrészben a körvizsgálat alapvető feladatai mellett vizsgálja a J-integrál

- számítását szimulációs környezetben, mely összehasonlíttatásra kerül a ASTM E1921-20 szabvány [7] számításaival.
- WP4.1.2.b „Feszültségmező számítása vizsgálati adatokkal” feladatrészen, amely a vizsgálatok elvégzését követően a numerikus körvizsgálat mintájára, a szimulációk elvégzését tartalmazza.
 - WP4.1.3 „Ridegtörés” alfeladatban, amely során Beremin modell segítségével szimulálják a T_0 referencia hőmérséklet körül elvégzett vizsgálatokat.
 - WP4.1.4 „Repedésnövekedés” alfeladatban, ahol a partnerek különböző repedésterjedési modellek alapján modellezik a valós vizsgálatokat. Az SZI ebben a feladatrészen Gurson-Tvergaard-Needleman modell (GTN) alapján paramétereket határoz meg mesterséges neurális hálózatok (ANN) segítségével a károsodás leírására, valamint virtuális repedészárási technika (virtual crack closure technique – VCCT) kohéziós zóna modell (cohesive zone modell – CZM) alapján is kidolgoz egy szimulációs módszert.
 - WP4.2 „Kisméretű próbatetek vizsgálati technikái” alfeladatban végelem modellt fejleszt small punch (SPT) vizsgálat-hoz, valamint keménységméréshez. E feladatrészen is a GTN-féle károsodási paramétereket határoz meg ANN módszerrel, valamint érzékenységvizsgálatokat készít a vizsgálati és szimulációs hatások figyelembe vételére.

5. A projekt jelenlegi állása, eredményei

A projekt az időtartama felénél tart. Az eddigi feladatok során lezárásra került a WP1 munkacsomag, amely során összefoglalásra került a világszerte alkalmazott törési szívósság szabványok, valamint a nukleáris szabályozó szervek, az üzemeltetők és a kutatószervezetek állásfoglalásai és aggályai.

A WP2 munkacsomag hamarosan zárul; a vizsgálati mátrix elkészült. Sikeresen lezajlottak a besugárzatlan anyagok próbatetek kimunkálásai, valamint 2023 első negyedében a besugárzott próbatetek is elkészülnek.

A WP3 munkacsomag bizonyos részei már lezárultak, amely során számos besugárzatlan MCT próbatetek törési szívósság (FT) vizsgálatát végezték el. Bebizonyosodott, hogy a miniatürizált próbatetek alkalmazhatóak a T_0 referencia hőmérséklet meghatározására. A besugárzott darabok vizsgálata, valamint az egyéb kiegészítő vizsgálatok (small punch, keménységmérés, fraktográfia) jelenleg is zajlik.

A WP4 munkacsomag szintén folyamatban van. Egy numerikus körvizsgálattal indult, hogy biztosítani lehessen a későbbi számítások egyértelmű összehasonlíthatóságát az adatok további, utólagos feldolgozása nélkül. E körvizsgálat során megállapították, hogy a végelem megoldók (kódok) készen állnak a további szimulációkra. A WP4 további feladatai a vizsgálatok támogatására és a szabványi számítások szimulációval történő kiegészítésére vonatkozik a 4. fejezetben részletezett alfeladatokkal.

A WP5 során számos lehetséges projektet azonosítottak a tapasztalatok és eredmények cseréje érdekében, melyek a következők: STRUMAT-LTO [8], DELISA-LTO [9] és egy német nemzeti projekt, a "Kleinproben". Ezen felül

a kísérleti eredmények a projekt végén nyílt hozzáférésűvé válnak.

A WP6 feladatai során a projektet elérhetővé tette a fő közösségi médiákban: [Twitter](#), [LinkedIn](#), [Facebook](#) és [ResearchGate](#). Ez a munkacsomag kezeli továbbá a munkafolyamatok során keletkezett projektmenedzselési, valamint képzési és oktatási tevékenységeket.

További információk a honlapon:

<https://fractesus-h2020.eu/>

Erdei Réka, Bézi Zoltán

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

Köszönetnyilvánítás

A projektet az Euratom 2020-2024 közötti időszakra szóló kutatási és képzési programja támogatta a 900014. számú támogatási megállapodás (H2020 FRACTESUS) keretében. Az itt kifejtett nézetek és vélemények nem feltétlenül tükrözik az Európai Bizottság véleményét.

Acknowledgments

This project has received funding from the Euratom research and training programme 2020-2024 under grant agreement N° 900014 (H2020 FRACTESUS). The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the European Commission.

Irodalomjegyzék

- [1] Aging and Life Extension of Major Light Water Reactor Components 1st Edition V.N. Shah P.E. MacDonald (1993).
- [2] ASN press release L'ASN présente sa position sur l'anomalie de la cuve du réacteur EPR de Flamanville L'ASN présente sa position sur l'anomalie de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.
- [3] ASN press release Anomalie de la concentration en carbone de l'acier: après contrôle, l'ASN a autorisé les réacteurs concernés à redémarrer 13/03/2017.
- [4] www.ensi.ch. Assessment of the safety case for the reactor pressure vessel of the Beznau unit 1 nuclear power plant (2018).
- [5] R. Gérard et al., Materials properties of reactor pressure vessel shells affected by hydrogen flaking, PVP2016-63901 (2016).
- [6] FRACTESUS honlap: <https://fractesus-h2020.eu/> (letöltés dátuma: 2023.12.10.)
- [7] ASTM E1921-20 szabvány: Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range, ASTM International, Subcommittee E08.07, 2020
- [8] STRUMAT-LTO "STRUctural MATerials research for safe Long Term Operation of LWR NPPs" H2020 Grant agreement ID: 945272, 2020-2024.
- [9] 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 1.1 Grant agreement ID: 101061201

ENTENTE projekt: European database for multiscale modelling of radiation damage

Sugárkárosodás multiscale modellezésére irányuló európai adatbázis

Az ENTENTE projekt az EURATOM 2019-2020-as keretprogram NFRP-01 Ageing phenomena of components and structures and Operational Issues felhívásában nyert támogatást 2020 évében. A projekt futamideje 4 év, mely 12 ország 27 partnerének közreműködésével 2020. szeptember és 2024 augusztus között valósul meg. A konzorcium tagjai között megtalálhatók a nukleáris szféra vezető ipari szereplői, kutató intézetei, kis- és közép vállalatai és műszaki támogató szervezetei. Magyar részről egyedülként a Bay Zoltán Nonprofit Kft. Szerkezetintegritás és Gyártástechnológia Osztálya (BZN) vesz részt benne.

Előzmény

Az atomerőmű élete során különböző projektek által nagy mennyiségű adatgyűjtés történik a reaktortartály, belső szerkezetek és primerköri berendezések, valamint csővezetékek továbbá a gőzfejlesztő köpeny és csomópontok anyagai mechanikai tulajdonságainak vonatkozásában. A vizsgálatok széles hőmérsékleti és besugárzási tartományok között (Charpy tesztek, törési szívósság mérésektől a szakítóvizsgálatokig, majd a keménységmérésekig) zajlottak, esetenként vizsgálva a környezeti, korróziós hatásokat is.

Ezen túl a felügyeleti programok eredményei különféle adatbázisokban kerültek összeállításra. Ámbar míg a mechanikai tulajdonságokra vonatkozó adatok többé-kevésbé strukturált módon kerülnek összegyűjtésre, addig a mikroszerkezeti adatok megfelelő gyűjteménye, amelyek kulcsfontosságúak az öregedési folyamatok mélyebb szinten történő elemzéséhez, és kapcsolatuk vizsgálata a megfelelő mechanikai tulajdonságok változásával, szinte teljesen hiányzik.

Az innovatív, mesterséges intelligenciára épülő technológia alkalmazásával az adatok teljes skáláját felölelve, lehetővé tehető az érintett öregedési jelenségekhez köthető ismeretek bővítése az atomerőművek biztonságának javítása és a hosszú távú biztonságos üzemelés (LTO) biztosítása érdekében.

A projekt fókuszterületei

A sugárzás okozta károsodások többléptékű - multiscale modellezésére irányuló európai adatbázis (ENTENTE) projekt átfogó célja, hogy a múltbéli projektek és a határon átnyúló szakértői csoportok felhasználásával összekapcsolja a reaktortartály (RPV) acélok elridegedésével kapcsolatos modellezési és kísérleti tudás- és adatbázist és már meglévő eredményeket, és hogy a vonatkozó öregedési jelenségekkel kapcsolatos kiterjedt ismeretek tekintetében "entente-szövetségre" jussanak. Ily módon az ENTENTE hozzájárul az atomerőművek biztonságának javításához azáltal, hogy lehetővé teszi kvantitatív



Euratom 2019-2020 Grant agreement No 900018

előrejelző és/vagy javítómódszerek, operatív gyakorlatok kifejlesztését a hosszú távú biztonságos üzemeltetés támogatásának biztosítása érdekében, nemcsak a meglévő nukleáris flotta, hanem az új könnyűvízes reaktorok (III/III+ generáció) esetében is. A cél innovatív adatkezelési eszközök kifejlesztése a többléptékű modellezési programok eredményeihez való hozzáférés és azok felhasználásának maximalizálása érdekében.

A projekt átfogó célja és felépítése

A többléptékű-multiscale modellezési megközelítés olyan fizikai modellek kidolgozásán alapul, amelyek leírják a különböző érintett tér- és időskálán a sugárzás okozta hatásokat, a számítógépes szimulációs technikák alkalmazását célzott kísérletekkel kombinálva. A SOTERIA Platform integrálta a PERFECT [1], PERFORM60 [2] és SOTERIA [3] már lezárt Európai Unió által támogatott projektek összes modellezési fejlesztését. A modellező eszközök fejlesztése érdekében a fent említett projektek nagy mennyiségű adatot állítottak elő az RPV acélok és a releváns modellötvezetek mechanikai tulajdonságainak (Charpy tesztek, törési szívósság mérésektől a szakítóvizsgálatokig és keménységmérésekig) széles skálájából sokféle besugárzási körülmény mellett, valamint – gyakran ugyanazon acélokon – kiterjedt mikroszerkezeti karakterizációs program végrehajtása, egymást kiegészítő technikák kombinációival valósult meg. Ezek az adatok felbecsülhetetlen értékűek, s az ENTENTE a FAIR (Findability, Accessibility, Interoperability, Reusability – Megtalálhatóság, Hozzáférhetőség, Interoperabilitás, Újrafelhasználhatóság) elveknek megfelelően összegyűjti és tárolja a reaktor nyomástartó edényeinek céljaira vonatkozó, rendkívül fontos adatokat. A projekt három, egymással összefüggő blokkból áll:

- Egyedülálló kísérleti/modellező adatbázis tervezése és karbantartása a modellek validálásához és kalibrálásához

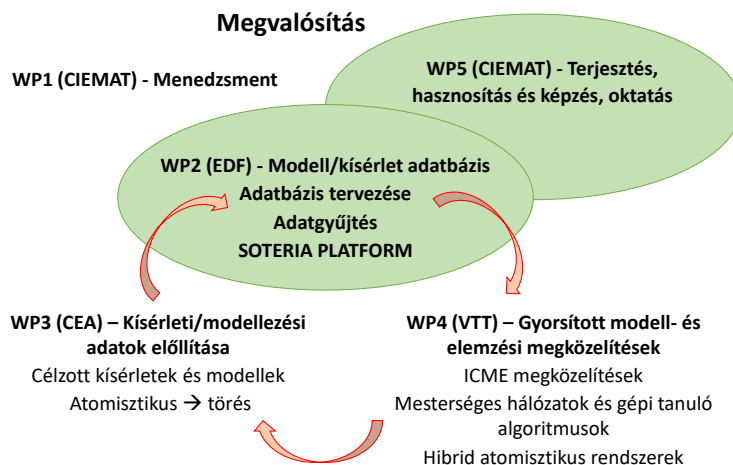
Végső cél egy olyan egyedülálló adatbázis létrehozása, amelyben a teljes mikroszerkezeti jellemzők a mechanikai tulajdonságokkal és modellezési adatokkal – beleértve az anyagok származására vonatkozó információkat is – összekapcsolásra kerülnek, és amely a projekt során a modellfejlesztés és modellfinomítás tekintetében hasznosítható, valamint a reaktortartály acélok elridegedésének mechanikai megértését is nagymértékben támogatja.

- Korábbi adatok összegyűjtése és az adatbázis gazdagítása mikroszerkezeti és a neutronbesugárzásnak kitett reaktortartályok anyagaira vonatkozó mechanikai adatokkal a hiányosságok pótlása érdekében. Az ENTENTE és a korábbi projektek keretében előállított összes adat FAIR elvek szerinti gyűjtése és tárolása lehetővé teszi azok szisztematizált és rendszerszintű felhasználását a reaktortartály acélok állapotértékelésének további javítására a meglévő modellek fokozatos és iteratív validálása és kalibrálása révén. Az adatgyűjtés formátumáról és minőségéről a már felállított szakértői bizottság segítségével és az adatminőségi tervek végrehajtásával gondoskodnak a projekt futamideje alatt. Az ENTENTE keretében végzett új kísérleti és modellezési tevékenységek az adatbázis hiányosságainak pótlására, valamint a kémiai/szerkezeti heterogenitások (kezdeti mikroszerkezet és/vagy a sugárkárosodás eloszlása) mechanikai és törési viselkedésre gyakorolt lehetséges szerepének feltárására összpontosítanak, beleértve a szemcsehatárok és helyi szerkezetük szerepének mélyreható értékelését az elridegségre vonatkozóan.

- Fejlett modellek fejlesztése adatelemzés/adatbányászat és korábbi ismeretek alapján. Ezek az integrált adatok példátlan lehetőséget jelentenek a fizika alapú modellfejlesztés számára a hagyományos kalibrálási és validálási felhasználáson túl: a modellfejlesztés jelenleg paradigmaváltást tapasztal a tudásorientált megközelítésről az adatvezérelt megközelítésre. A projekt egyik célja ezért egy általános módszertan felállítása és a legjobb gyakorlatok meghatározása a prediktív modellek ilyen összefüggésben történő kidolgozásához.

Ez több szempontot foglal magában: az egyes adatok hibájának vagy szórásának értékelése, és annak következményeinek elemzése a modell előrejelzésére a bizonytalanságok számszerűsítése és terjedése révén, a kísérleti és modellezési adatokban további vizsgálatokat igénylő kiugró értékek azonosítása, a modell bemeneti paraméterek változására való érzékenységeinek ellenőrzése, metamodellek használata az előrejelzés felgyorsítására (a metamodell hibájának értékelése és a végső eredményekre való átvitelének vizsgálata), valamint az adatok közötti rejtett kapcsolatok vagy korrelációk feltárása, amelyek további kísérletekhez és ezzel párhuzamosan modellezési erőfeszítésekhez vezethetnek. A levont tanulságokat egy általános módszertanba foglalják össze. Különböző gépi tanuló algoritmusok kifejlesztése és tesztelése a reaktortartály acél neutron besugárzás hatására bekövetkező tulajdonságváltozásainak (mikroszerkezet, keményedés és ridegség) elemzésére vonatkozóan. A rendelkezésre álló digitális adatok alapján részletes képfeldolgozás neurális hálózatok segítségével a mikroszerkezetek típusának és mennyiségének felismerése és meghatározása, a szemcse méret kiszámítása, a karbid eloszlás, továbbá

a repedéskezdemények vagy üregképződmények lehetséges helyeinek azonosítása érdekében.



1. ábra: Az ENTENTE projekt WP1 – WP5 munkacsomagjai (zárójelben a munkacsomag vezetői) [4]

Az ENTENTE projekt 5 munkacsomagot ölel fel, melyeket összefoglalóan az 1. ábra szemléltet. A WP1 és a WP5 munkacsomagok a projekt teljes időtartama alatt együtt futnak, s ezek a projektmenedzsment tevékenységekkel (WP1) és terjesztési, kommunikációs-hasznosítási, továbbá képzés, oktatási tevékenységekkel (WP5) foglalkoznak. A három központi szakmai munkacsoport a műszaki és tudományos tevékenységekre fókuszál. A WP2-ben meghatározott ENTENTE adatbázis az ENTENTE projekt szerves, strukturális jellemzője. Míg a WP3-ban generált adatok ezen adatbázisba kerülnek, a WP4-en belül kifejlesztett különféle eszközöket alkalmazzák az adatbázisban az adatformátum vagy a gépi tanulási eszközök meghatározásához. Az adatkezelés és az adatbázis potenciális végfelhasználók általi értékelése a WP5 keretein belül történik.

A BZN szerepvállalása a projektben

A Bay Zoltán Nonprofit Kft. (BZN) részéről a projektben a miskolci telephelyen működő Szerkezetintegritás és Gyártástechnológia Osztály vesz részt a WP4 Gyorsított modellezési és elemzési megközelítések munkacsomag T4.2 Gépi tanulás az RPV LTO modellezéséhez alfeladathoz kapcsolódóan, mely során különböző gépi tanuló algoritmusok fejlesztésére és tesztelésére fókuszál a tartályacélok neutron besugárzás hatására bekövetkező tulajdonságváltozásainak (mikroszerkezet, keményedés és ridegség) előrejelzésére vonatkozóan. Az alfeladat a vállalt feladatokat tekintve induló fázisban van, így a BZN az alábbi tevékenységek támogatására és végrehajtására fókuszál:

- Metaadatok gazdagítása gépi tanulással.
- Anyagtulajdonságok meghatározása, paraméterek a károsodási mechanizmusok (képlékeny- és szívsós törés, korrózió) értékeléséhez, adatbányászat adatbázison.

- Modellfejlesztés a digitális adatok (SEM – pásztázó elektronmikroszkóp, TEM – transzmissziós elektronmikroszkóp stb.) és a környezeti feltételek paramétereirei közötti kapcsolat leírására gépi tanulás és számítógépes látás algoritmusok segítségével.

A projekthez való hozzájárulásának koncepciója és a rendelkezésre álló digitális adatok alapján (a WP2 Modell/kísérleti adatbázis munkacsomag adatbázisában) a tervek szerint részletes képfeldolgozás végezhető neurális hálózatok segítségével annak érdekében, hogy felismerhető és meghatározható legyen a mikrostruktúrák típusa és mennyisége, megvalósítható legyen a szemcseméret, karbidok és egyéb kiválások meghatározása, továbbá azonosításra kerüljön a repedéskezdeményezés vagy az üregek kialakulásának lehetséges helyei. Ezen eredmények a WP2 Modell/kísérleti adatbázis munkacsomag számára is nagymértékben hasznosíthatóak, mivel a SEM képekből történő információ kinyerése nagy érdeklődésre tart számot, midőn a konvolúciós és neurális hálózatok használata sikeres történet mind a képelemzés, mind a képfeldolgozás területén.

További információk a honlapon:

<http://rdgroups.ciemat.es/web/materiales/entente-en>

Dudra Judit, Szávai Szabolcs

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

Köszönetnyilvánítás

Aszerzők köszönetet mondanak az Európai Bizottságnak a tanulmány részleges/teljes pénzügyi támogatásáért az Euratom 2019-2020-as kutatási és képzési programja keretében a 900018-as számú támogatási megállapodás keretében (ENTENTE projekt).

Acknowledgments

The authors thank the European Commission for partial/total financial support of this study in the frame of the Euratom research and training programme 2019-2020 under grant agreement N° 900018 (ENTENTE project).

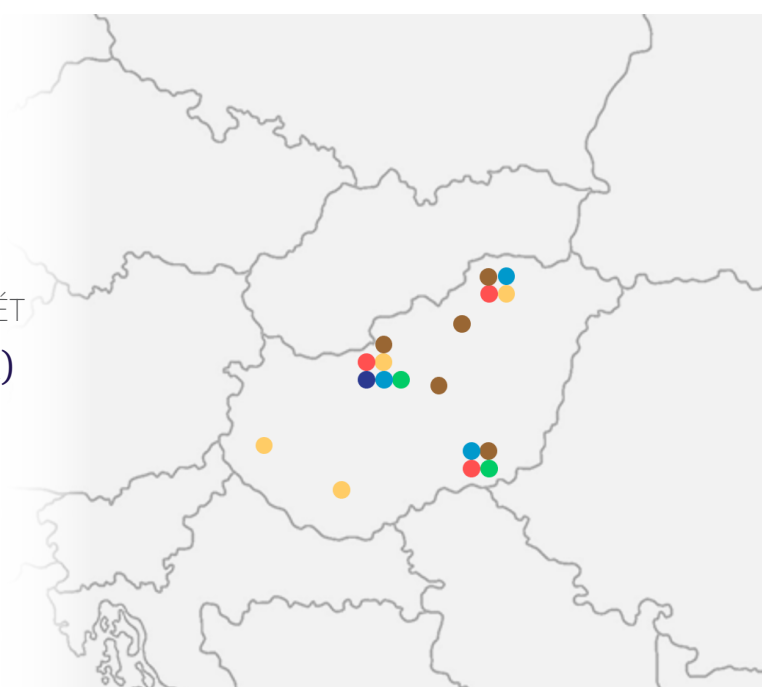
Irodalomjegyzék

- [1] PERFECT "Prediction of Irradiation Damage Effects on Reactor Components" FP6 Grant agreement no.: F160-CT-2003-5088-40, 2004-2007.
- [2] PERFORM 60 "Prediction of the Effects of Radiation For reactor pressure vessel and in-core Materials using multi-scale modelling – 60 years foreseen plant lifetime; FP7 Grant agreement no.: 232612, 2009-2013.
- [3] SOTERIA "Safe long term operation of light water reactors based on improved understanding of radiation effects in nuclear structural materials" H2020 Grant agreement no.: 661913, 2015-2019.
- [4] European Database for Multiscale Modelling of Radiation Damage (ENTENTE) H2020 project, FAIRification put into practice, Conference presentation, October 13, 2021.

Divíziók, főbb szervezeti egységek



- **Biotechnológiai Divízió (BAY-BIO)**
- SZEGED, BUDAPEST
- **Mérnöki Divízió (BAY-ENG)**
- MISKOLC, BUDAPEST, PÉCS, ZALAEGERSZEG
- **Gyártási Divízió (BAY-PROD)**
- MISKOLC, BUDAPEST, EGER, SZEGED, KECSKEMÉT
- **Tudásmenedzsment Központ (BAY-TMK)**
- BUDAPEST, SZEGED, MISKOLC
- **Tématerületi Igazgatóság (BAY-TIG) és Üzletfejlesztés**
- BUDAPEST
- **Innovációs Park (BAY-INNO)**
- BUDAPEST



APAL projekt: Advanced PTS Analysis for LTO

Fejlett probablisztikus PTS értékelési módszer kidolgozása hosszú távú üzemelésre vonatkozóan

Az APAL projekt az EURATOM 2019-2020 keretprogram NFRP-02 Safety assessments for Long Term Operation (LTO) upgrades of Generation II and III reactors felhívásában nyert támogatást a 2020 évben. A munka fő célkitűzései a nyomás alatti hősokek (PTS) fejlett valószínűségi értékelési módszerének kifejlesztése, a hosszú távú üzemelés (LTO) javításához szükséges biztonsági tartalékok számszerűsítése és a legjobb gyakorlatra vonatkozó útmutatás kidolgozása.

1. A jelenlegi európai gyakorlat

Az atomerőművek (NPP) megbízható, kibocsátásmentes energiaforrást jelentenek, és így fontos szerepet játszanak az Európai Unióban 2030-ig az 1990-es szinthez képest legalább 40%-kal történő kibocsátás-csökkentésre vonatkozó kötelező célkitűzés elérésében. Jelenleg az európai hálózatokba villamos energiát tápláló mintegy 180 atomerőmű többsége azonban élettartamának második felében jár, és meg kell felelnie a nukleáris biztonságról szóló irányelvben meghatározott szigorúbb biztonsági előírásoknak. A következő évtizedek szükséges villamosenergia-ellátásának biztosítása érdekében az Európai Unió a meglévő erőművek élettartamának meghosszabbítását tűzte ki célul, ami szükségessé teszi a biztonságos működésük ellenőrzésére szolgáló fejlett módszerek alkalmazását.

A hosszú távú üzemeltetés (LTO) egyik legkorlátozóbb biztonsági értékelése a reaktortartály (RPV) integritásának értékelése a nyomás alatti hősokek (PTS) figyelembevételével. A nyomás alatti hősokek (PTS) olyan esemény, amely során az RPV-t egyidejűleg magas nyomás és a vészhelyzeti maghűtés (ECC) befecskendezése miatti hősokek (súlyos gyors túlűtés) terheli. Egy új reaktortartály anyagának törési szívóssága magas, ezáltal a PTS nem veszélyezteti integritását. Azonban az üzemelés során az anyagok törési szívóssága csökken, mivel gyors neutron sugárzásnak vannak kitéve (anyag elridegedése). Ezáltal a súlyos PTS események okozhatják a reaktortartály belső felületének közelében meglévő kis hibák terjedését. A feltételezett kezdeti hiba a tartály falán keresztül olyan mértékben terjedhet repedéssé, hogy az veszélyezteti a tartály épségét és ezáltal a mag hűtési képességét. A PTS előfordulhat a reaktortartályban, de hasonló jelenség előfordulhat az atomerőművek kevésbé kritikus alkatrészeinél is, mint például a csövek, hőcserélők stb. esetében. A cél a hirtelen bekövetkező törés kezdetének vagy a reaktor meghibásodás biztonsági határának meghatározása. A meglévő atomerőművek LTO elemzése utáni biztonságos működés igazolására továbbfejlesztett módszerekre van szükség.

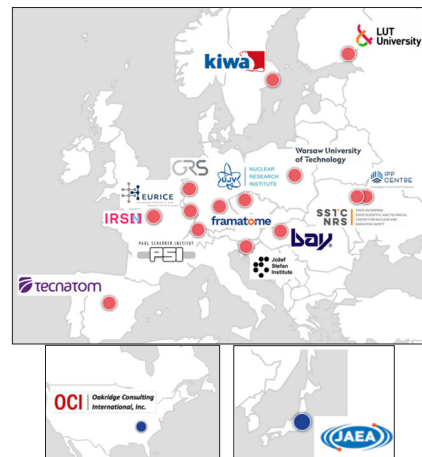
Az Európai Unióban jelenleg alkalmazott PTS elemzések

determinisztikus értékeléseken és konzervatív peremfeltételeken alapulnak. Az ilyen típusú PTS elemzések korlátozások az LTO-ra váró atomerőművek biztonságának igazolásához, ezáltal további fejlesztésük javasolt. Ugyanakkor több LTO elemzés is azt célozza meg, hogy növelje a PTS vizsgálatok biztonsági határait. Ezenkívül fontosabbá válik a biztonsági határok számszerűsítése a reaktor-meghibásodás probablisztikus értékelésének szempontjából [1].

2. A projekt célja

Az APAL projekt célja az atomerőművek biztonsági értékelési módszereinek fejlesztése azzal a célkitűzéssel, hogy Európa-szerte javuljon a biztonságuk. Ezt szem előtt tartva az APAL egy fejlett valószínűségi és determinisztikus PTS értékelési módszert dolgoz ki, mely során számszerűsíti a hosszú távú üzemeltetés javításához szükséges biztonsági tartalékokat, és iránymutatást fog kidolgozni a legjobb gyakorlatra vonatkozóan.

A projekt 2020. októberében indult és 2024 szeptemberében zár. A projektben 14 európai intézet-labor mellett (1. ábra) részt vesz a Japán Atomenergia Ügynökség (JAEA) és az Oakridge Consulting International (OCI), a projekt koordinátora az ÚJV Řež.



1. ábra: APAL projektpartnerek [1]

A konzorcium az RPV biztonsági értékelésével és a PTS enyhítésével kapcsolatos multidiszciplináris és multifizikai kihívásokkal foglalkozik. A projekt során összegyűjtött valamennyi ajánlást és következtetést felhasználja az LTO fejlett PTS-elemzéseinek valamennyi szempontját lefedő legjobb gyakorlatok meghatározására. Az APAL-ban alkalmazandó valószínűségi megközelítés lehetőséget nyújt a bizonytalanságok kezelésére anélkül, hogy túlzottan konzervatívan járna el, valamint képes kvantitatív adatokat szolgáltatni a kockázatalapú élettartam-menedzsment

megközelítésekhez, amelyeket számos más ipari területen is alkalmaznak.

Az APAL-ban a PTS-elemzés magában foglalja a termohidraulikai, szerkezeti és törésmechanikai értékeléseket. A PTS-elemzés szempontjából releváns LTO-fejlesztések azonosításához kiterjedt szakirodalmi áttekintésre van szükség a fejlett módszerek validálásához felhasználható tapasztalati eredmények összegyűjtésével együtt. Az APAL a szakirodalom áttekintésével és a partnerek tapasztalatainak összegyűjtésével kezdi a PTS-elemzés szempontjából releváns LTO-fejlesztések (hardver és szoftver) jelenlegi állásának meghatározását. Ez magában foglalja a PTS mérséklésére szánt LTO-fejlesztéseket is. A legmodernebb technológia meghatározása tartalmazza a meglévő megoldások, megközelítések és értékelések összegyűjtését az LTO-fejlesztésekhez, valamint a technológiai hiányosságok és a lehetséges megoldások azonosítását. Az LTO-fejlesztések hatással lehetnek a termohidraulikai (TH) elemzésre (pl. fűtött vészhelyzeti hűtővíz) vagy a szerkezeti és törésmechanikai értékeléshez használt módszerekre és megoldásokra (pl. hegesztési maradó feszültségek). A leginkább befolyásoló vagy releváns LTO-fejlesztések további értékelésére referenciaesetként kerül sor. Ezenkívül az APAL az üzemeltetési eljárások alapján azonosítja az emberi beavatkozást a PTS esemény során, majd a TH-elemzés határfeltételeire vonatkozó emberi tényező számszerűsítése következik. A számítógépes kódmodellekhez, a kezdeti peremfeltételekhez és az atomerőmű-rendszerek paramétereikhez kapcsolódó bizonytalanságok mellett a munka az emberi tényezőhöz kapcsolódó bizonytalanságokra is összpontosít – ez egy olyan terület, amelyet a PTS-elemzésben eddig nem nagyon dolgoztak ki és értékeltek. Ez a következőkre terjed ki:

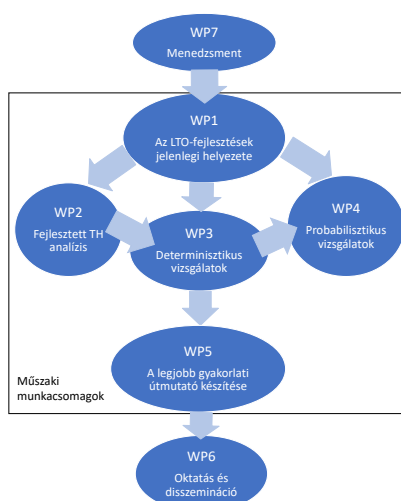
- A számítógépes kódmodellek bizonytalanságai a számítási eredményeknek a rendelkezésre álló kísérleti adatokkal való összehasonlításával kerül meghatározásra.
- Az üzemi adatok bizonytalanságait szakértői megítélés vagy üzemeltetési tapasztalat alapján határozzák meg.
- Az emberi tényezővel kapcsolatos bizonytalanságok a korszerűség azonosításának előfeltételeiből származó meghatározásokon alapulnak.

A projekt során elvégzett valamennyi munka ajánlásai és következtetései összegyűjtésre kerülnek, hogy kidolgozzák a fejlett PTS-elemzésének legjobb gyakorlatát az LTO-ra vonatkozóan.

3. A projekt módszertana

A célok elérésére a tervezett munka öt szakmai részre osztható fel, amelyet a 2. ábra szemléltet.

Kiterjedt szakirodalmi áttekintés és **2. ábra:** Az APAL projekt felépítése [1]



tapasztalatgyűjtés: Az APAL célja, hogy meghatározza az LTO-fejlesztések (NPP hardver és szoftver) jelenlegi állását, amelyek kedvező vagy kedvezőtlen hatást gyakorolhatnak a PTS-elemzés eredményeire. Ez magában foglalja a technológiai hiányosságok azonosítását és a lehetséges fejlesztések meghatározását. Ezen túlmenően a rendelkezésre álló üzemeltetési tapasztalatok és szakértői megítélések alapján azonosítják (és számszerűsítik) a PTS-esemény során releváns emberi tényezőket. Továbbá a PTS-értékelés kiválasztott részeiről, például a maradó feszültségek kezeléséről, a meleg előfeszítéses megközelítés alkalmazásáról, a termohidraulikai elemzésekről és a valószínűségi PTS-értékelésről korszerű jelentések készülnek.

Széleskörű termohidraulikai (TH) értékelés: A teljes PTS-elemzés egyik legfontosabb lépéseként az APAL célja, hogy számszerűsítse az LTO-fejlesztések és az emberi tényező hatását a TH-elemzés eredményeire. Ezen túlmenően ezt a hatást a későbbi szerkezeti és törésmechanikai referenciaértékek segítségével értékeli, miközben figyelembe veszik a TH-elemzés bizonytalanságait (az üzemi adatok, az alkalmazott számítógépes kódok és az emberi tényező miatt), és foglalkoznak a teljes PTS-elemzésre gyakorolt hatásukkal.

Determinisztikus szerkezeti és törésmechanikai elemzések: Az APAL célja az LTO-fejlesztésekkel és a TH-elemzés bizonytalanságával kapcsolatos biztonsági tartalékok számszerűsítése olyan értékelések révén, amelyeket egy közös determinisztikus referenciaérték alapján végeznek el. Ezt a közös referenciaértéket a NUGENIA+DEFI-PROSAFE projekt [6] által biztosított átfogó referenciaérték alapján határozzák meg, amelyhez szilárd validációs és ellenőrzési alap áll rendelkezésre.

Valószínűségi törésmechanikai elemzésen alapuló valószínűségi becslés: Mivel a biztonsági tartalékok számszerűsítése egyre fontosabbá válik, és a determinisztikus értékelések elérik korlátjaikat, az APAL célja, hogy megfelelő viszonyítási alapot hozzon létre a valószínűségi törésmechanikai elemzéshez. Ezt a determinisztikus biztonsági tartalékok értékelésére elvégzett referenciaértékekkel összehangban határozzák meg.

Egy fejlett valószínűségi PTS-értékelésre kerül sor a TH bizonytalanságok figyelembevételével a későbbi szerkezetmechanikai és valószínűségi törésmechanikai elemzésekben. Ezen túlmenően kapcsolatot kell teremteni a determinisztikus és a valószínűségi tartalékértékelés között.

Ajánlások és a legjobb gyakorlatok meghatározása: Az APAL elemezni fogja az elvégzett munkát, hogy a tanácsadó testülettel, a szabályozó testületekkel és a végfelhasználókkal szorosan együttműködésben meghatározza az LTO fejlett PTS-elemzésére vonatkozó legjobb gyakorlatokat, és ezeket az eredményeket célzott munkaértekezleteken, képzési rendezvényeken és a tudományos

közösséget célzó további kommunikációs csatornákon keresztül terjeszti.

4. A BZN szerepvállalása a projektben

A BZN Szerkezetintegritás és Gyártástechnológia Osztálya (SZI) is részt vesz a projektben. A WP2 munkacsomag kivételével az összes többi szakmai munkacsomagban vállal feladatot, amelyek közül a WP5 vezető szerepét tölti be.

- WP1–T1.1 State-of-the-art készítése hegesztések maradé feszültségei elemzésére vonatkozóan: A BZN az alfeladat vezetője, amelynek célja annak meghatározása, hogy a szakirodalom alapján a maradó feszültségek figyelembevétele a PTS analízis esetén hogyan vehető figyelembe.
- WP1–T1.2: A meleg előfeszítés (WPS) hatásának bevonása az RPV-k értékelésébe.
- WP3–T3.1 Szerkezeti elemzés, értékelés: A BZN ezen alfeladat vezetője.
- WP3–T3.2 A törésmechanikai referenciaérték meghatározása.
- WP3–T3.3 Első törésmechanikai benchmark feladat elvégzése.
- WP3–T3.4 Az LTO-fejlesztésekhez kapcsolódó számítások értékelése.
- WP3–T3.5 TH bizonytalanságokhoz kapcsolódó különbség értékelése.
- WP5: A BZN a munkacsomag vezetője, amelyben az elvégzett munkából származó javaslatok és következtetések összegyűjtése a feladat a kifejlesztett LTO és PTS elemzésekhez szükséges legjobb gyakorlat feltárása céljából.

A WP4 probabilisztikus elemzés felépítése megegyezik a WP3 esetén felsorolt lépésekkel, amelyekben a BZN résztvevőként szerepel [2-5].

5. A projekt jelenlegi állása, eredményei

A projekt jelenleg a futamideje felénél tart. Ennek során lezárulásra került a WP1 és a WP2 munkacsomag. A T2.1. feladatban (Az LTO-fejlesztések és az emberi tényező TH-elemzési peremfeltételekre gyakorolt hatásának számszerűsítése) a kiválasztott LTO-fejlesztések TH-elemzését végezték el. A T2.1. feladat azonosította a PTS-eseményekben a legnagyobb befolyással bíró emberi tevékenységeket, valamint a PTS-esemény során a szabványos üzemeltetési eljárástól eltérő, kiválasztott emberi interakciók hatásait is. E feladat eredményei a TH-adatok különböző csoportjai lettek, amelyek a kiválasztott LTO-fejlesztéseket vagy az emberi tényezőket képviselik. A T2.2. feladatban (A TH-elemzések bizonytalanságainak meghatározása a számítógépes kódmodellekkel, az üzemi paraméterekkel és az emberi tényezővel kapcsolatban) a termohidraulikai elemzések bizonytalanságait határozták meg a PTS értékelésére vonatkozóan. A T2.3 alfeladatban pedig a végleges megközelítés kiválasztására és alkalmazására került sor [4].

A WP3 és a WP4 munkacsomagok jelenleg futó munkacsomagok. Ezek közül a T3.1 alfeladatban meghatározásra

kerültek a feszültségmezők és a hőmérséklet eloszlások, amelyek a WP2-ből származó TH adatokat használta fel. Emellett további érzékenységvizsgálatok lettek elvégezve, mint például a geometria, a bevonat vastagságának, a hálósűrűségnek a hatása. A T3.2 részfeladatban definiálásra került a vizsgálandó repedés alakja, mérete és elhelyezkedése, továbbá az ehhez alkalmazandó számítási módszerek meghatározása. A T3.3 feladat főbb részei már befejeződtek, ennek során az első törésmechanikai benchmark feladat elvégzésére került sor, amely segítségével a partnerek eredményei jól összevethetőek voltak, ezáltal meghatározásra került az egyes partnerek megoldásai közötti eltéréseiből származó divergenciák okai [5].

A WP4 munkacsomag az első fázisában tart, ezáltal jelenleg a T4.2 alfeladat készült el ez idáig, amelynek során a probabilisztikus törésmechanikai feladatok és számítási módok részletes ismertetésére került sor.

További információk a honlapon:

<https://www.apal-project.eu/>

Spisák Bernadett, Szávai Szabolcs

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

Köszönetnyilvánítás

A bemutatott munka a NUGENIA által jóváhagyott APAL (Advanced Pressurized Thermal Shock Analysis for Long-Term Operation) projekt részeként készült. Az APAL az Euratom 2019-2020-as kutatási és képzési programjából kapott támogatást a 945253 számú támogatási megállapodás keretében.

Acknowledgments



The presented work has been performed as a part of APAL (Advanced Pressurized Thermal Shock Analysis for Long-Term Operation) project which was approved by NUGENIA. APAL has received funding from the Euratom research and training programme 2019-2020 under grant agreement N° 945253.

Irodalomjegyzék

- [1] Az APAL projekt honlapja: <https://www.apal-project.eu/> (Letöltés ideje: 2022.12.20)
- [2] Zarazovskii, M és társai: State-of-the-art of WPS in RPV PTS analysis, Proceedings of the ASME 2022 Pressure Vessels & Piping Division Conference, 2022
- [3] Pištora, V, Cueto-Felgueroso, C, Král, P, Tiete, R, Dillstrom, P, Szávai, Sz, Mora, D: Development of advanced method for evaluation of pressurized thermal shock to support long-term operation of VVER, The 8th International Conference VVER 2022, ÚJV Řež Conference Centre, Czech Republic, 2022, 10. 10-12,
- [4] Kral, P és társai: Comparison of System TH Codes Calculations of SBLOCA Base Case in the APAL Project, Spring CAMP Meeting, 2022, online
- [5] Spisák B, Szávai Sz: Reaktortartály termikus sokkból származó feszültségeinek végeelem módszerrel történő elemzése, GÉP 2022/5. pp. 76-79. ISSN 0016-8572
- [6] DEFI-PROSAFE: DEFIinition of reference case studies for harmonized PRObabilistic evaluation of SAFETy margins in integrity assessment for long- term operation of reactor pressure vessel

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

Az élettartam hosszabbítás biztonsági működésre és az alapanyagokra gyakorolt hatásának leírása – Hosszú távú működés biztonsági kompromisszumok nélkül

A DELISA-LTO projekt az EURATOM keretprogram NRT-01-01 felhívásában nyert támogatást 2021 évben.

1. A projekt előzményei

1.1 A hosszú távú üzemeltetés (LTO) előzményei

Bár a ma működő atomerőművek többségét eredetileg 30 és 40 év közötti üzemidőre tervezték, valójában a reaktorok élettartamának nincs rögzített műszaki korlátja, az atomerőművek tervezési élettartamukon túli üzemeltetése ma már mindennapos, a szabályozói megfelelés, a biztonság és a gazdasági teljesítmény vizsgálata egyedi alapon történik. 2019-ben jelentős mérföldkőhöz érkeztünk, amikor a világ legrégebben működő atomerőműve elérte az 50 éves üzemelési évfordulóját. Az első reaktor, amely ezen mérföldkövet átlépte az indiai Tarapur 1-es blokk volt, amelyhez nem sokkal később csatlakozott a 2-es blokk, majd később a Beznau 1 (Svájc), a Nine Mile Point 1 (USA) és a Ginna (USA). Ezen utóbbiak azok az első reaktorok a sok közül, amelyek az elkövetkező években átlépik ezt a küszöböt, és amelyek az eredetileg vártnál évtizedekkel tovább fognak tiszta, megbízható villamos energiát termelni. Az atomerőművek hosszú távú üzemeltetését (LTO) sikeresen demonstrálták, mely nemzetközileg egyre inkább elfogadott, bevett gyakorlatnak számít. Az atomerőművek világméretű flottája egyre öregebb. Például az Egyesült Államok rendelkezik az egyik legrégebbi atomerőműparkkal, és a legtöbb reaktor működési engedélyét már megújították, ami lehetővé teszi számukra, hogy az eredetileg tervezett 40 éves működési engedélyen túl további 20 évig működjenek. Koruk ellenére ezek az atomerőművek továbbra is kiemelkedő teljesítményt nyújtanak, több mint 90%-os teljesítménytényezővel. Az Egyesült Államokban számos atomerőmű-üzemeltető törekszik az engedélyek újbóli megújítására, ami lehetővé tenné számukra, hogy további 20 évig (így összesen 80 év) még működőképesek legyenek.

1.2 A VVER reaktorok fejlődése

A VVER (vízzel moderált/vízűtéses reaktor) egy nyomottvízes reaktortípus, amelyet a volt Szovjetunióban az OKB Hidropress Electrical tervezett és fejlesztett ki. E reaktorok elektromos teljesítménye 440-1200 MW. A VVER-reaktorok nyomástartó edényeihez használt anyagok (a típus és a gyártás helye szerint) eltérőek. A gyártás három helyen történt: Izhora, Szentpétervár közelében, Atommasz a Volgán és a Škoda gyár Pilsenben, a Cseh Köztársaságban.

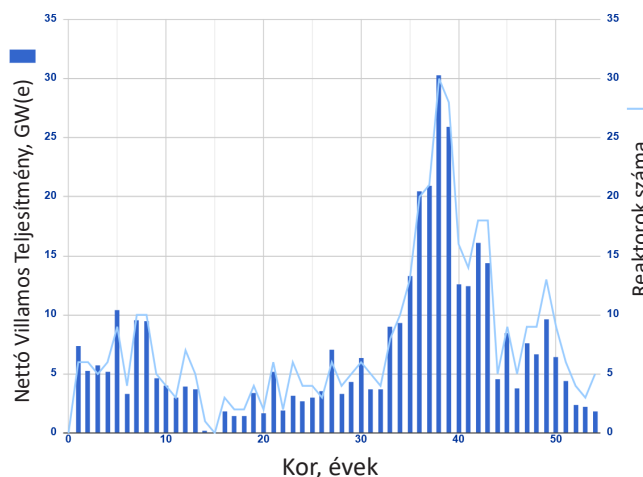
Az első két VVER atomerőmű a reinsbergi 70 MWe

teljesítményű blokk és az 1963-ban Novovoronyezsben üzembe helyezett 210-es blokk

volt. Ezt követte egy második, az 1969-ben üzembe helyezett 365 MWe teljesítményű prototípus. Ezekből a prototípusokból született meg a 440 MWe teljesítményű szabványos atomerőmű, amely a VVER-440 V230 elnevezést kapta. A modulokat általában iker egységekként építik be, hat hurokkal, elszigetelő szelepekkel minden egyes körben, vízszintes gőzfejlesztőkkel, és mindegyiknél 220 MWe teljesítményű gőzturbina alkalmazásával. Az első VVER-440 V230 a Novovoronyezs 3. blokkja volt, amely 1971-ben kezdte meg villamosenergia termelését. A két örmény egység ennek a modellnek a változata, amely rendelkezik földrengés elleni védelemmel is.

A későbbi, VVER-440 V213 típust az 1970-es években vezették be. A V213 és a V230 közötti fő különbség a súlyos balesetek hatásainak enyhítésében rejlik. Ezek a reaktorok megfigyelési mintákat tartalmaztak az reaktortartályok állapotáról való előzetes tájékoztatás céljából, és amikor az első "láncok" mintáit vizsgálták, jelentős különbséget tapasztaltak a tényleges és a feltételezett mechanikai tulajdonságok között, ahol a tulajdonságok változása nagyobb volt a feltételezetténél.

A legújabb típusú VVER-reaktor a VVER-1000, V302 és V320 reaktortartályokkal. Az első ilyen 1000 MWe teljesítményű erőmű 1980-ban kezdte meg működését Novovoronyezsben (5. blokk). Ezek általában ikeregységekből álló modulokban épülnek, mindegyik négy hurokkal, vízszintes gőzfejlesztővel rendelkezik, és mindegyik 1000 MW-os gőzturbinával van ellátva.



1. ábra: A működő reaktorok kormegoszlása világszerte [1]



2. ábra: A DELISA-LTO projekt célja [3]

1.3 Reaktorok öregedése a világon

2022 novemberéig világszerte összesen 427 erőművi reaktor üzemel, és 56 új reaktor építése van folyamatban. Az életkori megoszlásukat az 1. ábra szemlélteti. Ezek körül 12 országban üzemel összesen 65 VVER-reaktor és 20 van építés alatt. Az uniós országokban 19 VVER-blokk működik. További 12 Ukrajnában fog létesülni. A magas szintű biztonságos, hatékony, megbízható és hosszú távú üzemelés (LTO) a tervezett élettartam felett, az élettartam 60-80 évre történő meghosszabbításával, korábbi generáltervező nélkül, a valódi és aktuális kihívás az európai nukleáris közösség számára.

2. A projekt célja

A DELISA-LTO projekt 2022. júniusában indult és 2026 május végéig tart, melynek célja (2. ábra) az üzembiztonság növelése és az élettartam meghosszabbítása következő szempontok figyelembevételével:

- Az LTO szempontjából legkritikusabb alkatrészek meghatározása és az LTO-nak az anyagtulajdonságokra gyakorolt hatásának leírása.
- Ronszolásmentes módszerek, szimulációs eszközök és módszertanok kifejlesztése a meghibásodások korai előrejelzésére.
- Az atomerőművek jövőbeli üzemeltetésére vonatkozó ajánlások megfogalmazása és élettartamuk meghosszabbításának értékelése.

A konzorcium (3. ábra) az európai régióban működő valamennyi VVER-egységet működtető országot és az összes érdekeltéggű kutatási szervezetet magában foglalja, nevezetesen a következőket:

Csehország: CVR, UJV

Szlovákia: VUJE, STUBA

Magyarország: EK-CER, BZN

Finnország: VTT

Ukrajna: IPP, SSTC



3. ábra: A DELISA-LTO projekt partnerek [3]

3. A projekt módszertana

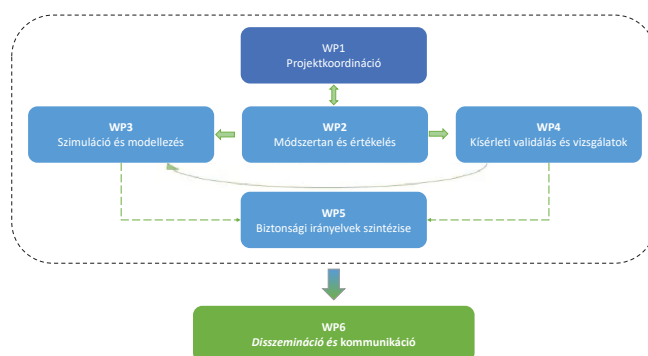
A projekt 6 munkacsomagot tartalmaz az alábbiak szerint felosztva, melyeket a 4. ábra is szemlélteti:

WP1 Projektkoordináció: A WP1 a projekt koordinációjával és az összes belső tevékenység irányításával foglalkozik, például a projekttervezetek tervezésével, a projekt technikai koordinációjával, a partnerek közötti és az Európai Bizottsággal folytatott kommunikációval. A WP1 ellenőrzi a projekt általános irányításával és a munkálatok műszaki előrehaladásával kapcsolatos feladatokat.

WP2 Módszertan és értékelés: A WP2 összegyűjti a projektpartnerek széles körű tapasztalatait és ismereteit a VVER-egységek primerköri alkatrészeinek degradációjáról, valamint az anyagváltozásuk vizsgálatában való jártasságukat. Célja, hogy meghatározza a hosszú távú működés szempontjából legkritikusabb alkatrészeket és azok részeit, továbbá javaslatot tegyen az anyagvizsgálatok módszertanára.

WP3 Szimuláció és modellezés: A WP3 a duzzadás és a termikus öregedés modellezését és szimulációját foglalja magában azzal a céllal, hogy megértsük és megjósoljuk a különböző mechanikai tulajdonságokkal rendelkező anyagok és alkatrészek viselkedését különböző üzemi körülmények és állapotok között, amelyek a hosszú távú működés során idővel megváltozhatnak.

WP4 Kísérleti validálás és vizsgálatok: A WP4 szilárd és megbízható kísérleti adatbázist teremt az atomerőművek működése során az anyagok termikus öregedésének



4. ábra: A DELISA-LTO projekt felépítése [3]

értékeléséhez. A kísérletek eredményeit a degradációs mechanizmusok által a kiválasztott atomerőmű szerkezeti anyagokra gyakorolt hatások részletes értékelésére, valamint a jelenlegi LTO-eljárásokra és -módszerekre gyakorolt hatások meghatározására fogják felhasználni.

WP5 Biztonsági irányelvek szintézise: A WP5 a rendelkezésre álló anyagok meglévő biztonsági irányelveit elemzi, amelyek befolyásolhatják a várhatóan több mint 60 évig tartó biztonságos hosszú távú működést. A WP2-WP4 elméleti ismeretei és eredményei alapján a vizsgálati eljárásokra és technikákra, valamint a mintaelőkészítésre vonatkozó javító ajánlásokat fogalmazzák meg és nyújtanak be a hatóságoknak és a gyártóknak.

WP6 Disszemináció és kommunikáció: A WP6 magában foglalja az eredmények terjesztését és hasznosítását a nagyközönség és a szakemberek számára, ami fontos kérdés a projekt végrehajtása során. A WP6 hatékony oktatás, képzés és workshopok szervezése révén támogatja a tudás átadását a technikusok új generációjának.

A vizsgált anyagokat a WP2 keretében a Jaslovské Bohunice atomerőmű (1. és 2. blokk) különböző primerköri komponenseiből választották ki a szerkezeti anyagállapot – kezdeti állapot/üzemben töltött évek száma – és az anyagtípus – alapfém (BM), hegesztett fém (WM) és hőérzékeny zóna (HAZ) – szempontjából.

A DELISA-LTO projekt során az anyagokra és tulajdonságaikra vonatkozó adatokat összegyűjtik, tárolják és megosztják a JRC anyagadatbázisában [2].

4. A BZN szerepvállalása a projektben

A Bay Zoltán Nonprofit Kft. (BZN) részéről a projektben a miskolci telephelyen működő Szerkezetintegritás és Gyártástechnológia Osztály és Anyagvizsgáló Osztály, mint projektpartner vesz részt a WP2 T2.2 alfeladat és WP3-4-5 szakmai munkacsomagok összes alfeladatában.

A WP2 Módszertan és értékelés négy alfeladatot (task-ot) foglal magába. Ezek közül a BZN a T2.2 Roncsolásmentes vizsgálatok módszertana c. alfeladatban vállal aktív szerepet. A VVER-reaktorok hosszú távú üzemeltetése szempontjából az egyik leginkább érintett alkatrész a gőzfejlesztők hőcserélő csövei. Mivel számos VVER-egységben új típusú károsodások jelentek meg, amelyek közül sok csak egyes egységekre jellemző, ezért széles körben elfogadott igény van új vizsgálati technikák kifejlesztésére és alkalmazására.

A WP3 Szimuláció és modellezés munkacsomag a tervezés vagy a biztonság igazolásának egyik legfontosabb része, mivel lehetővé teszi a különböző mechanikai tulajdonságokkal rendelkező elemek és alkatrészek viselkedésének megértését és előrejelzését különböző működési körülmények között és időben változó állapotokban. A WP3 a nemzeti szabályalkotás, a jelenlegi üzemeltetési gyakorlatok és a duzzadás értékelésére, a termikus öregedésre és az üzem közbeni ellenőrzésekre vonatkozó megközelítések összehasonlítását is magában foglalja.

A WP4 Kísérleti validálás és vizsgálatok munkacsomag tevékenységei az üzemeltetési körülmények között degradációs mechanizmusoknak kitett, valós archív

atomerőművi anyagokból álló nagy anyagmátrixon alapulnak. A projekt keretében elemzett szerkezeti anyagok főként a VVER típusú reaktortartályból, reaktorbelső szerkezeti eleméből és primerköréből származnak. Az eredmények adatbázisának létrehozásához a mechanikai vizsgálatok hagyományos módszereit, valamint a miniaturizált minták és a modern NDT-megközelítések távlati módszereit alkalmazzák. A tervezett kísérleti tevékenységek a tapasztalt laboratóriumok együttműködésének szinergiáiból fognak profitálni, és a tervezett feladatok jelentős részét laboratóriumok közötti összehasonlító vizsgálatokkal fogják megoldani a vizsgálati és mintaelőkészítési eljárások és technikák harmonizálása érdekében.

A WP5 Biztonsági irányelvek szintézise célja a hosszú távú, erősen előregedett rendszerek, szerkezetek és alkatrészek (SCC) anyagainak vizsgálati eredményei és a ridegedésük modellezése alapján javaslatot tenni a vonatkozó iránymutatások harmonizációjára vonatkozóan. A rendelkezésre álló anyagok alapján a projekt keretében elemzett legfontosabb SSC-k főként a VVER típusú reaktorok nyomástartó edényeiből, reaktor belső szerkezeti elemeiből és primerköréből származnak. A feladatokat laboratóriumok közötti összehasonlító vizsgálatokkal oldják meg a vizsgálati és a minták előkészítési eljárásainak és technikáinak harmonizálása érdekében.

5. Eddigi eredmények

A projekt a futamidejének első szakaszában van. Indulása óta a résztvevő intézetek kidolgozták a WP2-3-4 munkacsomagokra vonatkozó szakmai kérdőíveket, melyek alapján elkezdődött az egyeztetés az egyes részfeladatokban futó munkákat illetően.

További információk a honlapon:

<https://delisa-lto.eu/>

Szávai Szabolcs, Dudra Judit
Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

Köszönetnyilvánítás

Aszerzők köszönetet mondanak az Európai Bizottságnak a tanulmány részleges/teljes pénzügyi támogatásáért az Euratom 2021-es kutatási és képzési programja keretében a 101061201-as számú támogatási megállapodás keretében (DELISA-LTO projekt).

Acknowledgments

The authors thank the European Commission for partial/total financial support of this study in the frame of the Euratom research and training programme 2021 under grant agreement N° 101061201 (DELISA-LTO project).

Irodalomjegyzék

- [1] IAEA website, cit. 30th October, 2022 <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalByAge.aspx>
- [2] JRC adatbázisa: <https://odin.jrc.ec.europa.eu/>
- [3] DELISA-LTO Newsletter (2022/1): <https://delisa-lto.eu/news-events/> (letöltés dátuma: 2022.12.28.)

Gyulai József – az intézetigazgató

Az emléktábla avatáson elhangzott beszéd sorozat első része¹

József Gyulai – the institutdirector
First part of the series of speeches at the plaque unveiling

Már bő másfél éve nincs velünk Gyulai Jóska², ahogy biztatására mindenki hívta, felesége, Eszter halála után rövid idővel követte. A mai megemlékezéssel és emléktábla avatással kívánunk maradandó emléket állítani volt igazgatóknak. Az alábbiakban a kétszeres intézetalapító tudós nehéz feladatát és máig hatóan sikeres megoldásait szeretném összefoglalni.

A KFKI (Központi Fizikai Kutató Intézet) részeként Zimmer György igazgatásával működő Mikroelektronikai Kutató Intézet a rendszerváltás beköszöntével már túl volt a Mikroelektronikai Vállalat 1986-os tüzésén, a hazai mikroelektronikai ipar megszűnte okozta sokkon. A MEV (Mikroelektronikai Vállalat) az ionimplantációs szilícium adalékolás, az ionsugaras analitika területén erősen támaszkodott Gyulai József az USA-ban megszerzett szakmai tudására építve, az MTA MKI támogatására. Az intézet kiváló szakmai felkészültségű munkatársai a háttérintézményi szerepből kiesve, a KFKI felszámolásáig nagyon fragmentált területeken próbáltak túlélni. A nagyreményű és csaknem gyártás-éretten elvetélt buborékmemória-technológia fejlesztéséhez kapcsolódó magas olvadáspontú egykristály alapanyag technológia, eszköztervezés és mágneses mérések, a mikrométeres fotolitográfia csak részben voltak összekapcsolhatók a korábban HIKI (Híradástechnikai Ipari Kutató Intézet) - MEV és MKI kooperációban művelt korszerűbb félvezető technológiai és unikális ionos-vizsgálati módszerekkel.

A rendszerváltást követően 1992-ben a KFKI intézetek átszervezése kapcsán **Gyulai József** vállalkozott arra, hogy az MKI-t egy új kísérletes kutatóintézetté formálja. Óriási nemzetközi tapasztalata révén sok kapcsolata segítette abban, hogyan kell egy korszerű, **hosszú távon is művelhető kutatási profilt** kialakítani a gyakorlatközeli kutatási területen. Az amerikai terminológia szerint a **Materials Science and Technology** szétválaszthatatlan, csak együtt művelhető. Erre kellett tehát alapozni, de nem csupán a szilícium félvezetőkre, hanem a tágabban értelmezett **funkcionális anyagokra értelmezve**. Minden a szerencsés névadással kezdődik; az alapító igazgató tehát az új MTA intézménynek az **Anyagtudományi Kutató Intézet – a KFKI ATKI** nevet választotta. **A tudományos tevékenység tehát részben a Fizikai Osztály, részben a Műszaki Osztály illetékességi területére esett.**

1985-ben közelről élhette át Erlangenben barátja, Prof. **Heiner Ryssel** új intézetének, az **Institut für Integrierte Schaltungen – ISSB** szervezését a **Fraunhofer intézet-hálózatban**. A német rendszer a kutatóintézeteket általában egy egyetem képzési profiljához idomítva, célszerűen az egyetem egyik tanszékét vezető professzor irányítása alá helyezi. Ez a „**perszonálunió**” biztosítja a korszerű, kísérletes oktatás személyi és apparatív feltételeit és egyben a kutatói utánpótlás törzsét is a közös doktoranduszok révén. **Sajnos, az egyetemek és kutatóintézetek ilyen szorosabb együttműködésében mutatkozó hiátus az ELKH (Eötvös Lóránd Kutatói Hálózat) intézetek esetében is fennáll mind a mai napig!**

Mikor **ATKI igazgatóként a BME-n** átvette a volt Gyulai Zoltán-féle **Kísérleti Fizika Tanszék** vezetését, Gyulai József is hasonlóra törekedett. Csakhogy a BME-KFKI földrajzi távolsága főleg a diákok részéről nem akadályozta a kívánatos együttműködést. A közös doktorandusz-képzés sikere az ellipszométeres analízis területén Petrik Péter kollégánk karrierje, aki már habilitált MTA doktoraként a Debreceni Egyetem villamosmérnök-képzését is erősíti. Igazgatónk inspirálta a Biró László Péter, ma az MTA rendes tagja iskolateremtésével kiemelkedően sikeressé vált szén nanoszerkezet-kutatást. A szilícium technológiai sor túlélését néhány **európai félvezető kutatási projekt-részvétellel** biztosítottuk, amivel végre intézményileg kapcsolódtunk be a nemzetközi vérkeringésbe is.

Az kutatóintézetben megszületett eredmények ipari alkalmazását elősegítendő Gyulai József óriási munkabírással a Pungor Ernő professzor, OMFB elnök által alapított Bay Zoltán Kutatói Alapítvány **Anyagtechnológiai Intézetének (Bay-ATI)** vezetését is felvállalta.

Magam örökre hálás vagyok neki, hogy a párhuzamos megbízatásai miatti távolléte következtében operatív helyetteseként lehetőségem nyílt beletanulni az intézményvezetésbe.

Az 1997-ben elkezdett **MTA intézethálózati reform** az intézetek stabil ellátmányát szigorú tudományos teljesítmény-értékeléshez kötötte. Bár Jóska váltig hangsúlyozta, hogy **a kísérletes intézetek** esetében a minősítésben „**azonos értékkel kellene bírni Einstein és Edison teljesítményének**”, ez nem így történt. Az akkori, kifejezetten szorongató gazdasági helyzetben az értékelés az

¹ Az emléktábla avatáson, 2022. november 10-én tartott méltatás szerkesztett változata. <https://www.mfa.kfki.hu/2022/11/14/gyulai-jozsef-emlektabla-avatas/>

² Barátai, munkatársai az említett biztatására többnyire „csak” Jóska néven szólították, beszéltek róla, így kérem a Tisztelt Olvasót, hogy ne tiszteletlen, elismerésem hiányának tekintsék, amikor „Jóska” névvel találkozunk mondataimban.



Gyulai József emléktábla avatásához kötődő vitrin kollázs, Kispéter József³ szerkesztésében

ATKI-t meglehetősen hátrányosan érintette. Gazdaságilag racionális lehetőségként merült fel a **Műszaki Osztály és a Fizikai Osztály** két intézetének, a KFKI ATKI –nak és az MTA Műszaki Fizikai Kutatóintézetnek az összevonása.

A Műszaki Fizikai Kutató Intézet – közkeletű nevén MÜFI – Újpesten, a TUNGSRAM közelében, a HIKI-vel, ill. a MEV-vel közös telephelyen működött. Ugyancsak megszervezte a félvezető-ipar összeomlását, jóllehet elsősorban vegyület-félvezető kutatást folytattak. A két intézmény képességeinek komplementaritása szakmailag predesztinálta őket arra, hogy egy egységes kutatási profil kialakításával hatékonyabban működhessenek. Érthető okokból a MÜFI-s kollégák részéről éles ellenállás mutatkozott a szándékkal szemben. Intézményünk jobb tudományos minőségű kutató-gárdával rendelkezett, jobb teljesítmény-értékelést kapott, jobban be volt ágyazva a helyi iparba Újpesten és munkatársai is - főleg a segéderők - a környéken laktak. Az MTA Elnökség Salamoni döntése az lett, hogy az összevont intézet **az MTA MFKI jogutódjaként jöjjön létre** (meglehetősen nagy OMFB (Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság) adóssággal terhelve), de a **KFKI telephelyen, Csillebércen. Az igazgatói megbízatást – az akkor már Széchenyi-díjas MTA tag – Gyulai József kapta, Bartha László MFKI igazgató nyugdíjba vonult. 1998-at írtunk.**

A költözés komoly vérveszteség árán valósult meg: az MFKI-s kollégák csaknem 2/3-a nyugdíjba ment, önálló vállalkozások dolgozója lett, vagy a környéken vállalt más munkát. A legértékesebb kutató-részlegek, az elektronmikroszkópia, Auger spektroszkópia, kerámia-technológia, vegyület-félvezető LED és mikrohullámú mérés-technika azonban a hegyre költöztek. Egy ilyen feszültségekkel teli helyzet hatékony kezelése óriási empátiát és taktikai

érzékelt követelt meg **az új intézet alapító igazgatójától**. Kezdődött a névadással: dodonai döntéssel mindkét felet kielégítve **MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet MTA MFA** lettünk. Az alapító igazgató két igazgatóhelyettest bízott meg az intézet-részek érdekeinek képviselésével. Az igencsak alulfinanszírozott költözködés fél-egy éve során **Szabó Zsolt** műszaki vezetésével igyekeztek a költöző MÜFI-s kollégák igényeit kielégíteni, beleértve sok elhatárolódási törekvést is – amit aztán az idő meghaladott. **Egyértelműen Gyulai József befolyásának, kompromisszum-készségének és megértő, humánus hozzáállásának volt betudható, hogy viszonylag gyorsan sikerült az óriási besorolási, bérezési, szabadságolási és jutalmazási különbségeket kiegyenlíteni, az előítéleteket felszámolni. Somogyi Istvánné** gazdasági igazgatásával 4-6 év

alatt a régi telephely értékesítését, az adósságállomány leépítését is sikerült elérni.

2003-ban a nyugdíjba vonuló alapító igazgatónk **70. születésnapját nagyszabású** nemzetközi tudományos ülésszakkal ünnepeltük. Gyulai József - intézetének érdekeit is védve - a Műszaki Osztály két ciklusban megválasztott elnökeként is megtartotta befolyását az akadémiai fórumokon.

Az MTA MFA, ill. jogelődje fennállásának 50 éves jubileumát 2007-ben ünnepelte. Ez az esemény méltón demonstrálta, hogy immár befejeződött a két intézmény integrálása, az MTA MFA új igazgatás alatt új korszakba léphetett! Az alapító igazgatónk által oly kiválóan kezelt korábbi személyi problémáktól megszabadulva hozzáláthattunk a kezdetben még 19 kiemelt témát művelő összevont intézet átszervezéséhez, egy új, döntően nanoméretű szerkezetek kutatására épülő korszerű kutatási profil kialakításához. A feladat tehát adott: „Gyulai örökség” bázisán elindulva tudhatjuk a jövőnket felépíteni. Hogy ezen örökségnek milyen tárgyi emlékei vannak? Ezekből szemezgettünk az emléktábla avatása kapcsán.

Az emléktábla avatásához kötődő eseményekről, fotógalériákról a következő helyeken található részletesebb információk:

- <https://www.mfa.kfi.hu/2022/11/14/gyulai-jozsef-emlektabla-avatas/>
- <https://www.mfa.kfi.hu/gyulai-jozsef-emlektabla-avatas-2/>

Bársony István

*kutatóprofesszor emeritus, Széchenyi Díjas
akadémikus, az MTA rendes tagja*

³ Kispéter József: Ifjan-Éretten-Öregén. Beszélgetőtárs: Tóth László. Technika Alapítvány (2014). <https://mek.oszk.hu/16400/16442/>

Gyulai József – A kohézió Gyulai-iskolája

Az emléktábla avatáson elhangzott beszéd sorozat második része¹

József Gyulai – The Gyulai School of Cohesion
Second part of the series of speeches at the plaque unveiling

A rendszervált(oz)ás óta, Habsburg Ottó követőjeként „európainak” vallom magam. Elég erősnek is, hogy az engem leversenyezni akaró világ kezelésére legyen stratégiám. De bölcs-mosolygós. Az én „otthonhazám”? Igaz, szinte minden általam élt korszakában, időnként szegyen-hivatalosan is, ki akart vetni valakiket, helyel-közzel engem is. Sugárzott azonban belém annyi közérőt, köztudást, közszépséget, hogy érte akarjak tenni ... Ezt nevelte belém anyám, a Szózatot altatódalként dúdolta, meg a különleges atmoszférájú szülővárosom.

Világ- meg „Nature”-szintű (a folyóirat 2000 decemberi cikkére gondolva) közmegegyezés, hogy Magyarország a világ egyik legjobb „szülőföldje”. Vajha, az egyik legjobb „lakóföldjévé” is válnék – olvasható portrékötete első választásában.²

A „fel-feldobott kő” mivoltáról is feltárulkozóan nyilatkozó Gyulai József patriotizmusának és a világ bármely pontján megélt otthonosságának sugárzó harmóniája és humanizmusa mindenkit megkapott, ezért írhatta 1983-ban az USA-ból pártfogoltja hazai főnökeihez intézett levelében Jim Mayer:

As you know, Jozsef has developed an impressive international reputation in the particle-solid and semiconductor field. Nearly all the scientists who stop by to visit our group are acquaintances of Jozsef. If you ever appoint a scientific ambassador, I would certainly recommend Jozsef.

Közel három évtizedes személyes ismeretségünk, majd barátságunk folyamán nem csupán megismerhettük életét és munkásságát tanúságát Brecht igaza mellett (*Rettenetes a kísértés a jóra*), hanem érezhettem a mindenkit magával ragadó állhatatos és elkötelezett helytállásának a vonzerejét is.

Szeretett talentumának, a zeneértésnek és komponálásnak a metaforájával szólva, a kis közösségektől az intézményépítésig terjedő kovász-szerepnek a többszólamúság, az értő polihisztorság adott röptető erőt.

Jóska gimnáziumi és egyetemi tanárainak és diáktársainak Hódmezővásárhely és Szeged gazdag és egyedi kulturális és tudományos közege olyan éltető energiát biztosított, amelyben Németh László és Rábai tanár urak példája, Szentgyörgyi, Kalmár, Szőkefelvi professzorok szelleme a megélt értelmiségi lét ősforrásává váltak. A

12 évvel idősebb biofizikus Greguss Pál szellemi önépítése és társasági lénye sikeréhez hasonló módon járultak hozzá a szegedi évek.

A CALTECH tengerentúli kultúrájában az okos és megnyerő személyiség, a reáliák és a humaniórák világában egyaránt jártas műveltség (és azok egységéről tanúskodó alkotóerő) éppúgy kelléke volt annak az el- és befogadásnak, amelyre jellemző Harold Brown rektornak, Carter elnök későbbi védelmi miniszterének a vasfüggöny mögül érkező Gyulai Józsefet egyenrangúsító, a hidegháborús reakciókat csitító megjegyzése:

„Ez (a közös munka) mindkét félnek hasznos lesz.”

Tovább keresve az itt ma elősorolt Gyulai-féle alkotóközösségi és intézmény- szervezési eredményesség inputjait, nyilvánvaló, hogy a tudományszervezési iskolák kínálta sokféleségből két világitótorony rangú elem érdemel kiemelt figyelmet. Az egyik mindig maga a feladat: a szakmai kihívás, a hiányok felszámolása vagy a pionír esélyek valóra váltása. Ehhez a személyes szemfülesség, éberség, a szakmai horizont konzisztens és naprakész, mi több, jövőtudatos ismerete mellett a források fölötti döntéshozók meggyőzése kell.

A másik Jóska aforizma-szerűnek titulált tézise a kutatói „mesterség” tökéletesebb művelésének kellékéről. Ezek szerint (sok más ténykedéshez hasonlóan): tehetség, szorgalom, szerencse. Mindháromnak vannak szerintem megtanulható és megtanulandó, életvitelszerű pótlás-elemei:

- Tehetségpótlás: minden állítást, eredményt fonákjáról is vizsgálj, adj, hogy kapj ötletet, akár a versenytársakkal elköltött ebédek során, figyelj a véletlenekre ...
- Szorgalompótlás: a munkád felzárkózó fázisában beszéljess sokat, ne hagyatkozz a hónapokat késő irodalomra, légy vonzó a szorgalmas és modernbb tudású diákjaid számára, Te írd meg – jó társszerzőkkel – a szakmád monográfiáját, építs adatbázist nevekről, elfelejtett fogalmakról
- Szerencsepótlás: tanulj meg a neveket, a partnered családtagjait is türelemmel építsd kapcsolataid emberi, erkölcsi oldalát, ne tűnj anyagiassáknak, légy öntudatosan figyelmes, udvarias, de ne hajbókoló.

¹ Az emléktábla avatáson, 2022. november 10-én tartott méltatás szerkesztett változata. <https://www.mfa.kfi.hu/2022/11/14/gyulai-jozsef-emlektabla-avatas/>

² Az idézett szövegek az alábbi könyvben olvashatók: Kispéter József: Ifjan- Éretten-Öreg. Beszélgetőtárs: Tóth László. Technika Alapítvány (2014). <https://mek.oszk.hu/16400/16442/>

Kedvelt anekdotája volt a TUNGSRAM-vezér Aschner Lipótnak tulajdonított jó két ok a „Bay Zoltánok” alkalmazására:

„Ám radarozzák a Holdat, de ha lerobban a kriptongyártás, tegyenek mindent félre és keressék meg a baj okát. Továbbá, ha az Osram drágán akar adni egy licencet, legyen tisztában azzal, hogy ezzel a csapattal ő 'egy hónap alatt' megkerüli ...”

Ennek a klasszikus CEO – hangvételnek az ellenpólusa az itthoni Large Scale Integration projektbeli együttműködése Roska és Csurgay professzorokkal, ami elvezetett a Cornell Egyetem kiváló ithacai campusán aratott szakmai sikerekhez, ám itt másról is érdemes szólnunk. Gyulai József a mikroelektronikai rétegszerkezetek előállításában a tajvani Lian-szan Hunggal elért sikereiket a kétféle gondolkodás szinergizmusának tulajdonítva abban a jövő működő modelljét vélte felfedezni. A kreatív közösséget azonban a Jóska és Eszter citromos kolbász- és a Gyulay-féle halászlé receptje és az osztatlan iskola-modelljük magyar zene- és táncelemű gazdagítása is erősítette...

A ma itt összefoglalt szakmai eredmények és a jövő kisvártatva megszólaló várományai, a KFKI és a BAYATI keretei közötti vívmányok, s kivált a Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet eredményei jelentős részben a kohézió itt felvillantott Gyulay-iskolájának alapvetésén, illetve annak a folytathatóságán, a csapatmunkába vetett hiten nyugszanak.



Gábor Dénes-díj

Számos európai és hazai szakmai szervezet vezetésében végzett elismert munkát, szülővárosának díszpolgára. Büszke vagyok arra, hogy a NOVOFER Alapítvány és a Gábor Dénes-díj általa vitt kuratóriumi elnökségét Tőle vehettem át 2019-ben. Örök példát mutatott a minőség és a tisztelet iránti elkötelezettségében, a haza gazdagodása feletti öröm kifejezésében.

2004 márciusában a Magyar Szabadalmi Hivatal Garibaldi Klubjában a nanotechnológiával szemben támasztható társadalmi várakozásokról tartott előadásának első mondata így hangzott:

„Azt hiszem, hogy a civil életnek nagyon jelentős szerepe kell, hogy legyen minél előbb és minél mélyebben országunkban, hogy visszataláljunk oda, ahonnan elindultunk.” – Ma sincs másképp.

Ismerve kutatótársa és utódja, Bársony István professzor és mai vezető tanítványai munkásságát, bizonyos vagyok abban, hogy ebben a műhelyben az alkotó kutatók és mérnökök, a magyar anyagtudósok sok nemzedéke fogja még a szellemi családfáját a hivatás, a hazaszeretet és a hűség éltette összetartás, kohézió Gyulay-féle iskolájából eredeztetni.

Bendzsel Miklós,
c. egyetemi tanár, a Gábor Dénes-díj Kuratóriumának elnöke



ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA
HIRDESSZEN NÁLUNK!



**Érje el a szakmai partnereit,
leendő ügyfeleit!**

Hirdessen
az Anyagvizsgálók Lapjával!

Lehetőséget biztosítunk
a nyomtatott kiadványban,
honlapunkon,
vagy a közösségi médiában
hirdetéseinek megjelenítéséhez.

Egyedi árajánlatért írjon az alábbi e-mail címre:
avilap.szerk@gmail.com

A Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete (MAE) elnökei

Presidents of the Hungarian Association for Material Testing

Tetmajer Lajos (Ludwig Tetmajer von Przerwa; Korompa, 1850. július 14. – Bécs, 1905. január 31.) 1895 szeptemberében életre hívta a nemzetközi anyagvizsgáló szövettséget (Internationalen Verband für Materialprüfungen der Technik – Association internationale pour l'essai des matériaux). A Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete 1897. június 16-án alakult meg azzal az alapvető céllal, hogy Magyarországot a nemzetközi szervezetben önállóan képviselje. A 100. évfordulón elindult kezdeményezés 2012-ben végül beért: újra megalakult a MAE. Az egyesület mindenkor elnökei emblemikus személyiségek voltak: nem egy-a-sok-közül sapkadísznek vagy pénzosztogató jószágoknak használták ezt az elnöki stallumot, hanem a lehető legtöbbet vállalták az anyagvizsgáló szakma fejlődéséért, a magyar anyagvizsgáló szakemberek összefogásáért.

Ezek voltak az Egyesület elnökei. Álljon itt a névsoruk:

1897-1904	Czigler Győző (műegyetemi tanár)
1904-1910	Nagy Dezső (műegyetemi tanár)
1910-1914	Czékus Aurél (minisztériumi tanácsos)
1914-1917	Rejtő Sándor (műegyetemi tanár)
1917-1924	Zielinski Szilárd (műegyetemi tanár)
1924-1927	Gállik István (alelnök, államtitkár)
1927-1930	Czakó Adolf (műegyetemi tanár)
1930-1934	Zorkóczy Samu (műszaki vezérig.)
1934-1939	Mihailich Győző (műegyetemi tanár)
1939-1942	Quirin Leo (műegyetemi tanár)
1942-1944	Misángyi Vilmos (műegyetemi tanár)
2012-2014	Gillemot László, PhD
2014-2019	Czinege Imre (professzor emeritus)
2019 -	Biró Gyöngyvér, Dr. habil

Az egyesületi elnökök 14 nevet felsorakoztató névsorából a lap korábbi számaiban már tíz szakember életének mozzanataival találkozhattak a Tisztelt Olvasók. Most a mechanikai technológia kimagaslóan legnagyobb úttörőjének, Rejtő Sándornak a munkásságába nyerhetnek bepillantást, aki 1914 és 1917 között, sorrendben negyediként töltötte be a Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete elnöki tisztét.

Rejtő Sándor (1914-1917)

Rejtő Sándor Kassán született, 1853. augusztus 21-én. Már gyermekként dolgozott apja posztógyárában és tanult: Kassán és Eperjesen járt gimnáziumba. Gépészmérnöki oklevelét 1877. novemberében kapta meg. Ez volt az elsőként kiadott gépészmérnöki oklevél a királyi József-műegyetemen, ahová még Haltenberger Sándor néven vétetett föl. Közvetlenül ezt követően külföldi tanulmányútra küldte ki báró Kemény Gábor, földművelés-, ipar- és kereskedelemügyi miniszter



Rejtő Sándor¹
(1853. aug. 21., Kassa –
1928. február 4., Budapest)

a textilipar gyakorlati tanulmányozása céljából. A kiküldetése három évében gyárakban dolgozott Ausztriában, Svájcban, Belgiumban és Franciaországban, illetve megismerlített textilipari gyárakat Angliában. Külön, rendkívüli tanfolyamokat hallgatott a biethi és a lyoni szövőipari szakiskolákban. A külföldi, gyakorlati tanulmányai után

a minisztérium alkalmazta, 1882-től ipari felügyelőként. Ebben a hivatalában alkalma nyílt az elméleti és a gyakorlati tanulmányait érvényesíteni: posztógyárak, pamutszövőgyár, kötőgyárak, lenfonógyárak és textilipari műhelyek berendezésében és javításában vett részt. Ő maga igazgatta a készmárki szövő- és a kassai kötő-szakiskolát.

Rejtő Sándor 1885. szeptember 18-án a József-műegyetem gépészmérnöki szakosztályához folyamodott a textilipari technológia magántanára minősítés elnyeréséért. Próba előadását 1885. december 22-én tartotta „A fonás mechanikájának főbb tételei” címmel. A folyamodványt Pilch Ágoston – akinek a létezéséről és 16 éven át tartó tanszékvezetői működéséről szinte tündetőleg nem vesznek tudomást a jelenkori utódok –, a mechanikai technológia nyilvános rendes tanára, „teljes megnyugvással megadandónak” értékelte. Ennek és Trefort Ágoston január 8-án kelt jóváhagyásának nyomán lett Rejtő Sándor 1886. január 13-tól a textilipari technológia magántanára. A nagybeteg Pilch Ágostont váltva, 1889. május 13-tól lett Rejtő Sándor a mechanikai technológia nyilvános rendkívüli tanára, 1890. december 25-től pedig nyilvános rendes tanár. Így vezette a Mechanikai Technológiai Tanszéket

¹ A fényképet Dobránszky János készítette 2004. január 7-én a BME Polimertechnika Tanszék tanszékvezetői irodájának falán elhelyezett festményről, amely Rejtő Sándort ábrázolja; a festőművész és a festmény készítésének időpontja ismeretlen.

1924-ig, amikor – a szintén 70 évét elért *Zipernowski Károllyal* egyetemben – egy év ráadással nyugdíjba vonult. Közben, 1901-től három tanéven át a gépészmérnöki szakosztály dékánja volt. E minőségében írta alá *Kármán Tivadar* 2733-as sorszámú gépészmérnöki oklevelét (aki egy 1910-ben írt cikkében már *Kármán Tódor* néven erősen helyeselte *Rejtő Sándor* képlekenységdefinícióját), 1902-ben, és egy évvel később a *Misángyi Vilmosét*. A trianoni országcsontkítás évében (1920) választották először a Műegyetem rektorává. A második megválasztása után, egy egyetemi hallgatót ért tragikus esemény miatt, 1921 őszén lemondott a hivataláról. A rendkívül tanulságos rektori beszédei a BME OMIKK levéltárának adatbázisában megtalálhatók.

A Szabadalmi Közlöny 1. évfolyamának 1. száma² (1896. június 30.) adott hírt arról, hogy „ő fölsége kinevezte a szabadalmi tanácsba ülnökök *Rejtő Sándort*”, a 19. szám³ pedig arról, hogy „ő felsége az ezredéves országos kiállítás szervezése és rendezése körül szerzett kiváló érdemek méltánylásául /.../ *Rejtő Sándor* műegyetemi tanárnak /.../ a harmadik osztályú vaskorona-rendet adományozta”.

Rejtő Sándort 1912-ben – *Kherndl Antal* és *Rados Gusztáv* ajánlására – megválasztották a Magyar Tudományos Akadémia III. osztályának levelező tagjává, rendes tagjává pedig 1923-ban. Az 1913. november 17-én tartott akadémiai székfoglalójának címe: A maradó, vagyis az ideigtartó s a maradandó alakváltozások mechanikájának alaptételei és alkalmazásuk. Ugyanebben az évben a nemzetközi anyagvizsgálati szövetség (International Association for Testing Materials) az 1912-es New York-i kongresszusán tiszteletbeli elnökké választotta.

Az 1916-ban megalakult Szent István Akadémia rendes tagjává választotta *Rejtő Sándort*, aki 1919. február 14-én tartotta felolvasását (székfoglalóját) A régi Széchenylánc híd anyagának kimerülése címmel. A nyomtatásban is megjelent tanulmányában hangsúlyozta: azért tette vizsgálódásának tárgyává a régi híd anyagát, mert a közérdeknek kívánt eleget tenni azzal, hogy saját vizsgálataival foglal állást abban a vitában, mely az 1847-ben beépített acél láncanyagok 1914. évi kicserélésének szükségességét kétségbe vonta. Következtetése az volt, hogy a régi lánc híd anyagának kicserélése nagyon indokolt volt, ugyanis a régi láncok anyaga már a gyártás idejében a közepes minőségnél is silányabb volt, a híd használata folytán pedig a kimerülés állapotába került a nagy salak- és foszfortartalom (0,25%) miatt.

A Szent István Akadémia IV. osztályában nyert tagságáról a kommun rémuralma alatt lemondott, de lemondását annak bukása után visszavonta. 1922–27 között a Szent István Akadémia tanácsának tagja volt. *Eötvös Loránd* elnöklése idején (1916) *Rejtő Sándor* tagja volt a Matematikai és Fizikai Társulatnak. Haláláig tagja volt az Országos Ipari és Kereskedelmi Oktatási Tanácsnak.

Munkásságát számos elismerés övezte. 1903. március 21-én a *Széll Kálmán*, miniszterelnök, vezette tanács udvari tanácsosi címet adományozott neki. A Magyar

Mérnök- és Építész-Egylet 1897-ben Hollán Ernő-díjjal, majd 1916-ban egyesületi aranyéremmel jutalmazta. A Magyar Tudományos Akadémián 1925-ben – *gróf Apponyi Albert* után másodikként – elnyerte a *Kugler Mihály* által alapított Rákosi Jenő-díjat, amelynek értékét nem csak pénzdíj jelentette, hanem és sokkal inkább a célja: évről-évre oly magyar állampolgárnak ítélendő oda, aki az előző években a magyarság ügyének kiváló szolgálatot tett. Az ajánlás oly érzékletesen mutatja be *Rejtő Sándor* egész életművét, hogy az igaz tanulságul szolgálhat mindenkinek, és különösen azoknak a díjosztogatóknak, akik számára nem feltétlenül a hazának tett szolgálatok jelentik a honorálandó érdemeket; terjedelmi okokból azonban ez az ajánlás nem itt, hanem a mellékletben olvasható.

50 éves gépészmérnöki jubileuma alkalmából adták át *Rejtő Sándornak* a kormányzó ő főméltósága által adományozott, II. osztályú magyar érdemkeresztet és a pergamenten kiállított, díszes kivitelű gépészmérnöki oklevelet.

Az 1. számú, műegyetemi, gépészmérnöki oklevél átvételének 50. évfordulóján nyilvános, jubiláns ünnepélyt rendeztek a Magyar Királyi József Műegyetem Mechanikai Technológiai Intézetének előcsarnokában *Rejtő Sándor*, udvari tanácsos, nyugalmazott műegyetemi nyilvános rendes tanár tiszteletére, 1927. november 12-én szombaton, déli 1 órakor. A hálás tanítványok nevében *Misángyi Vilmos* mondott ünnepi beszédet, és leleplezte *Rejtő Sándor* mellsobrát, *Ferdinándy Gejza*, a Műegyetemi Segélyegylet elnöke, pedig bejelentette a *Rejtő Sándor* alapítvány létesítését.



Rejtő Sándor 1927-ben felállított mellszobra a Mechanikai Technológiai Tanszék előcsarnokában

Rejtő Sándor Budapesten hunyt el 1928. február 4-én; az Érdi út falának támaszkodó, monumentális síremléke a Farkasréti temetőben található.

Szily Kálmán, rektor, melegen emlékeztet meg a megboldogultról, aki a műegyetemen mint ny. r. tanár 35 évig működött, s úgy a tudomány mint a főiskolai oktatás terén elhervadhatatlan érdemeket szerzett, bejelentette, hogy a tanács nevében az elhunyt családjának a ravatalozásra felajánlotta a műegyetem diszcsarnokát, amit a család elfogadott. A temetési szertartás február 7-én délután

² Kinevezések, Szabadalmi Közlöny, I. évfolyam, 1. szám, 1896. június

³ Kitüntetések, Szabadalmi Közlöny, I. évfolyam, 19. szám, 1896. október



A Rejtő család síremléke a Farkasréti temetőben

3 órakor kezdődött a műegyetem aulájában. A rektor indítványozta, hogy az egyetemi tanács a megboldogult iránt érzett kegyeletének kifejezéséül emlékéét jegyzőkönyvileg is örökítse meg, a műegyetem épületeire a gyászlobogót tűzesse ki, az elhalálozásról gyászjelentést adjon ki, a gyászoló családhoz részvétiratot intézzen, a temetésen testületileg részt vegyen, a ravatalra koszorút helyezzen, a ravatalnál tartandó búcsúztatóra Misángyi Vilmos kapjon felkérést, és a temetésre való tekintettel a temetés napján délután 1 órától a műegyetemi előadások szüneteljenek, s végül, indítványozta, hogy Rejtő Sándor emlékére egy később meghatározandó időben emlékűnnepély tartassák. A tanács mélyen megilletődve vette tudomásul a bejelentést, s a kegyeletes indítványok mindegyikét határozattá emelte. Akkoriban még így temettek egy igazi nagy egyetemi tanárt. Nekrológját Kerékgyártó György írta meg a Magyar Mérnök- és Építész-Egylet 1928. június 10-i számában, valamint Misángyi Vilmos az Anyagvizsgálók Közlönyében.

Az Óbudai Egyetem egyik karát Rejtő Sándorról nevezték el, és szobrot állítottak a tiszteletére.



Rejtő Sándor szobra az Óbudai Egyetemen⁴

Rejtő Sándor tudományos és tanári munkássága

Rejtő Sándor korának legerősebb, nemzetközi mércéjével is kiemelkedőt alkotott a magyar anyagtechnológiai szakmák, a textilipar, a papíripar, a fémegmunkálás és az anyagvizsgálat területén. Megalapozója volt a hazai metallográfiának, lerakta a fémek anyagok, a textilek és a fa mechanikai tulajdonságainak elméleti alapjait, jelentősen előrevitte a mechanikai anyagvizsgálatokat. Túlzás nélkül rendkívülinek nevezhető az a teljesítménye, hogy már 1896-ban magyarul, 1897-ben pedig németül is könyvben adták ki az Elméleti mechanikai technológia néhány alaptétele című könyvét, hatvan éves kora után pedig négy önálló kötetben írta meg a mechanikai technológia akkori fő ágaiban – a fémek anyagok, a fa és a textil anyagok – az anyagtulajdonságok elméleti, gyakorlati és anyagvizsgálatai ismereteit összegző, monumentális szakművét. Mind a négy mű teljes egészében olvasható az Erdélyi Digitális Adattárban (www.eda.eme.ro).

Az első kötetnek⁵ – Az elméleti mechanikai technológia alapelvei és a fémek technológiája. A melegség hatása a szilárd anyagok mechanikai tulajdonságaira (1915) – A technológiáról általában című bevezetése máig érvényes meghatározást ad a technológia fogalmára.

„A technológia fogalma. A technológia (az ipari munka tudománya) felöleli a nyersanyagok sajátosságainak és azoknak az elveknek, eljárásoknak, eszközöknek és gépeknek ismertetését, amelyek segítségével a nyersanyagból használati cikkek készülnek. Ide tartozik a gyárak tervezése és a cikkek költségeinek kiszámítása is (költségvetés, kalkuláció).

A technológia felosztása. Azok az átalakítások, amelyeken a nyersanyag a feldolgozás folyamán keresztül megy, lehetnek kémiai vagy mechanikai természetűek. Eszerint a technológiát kémiai és mechanikai technológiára, vagyis a vegyi iparok és műves iparok tudományára osztjuk. Éles határt vonni a kettő között nem lehet.

A tárgyalás módja. A tárgyalás módja szerint leíró- és oknyomozó vagy elméleti technológiát különböztetünk meg. Az előbbi az eljárásoknak tisztán gyakorlati leírására szorítkozik, az utóbbi ezek természettörvényeit vizsgálja, és keresi a leghelyesebb megoldást. Az oknyomozó vagy elméleti technológiának van általános része, amely a jelenségeknek törvényeit kutatja, továbbá alkalmazott része, amely ezeknek a törvényeknek alkalmazására tanít. Az alkalmazott technológia lehet összehasonlító és különleges. Az összehasonlító egyidejűleg több anyaggal foglalkozik, és azt vizsgálja, hogy bizonyos eljárások mennyire felelnek meg az egyik vagy a másik anyagnak. A különleges technológia minden anyagot külön tárgyal, s annak legcélszerűbb feldolgozási módját kutatja. Az összehasonlító technológia tágabb látókört nyújt, de a gyakorlati érzéket kevésbé fejleszti, mint a különleges.

A technológia gyakorlati alkalmazása. A munkának kereseti forrásként való felhasználása az ipar. Amennyiben gyakorlásához főleg csak eszközöket és kézi szerszámokat használnak, kézművességnak, ha pedig a sokszor ismétlődő munkákat gépekkel végzik, gyáriparnak mondjuk. Ha a munkákat közös telepen végzik, az ipari üzem

⁴ "Rejtő Sándor" c. alkotás fotói, alkotó: Dr. Berek Lajos, Képeket készítette: Göröntsér Vera, 2014, <https://www.kozterkep.hu/24828/rejto-sandor#vetito=196444> (megtekintés dátuma: 2023.01.10.)

⁵ Rejtő Sándor: Az elméleti mechanikai technológia alapelvei és a fémek technológiája. A melegség hatása a szilárd anyagok mechanikai tulajdonságaira. KILIAN FRIGYES UTÓDA, M. KIR. EGYETEMI KÖNYVKERESKEDÉS BIZOMÁNYA, Budapest, 1915.

központosítottak, ha pedig tökéletes gépekkel bár, de a munkás lakásán végzik, háziipari üzemnek, ellenben a tökéletlen eszközökkel s csak mellékkeresetként üzött ipart népiparnak nevezzük. Minthogy a művelt nemzetek igen sok ipari cikket fogyasztanak s az ipar a nemzeti vagyon szaporításának hatályos eszköze, minden művelt nemzet egyik főtörekvése, hogy tekintélyes iparra tegyen szert.

Az ipar tényezői: a tőke, a munkás és a **technológiai ismeretek**. Csak ennek a három tényezőnek harmonikus együttműködése teremthet virágzó ipart. A tőke és a munkás törekvései sokszor szélsőségekbe jutnak s azért szükséges, hogy azok igazságosan, helyes középútra tereltesse. Ez elsősorban az ipari munka tudományában jártos mérnöknek, a technológusnak feladata. Hogy a tőke érdekeit szolgálhassa, a technológusnak tudnia kell, hogy: 1. mit, 2. miből, 3. hogyan gyártson. Hogy pedig a munkás érdekeit istápolhassa, szociális ismeretekre van szüksége.

Az első szempontból: 1. oly cikkeket gyártson, amelyeknek piacuk van, vagy amelyeknek piacot tud teremteni. Evégből ismernie kell a piacot és az ország behozatali és kiviteli viszonyait. 2. Gyártmányaihoz a célnak leginkább megfelelő (jó), de olcsó nyers- és segédanyagokat kell felhasználnia. Ezért ismernie kell a nyersanyagok termelési és piaci viszonyait, a segédanyagok gyártási helyeit, vagy beszerzésük forrásait, továbbá ezeknek az anyagoknak sajátságait. 3. A gyártást a legeredményesebb és a legolcsóbb eljárásokkal kell végeznie, sőt a gyártási műveletet úgy kell csoportosítani, hogy árucikkeit a legtökéletesebben és legolcsóbban állíthassa elő.

Ezért ismernie kell az alkalmazható eljárások törvényeit s a szükséges gépeket és eszközöket. A gépek munkaképességéről, hatásuk mértékéről és a műveletek végrehajtásának módjáról műhelyben való dolgozással főleg azért kell gyakorlati ismeretekre szert tennie, hogy igazságosan elbírálhassa a munkás tevékenységének mennyiségét és minőségét, hogy a munkás megélhetéséhez szükséges munkabért megállapíthassa. Azonkívül a költségvetés-készítéssel, a gyárvezetés technikájával is tisztában kell lennie, hogy az ipar tényezői között a szükséges kapcsolatot létesítse".

A technológiai hajtogatóvizsgálatot **Rejtő Sándor** vezette be a fémek anyagok képlékenységének jellemzésére. Az erre szolgáló vizsgáló készüléket is megtervezte, a kivitelezést pedig a porlasztó feltalálójaként híres **Csonka János** irányította, aki tanszék műhelyének vezetője volt évtizedeken át. A Rejtő-féle hajtogatóvizsgálati eljárást az 1927-ben Németországban kiadott könyvéből (Einige Prinzipien der theoretischen mechanischen Technologie der Metalle, Berlin, VDI Selbstverlag, 1927) világszerte megismerték.

Lehofer Kornél idézte fel (A hajtogatóvizsgálat újraértelmezése; Anyagvizsgálók Lapja, 2003/1), hogy **Millner Tivadarnak** a General Electric kutatólaboratóriumában, 1929-ben tett látogatása során elmondták: ismerik **Rejtő Sándor** könyvét, amelyből sok értékes ismeretet szereztek. A Rejtő-féle vizsgálatot – amely végső soron egy alakváltozás által vezérelt, kisciklusú fárasztóvizsgálat – később szabványosították; magyar nyelvű kiadása 1990-ben jelent meg, és ma is érvényben van az MSZ EN ISO 7799:2000 számú szabvány a legfeljebb 3 mm vastag lemezek és szalagok minősítésére.

Rejtő Sándort Misángyi Vilmos után **Gillemot László** követte a tanszékvezetői székben, aki így jellemezte nagy elődjét 1953-ban, a BME rektorának írt levelében: *Rejtőnek el nem vitatható érdeme az, hogy már akkor egységes alapelvekre fektette a technológiát, az ipari munka tudományát, amikor külföldön hasonló, egységes összefoglaló elmélet felépítését még csak meg sem kísérelték. Rejtő fejlesztette Magyarországon tudományos színvonalra az anyagvizsgálatot is; olyan anyagvizsgáló berendezéseket alkotott meg (szakítógépek, hajtogatógép, mikroszkópok), amelyek a kor legmagasabb színvonalát képviselték. Érdeklődési területe és működési köre a technológia minden ágára kiterjedt, úgyhogy az ő idejében a tanszék nem csak a fém szerkezeti anyagokkal, hanem a fatechnológiával, a textil-, a bőr-, a gumi-, a papír- és a malomiparral is foglalkozott.*

A BME gépészmérnöki karának mai tíz tanszéke közül négy is **Rejtő Sándor** egykori Mechanikai Technológiai Tanszékéből alakult ki.

Rejtő Sándor és a Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete

Nagy Dezső mellett **Rejtő Sándor** tekinthető a Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete megalapítójának (1897. június 16.). 1914-ben az egyesület az új elnök, **Rejtő Sándor**, kezdeményezésére az egyesület elindítja az Anyagvizsgálók Közlönye című folyóiratát; sajnálatos módon ez a kiadvány nem szerepel a MATARKA folyóiratjegyzékében.

A közlöny első lapszámának⁶ (1914. június 25.) címlapján, beköszöntőjében, ezt írja az elnök:

„Folyó évi közgyűlésünkön kifejtettem, hogy egyesületünknek szellemi kapocs létesítése céljából tudományos színvonalon álló szaklapra van szüksége, amelynek útján tagjaink a magyar tagok munkásságáról valamint a külföldnek ezirányú tevékenységéről tájékoztatást nyernének, hogy eszmetársulás alapján a tudományt előbbre vihessék. Ez a szaklap gyakorlatban működő szaktársainkat a tudomány legújabb vívmányaival ismertetné meg, hogy azokat a gyakorlati életbe hosszas előtanulmány nélkül átvihessék, s ezzel iparunk haladását és versenyképességét előmozdíthassák.

Egyesületünk tagjai lelkesedéssel fogadták ajánlatomat, de közülök sokan azt merész, sőt kivihetetlen vállalkozásnak tekintették. Én benem azonban élt a hit, hogy Magyarországon a technikai tudományok tisztelete már általános, és hogy az iparunk élén álló szakértőik ismerik a tudománynak ismerik a tudománynak az iparra gyakorolt általános hatását, és készek annak fejlődését még anyagi áldozatok árán is elősegíteni.

Hitemben nem csalódtam. Nagy ipari vállalatok vezetői, akikkel szóban vagy írásban érintkezésbe léptem, minden habozás nélkül, készséggel vállalkoztak tervem végrehajtásának támogatására. E célból egyesületünkbe rendes tagul, de önként elvállalt, magasabb évi díj fizetésének kötelezettségével, beléptek”.

Rejtő Sándor életútjának eme vázlatos felidézésével talán sikerül némi szakmai és erkölcsi fellobbanást elősegíteni az anyagvizsgálat szakterületén dolgozó mai szakmai szervezetekben, amire bizony igencsak szükség lenne!

Dobránszky János
Tóth László

⁶ Elnöki beköszöntő, Anyagvizsgálók Közlönye 1914. I. évfolyam 1. szám (1914. június 25.)

Melléklet

(Forrás: Akadémiai Értesítő, XXXVI. kötet, 421–425. füzet, 1925. jan.–május, 167–170. oldal)

Jelentés

a Kugler Mihály által alapított Rákosi Jenő-díjról

A Kugler Mihály, János és Henrik nevére tett alapítvány (egymillió korona) évi kamatai, az alapítvány ügyrendi szabályzata szerint évről-évre oly magyar állampolgárnak ítélendők oda, aki az előző években (1924. és 1925-ben) a magyarországi ügyének kiváló szolgálatot tett.

Az Akadémia által a múlt évben, a múlt évi díjra leendő jelölés céljából kiküldött vegyes bizottság három évi ciklus tartamára működik; tavaly sikeresen végezte feladatát.

A folyó 1925. évben esedékes díjra leendő javaslattevél végezt a bizottság f. évi április hó 24. napján tartott ülést és alapos megbeszélés és igen élénk eszmecsere után egyhangúlag abban állapodott meg, hogy e díjra Rejtő Sándort, Akadémiánk rendes tagját, a budapesti kir. József-műegyetem jelenleg nyugalmazott, de előzőleg negyven esztendőn át volt nyilvános rendes tanárát hozza javaslatba.

Ezt az ajánlást a bizottság következőképpen okolja meg:

Rejtő Sándor műszaki tanulmányai befejeztével annak idején mint iparfelügyelő kezdte pályáját. Már fiatal kezdő korában, iparfelügyelői hatáskörében, kitartással és ritka szakértelemmel iparkodott a fémeket, a fát és a szálas anyagokat feldolgozó iparágak dolgán lendíteni. Működésének nyomát az 1885. év körül megindult ipari fejlődés számos mozzanatában megtaláljuk. Hogy hazánkban, de Európában egyik legnagyobb ipari vállalata, Weiss Manfrédnek csepei nagy gyártelepe, szerény kis sárgarézöntő műhelyből fejlődött mai nagyságára, részben neki köszönhető; a kezdet nehézségei között Rejtő Sándor volt az, aki mint iparfelügyelő önzetlen tanáccsal, útbaigazítással, sok-sok életre-, való gondolat felvetésével ezt a hatalmas fejlődési folyamatot nagyban előmozdította.

Rejtő Sándor képzelőtehetsége, nagy tudása, hazafias lelkesedése, vas-szorgalommal gyűjtött szaktudása, műegyetemi oktató működésének ideje alatt jutott teljes érvényre. Rejtő Sándor kerek 40 évig nevelte a Magy. Kir. József-műegyetemen a mérnöki generáció egész sorát. A kezdet nehézségeivel küzdve olyan időben vetette meg a mechanikai technológia rendszeres oktatásának alapjait, amikor a külföldi egyetemeken e gyakorlati tudományág tanításában még nem alakult ki egységes oktatási gyakorlat.

Szívós kitartással szervezte meg a Műegyetem technológiai szertárát, teremtette elő a gyakorlati oktatáshoz szükséges felszereléseket és sok akadályt leküzdve sikerült felköltenie e nagy szorgalmat, figyelmet és elmélyedést igénylő nehéz tudomány minden ága iránt hallgatósága figyelmét. Az oktatásban valóságos iskolai példát szolgáltatott arra, miképpen kell az elméleti kiképzést a gyakorlati kiképzéssel szoros összhangba hozni és együtt fejleszteni. Tanítás közben megértéssel, jóindulattal, de igazságos szigorral szoktatta hallgatóit a lelkiismeretes munkára. A tanításnak e következetes módjától akkor sem tért el, mikor ez népszerűségének rovására ment. Egyidejűleg önálló kutatást is folytatva, számos új elméleti és gyakorlati igazságot fedezett fel, és itthon is, külföldön is tekintélyt tudott magának szerezni, úgy az elmélet, mint a gyakorlat terén. Tanácsaival minden alkalommal rendelkezésre állott, és tudásának gazdag kincseiből ellenszolgáltatás nélkül szívesen jutott tanítványainak is, meg a magyar vállalatoknak is; ha tanácsért hozzá fordultak.

Nagyszabású működést fejtett ki az anyagvizsgálat terén is; a nemzetközi anyagvizsgáló kongresszusokon hazánk és annak képviselői

mindig előkelő módon szerepeltek; az itt elért sikerek nagy részben neki és a nevelte új generációnak köszönhetőek.

A Magyar Tudományos Akadémia 1912-ben levelező tagnak, majd 1923-ban rendes tagnak választotta meg. Számos elismerésben és kitüntetésben volt része, de a tudományt a tudományért ápolva, egész erejét és idejét az eszményi célnak szentelve, sohasem kereste az anyagi javakat; ilyenekhez nem is jutott. Habár a fentiekben vázolt tevékenysége alapján rászolgált arra, hogy jó hazafinak nevezzük, különösen ki kell emelnünk azt a nagy lelkesedést és példátlan munkát, amelyet a magyar ipar fejlesztésének érdekében kifejtett. Mindenütt, minden alkalommal hirdette a magyar munkásnak és a magyar mérnöknek az iparra való rátermettségét, és harcolt azért az igazságért, hogy hazánk boldogulását, anyagi haladását és a magyar nemzet erejét a földművelés és ipar terén kell kiküzdenünk.

Működésének koronája és hazafias cselekedeteinek egyik legszebbje, hogy a háború folyamán és után, lelki szenvedések és talán nélkülözések között is megírta a mechanikai technológia négy kötetes nagy magyar tankönyvét, és ezzel megteremtette e téren a hazai irodalom első összefoglaló és rendszeres szakmunkáját. Műve valóságos kincsesháza az elméleti és gyakorlati tudásnak. E munka megírásával, különösen a szöveget és a fonást tárgyaló negyedik kötetben, melynek második kiadását 1923-ban írta meg, végzett valóságos honmentő munkát.

Nagy mértékben, az ő oktató és nevelő munkájának, valamint a hazai ipar fejlesztésére irányuló tevékenységének köszönhető, hogy Csonkamagyarország fonó- és szövőipara az ország megcsonkítása után bámulatra méltó gyors fejlődésnek indult. Ennek jelentősége kitűnik abból, hogy a háború előtt szövött és fonott, valamint kötött árukért kerek 460 millió aranykoronával adóztunk évenként a külföldnek. Ez összegből kb. 220 millió korona az, amivel a külföldnek fizetett munkabér, vállalati kereset, tőkeamat és egyebek címén az osztrákoknak és cseheknek gyarapodásához hozzájárultunk. 1924-ben ugyanilyen árukért kereken 190 millió aranykoronát küldtünk a külföldre, amiből körülbelül 80 millió korona ment munkabér és egyebek címén a gazdasági életünket tönkretenni akaró szomszédokhoz. Ha 2–3 év alatt sikerülni fog – a megkezdett úton tovább haladva – e rettenetes vérvesztéséget megszüntetnünk, ez elsősorban Rejtő Sándor 40 éves munkájának köszönhető.

Rejtő Sándor 1923-ban 70. évét betöltve, 1924 telén vonult nyugalomba mint műegyetemi nyilvános rendes tanár, de áldásos munkáját teljes erővel tovább folytatja. Polgári erényeivel, hazafias működésével és puritán jellemével igen nagy befolyást gyakorolt az utolsó negyven évben nevelt magyar mérnöki gárda erkölcsi felfogására is.

Budapest, 1925. április 24.

Concha Győző, ig. és r. t. másodelnök
Rákosi Jenő, t. t.

Fröhlich Izidor, ig. és r. t. előadó, o. titkár.
Fináczy Ernő, m. t. o. titkár
Kugler Mihály, alapítványozó

Beszélgetés Trampus Péterrel

Interview with Péter Trampus

Kérdező/Questioner: Skopál István

Az évek jönnek, mennek és hozzák magukkal az újabb kiemelkedő évfordulókat, születésnapokat. Ez év végén szövetségünk, a MAROVISZ negyedszázados jubileumát ünnepelhetjük és köszönhetjük szövetségünk elnökét, Trampus Péter professzort, aki nemrég töltötte be 75. életévét.

Gépészmérnökként végeztél, dolgoztál a Paksi Atomerőműben és a Nemzetközi Atomenergia Ügynökségnél, oktattál/oktatsz a Debreceni és a Dunaújvárosi Egyetemen, tanácsadóként dolgozol saját vállalkozásodban, ugyanakkor mindig kapcsolatban voltál – és vagy – a roncsolásmentes anyagvizsgálattal is. Foglald össze, légy szíves, hogyan alakult az immár öt évtizedes pályád!

Már az egyetemi évek alatt a mechanikai anyagtechnológia, anyagvizsgálat felé közeledtem, ilyen témájú Tudományos Diákkörben dolgoztam (idegennyelvűben, ami Gillemot professzor forradalmi újítása volt a 60-as évek végén). Ehhez illeszkedett a diplomatervem témája is, ami egy megalakító szerszámacél mechanikai tulajdonságainak a meghatározása volt. Ugyan tanulmányi szerződés kötött a Csepeli Tervező Intézethez, de érdeklődésem, diplomamunkám témája a Csepeli Acélműbe vitt. Itt egy évet sem töltöttem el kutatómérnökként, lényegében még ismerkedtem a területtel, amikor Somogyi György, a MEO vezetője felkért az osztály Anyagvizsgáló Laboratóriumának a vezetésére. Újdonsült (és gyakorlatlan) mérnökként, mindenfajta vezetői tapasztalat nélkül mondtam igent. Voltak nehézségeim, inkább a vezetés terén, mint szakmailag. A labor egy kohászati üzemben szükséges vizsgálatokkal foglalkozott, azaz volt analitikai labor (nedves és műszeres), mechanikai, metallográfiai és roncsolásmentes vizsgálat. A vizsgálatok mellett feladatunk volt a labor tevékenységének a fejlesztése, új emberek felvétele, eszközök beszerzése. Talán a roncsolásmentes vizsgálat volt itt számomra a legnagyobb újdonság, élveztem, hogy új területet kezdek megismerni. Sikerült olyan – hazai viszonylatban új – vizsgálóeszközt beszerezni (Förster Magnatest), amellyel anyagminőség szerinti válogatást végeztünk, valamint ennél igényesebb feladatokat is, úgymint hőkezelési állapottal összefüggésbe hozható anyagtulajdonságot (keménységet) határoztunk meg. Elsősorban a Gépipari Tudományos Egyesület Anyagvizsgáló Szakosztályában folyó munkába történő bekapcsolódás segített újabb vizsgálati eljárások megismeréséhez. Ilyen volt az örvényáramos vizsgálat. Egy orosz gyártmányú vizsgáló készüléket telepítettem egy csőgyártó sorba, ami alkalmas



volt a folyamatos vizsgálatra és a hibásnak minősített csőszakaszok azonosítására.

1981 végén, egy törésmechanikai szemináriumon szegezett nekem egy kérdést az akkor épülő Paksi Atomerőmű anyagvizsgáló laboratóriumának vezetője: a már csaknem összeállt szervezetbe osztályvezetőt kerestek. Az osztálynak az anyagvizsgálat mellett bizonyos minőségellenőrzési feladatokat kellett még végeznie. Nem kis fejfájást okozott a kérdés. A szakmai kihívás mellett, amit akkor még fel sem fogtam, sokkal súlyosabb dilemma volt a család (feleségem és három kisgyermekünk) kimozdítása a fővárosból.

Ez utóbbi nem szerepelt az elképzeléseinkben, de némi vajdást követően, a család támogatásával és munkahelyi környezetem értetlensége ellenére, döntöttünk. 1982 februárjában beléptem a Paksi Atomerőmű Vállalathoz. Leszámlítva a váltással, az új környezet megszokásával járó nehézségeket, az erőmű létesítésének számomra eladdig teljesen idegen és embert nem kímélő munkatempóját, a rám nehezedő felelősséget, hamar rádőbbsentem, hogy milyen nagyszerű helyre kerültem. Megismerkedtem az atomerőműben alkalmazott anyagvizsgálatokkal, kitérult a világ, mert eredményeinket, kételyeinket meg tudtuk és gyakran meg is kellett osztani és vitatni más atomerőművekben dolgozó partnerekkel, ami rengeteg új ismeretet és szakmai kapcsolatot hozott. A napi rutin mellett részt vehettem a laborok, beleértve a roncsolásmentes vizsgáló laborot, továbbá a telepített vizsgáló berendezések fejlesztésében. Izgalmas, nagyképszerűség nélkül kijelenthetem, hogy ipartörténeti jelentőségű munka volt. A szép oldalhoz tartozik, hogy a hazai roncsolásmentes vizsgáló szakemberek krémje dolgozott az osztályomon, öröm volt a közös munka, és sokat tanultam tőlük.

1996 és 2003 között, a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) mérnökeként sokrétű feladatunk volt. Ezek nagyrészt az üzemelő atomerőművek élettartam-gazdálkodásával voltak kapcsolatosak, részben fejlődő országok nukleáris programjainak alakítását szolgálták, és volt közöttük természetesen roncsolásmentes vizsgálat és időszakos ellenőrzés is. Ebben az időszakban dolgozták ki és vezették be világszerte a vizsgálat-minősítést, aminek hazai bevezetésében részt vettem.

A NAÜ-ben töltött szolgálatot követően saját gazdasági társaságot alapítottam, amelynek tevékenysége a Paksi Atomerőmű üzemidő-hosszabbításának műszaki megvalósításához kapcsolódott. Munkáink közül kiemelhető az ASME Kazánok és Nyomástartó Edények Kódja időszakos ellenőrzéssel foglalkozó kötetének hazai környezetbe történő adaptálása és engedélyeztetésének támogatása.

Az MTA doktora cím megszerzését követően (vagy annak logikus következményeként) 2008-ban szegődtem el a Debreceni Egyetemhez, majd 2011-től 2017-ig a Dunaújvárosi Főiskola (2016-tól Dunaújvárosi Egyetem) alkalmazásában voltam, ma az egyetem által adományozott professor emeritus címet viselem. Oktatói és kutatói tevékenységem a gépész- és anyagmérnöki területre terjedt ki, amely természetesen magában foglalja a roncsolásmentes vizsgálatot. A graduális képzéseken túl részt vettem és veszek posztgraduális kurzusok kidolgozásában és egyes tárgyak oktatásában több hazai egyetemen, ilyenek például az Atomerőmű üzemeltetési szakmérnöki vagy a Szerkezetintegritási és roncsolásmentes vizsgáló szakmérnöki kurzus. Ez utóbbi, amit a Debreceni Egyetem kínál, tekinthető a Nemzetközi Roncsolásmentes Vizsgálati Akadémia tagjaként általam javasolt „NDE integrity engineering” mérnöki terület pilot kurzusának. A Dunaújvárosi Egyetemen az utóbbi időben a Paks II Atomerőmű létesítését támogató Kompetencia- és Kutatóközpont koncepciójának a kidolgozásával, a laborok fejlesztésével és részben az új blokkok engedélyezésével összefüggő, elsősorban roncsolásmentes vizsgálati feladatokkal vagyok elfoglalva.

Azzal együtt, hogy mérnöki munkám jelentős részét teszi ki a roncsolásmentes vizsgálat, ezt a területet mindig komplex módon, a mérnöki szerkezetek biztonsága, szerkezeti integritása egy elemének tekintetem és figyelmet fordítottam a szerkezeti integritás egyéb elemeinek az elemzésére is.

Hogyan értékeled nemzetközi összehasonlításban a hazai anyagvizsgálat helyzetét, színvonalát?

2009-ben választottak az Európai Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség (EFNDT) igazgató tanácsának tagjává, 3 évvel később alelnökévé, 2015-ben elnökévé. Ezzel folyamatos nemzetközi kitekintést szereztem. Később más nemzetközi roncsolásmentes vizsgálati szervezetek munkájába is bekapcsolódtam, van olyan, amelyiknek elnöke vagyok.

Úgy gondolom, hogy a hazai helyzet nem független a magyar gazdaság általános helyzetétől. Gazdaságunk hajtóereje az itt megtelepedett, fejlett külföldi országokból származó technológiákban van. Jellemzően ezek a – döntően autóipari – cégek a technológiai sort és amennyiben releváns, akkor az abba integrált roncsolásmentes vizsgálatot az anyaországból hozzák. Ez nem segíti a hazai vizsgálati technológiák, az általános színvonal, valamint a vizsgálók tudásszintjének a fejlődését. Eltűnt a hazai vizsgálókészülék-fejlesztés és -gyártás, alig-alig van, talán csak egy-egy személyhez köthető a ma folyó kutatási tevékenység ezen a területen.

Mindez nem jelenti azt, hogy a néhány nagyvállalat szervezetéhez tartozó vagy a szolgáltató piacon működő roncsolásmentes vizsgáló laborok ne dolgoznának teljes erőbedobással, lelkiismeretesen. Utóbbiak helyzete nem rózsás, a gazdaság állapota kivétel rájuk. Az összképet rontja az általános, többnyire negatív megítélés („...a roncsolásmentes vizsgálat szükséges rossz, időt és pénzt rabol...”), ami a gyártási folyamat végén lévő, illetve az üzemelő berendezések leállításának utolsó időszakára ütemezett vizsgálatokkal kapcsolatban kialakult, és jelenleg nem látható ennek a nézetnek a megváltozása.

Ami a kutatás-fejlesztést illeti: Milyen hajtóerő hozhatna létre manapság olyan műhelyeket, mint amilyenek 40-50 éve – tegyük hozzá, dollárínséges és embargóval terhelt időkben – ipari és akadémiai kutatóintézetekben, illetve egyetemi tanszékeken folytattak – többek között – RMV irányú kutatásokat?

Elég egyszerűen megválaszolható a kérdés. Kormányzati szándék, iparfejlesztési koncepció és forrás kell a kutatás-fejlesztés újjáélesztéséhez. Azt, hogy napjainkban melyik hiányzik, döntse el mindenki maga. A kutatás ma egyébként is európai szinten integrált tevékenység, azaz úgy lehet forráshoz jutni, ha az Európai Unió által szponzorált – nemzetközi szintű (jelenleg Horizon 2020) vagy itthon meghirdetett ún. operatív – programokba integrálódnak a hazai kutatóhelyek. Ez a pályázati tevékenység nem egyszerű, de járható út. Részben megoldja a forrás kérdését és részben, elsősorban a hazai operatív programok esetében, a koncepciót is kezeli, amennyiben található a meghirdetett programok között olyan, ami a roncsolásmentes vizsgálat területére irányul. A válaszban az is benne van, hogy a 40-50 évvel ezelőtt volt, elzárt gazdaságot egy erősen integrált rendszer váltotta fel.

Milyennek látod a szakmánk jövőjét globálisan? Melyek a ma látható, fő fejlődési irányok?

A roncsolásmentes vizsgálat folyamatosan fejlődik. A fejlődés hajtóereje az általános technológiai fejlődésen, az abból adódó és kézenfekvő technikai lehetőségeken túl a társadalom kockázattűrő képességének a folyamatos csökkenése, és ennek eredményeként a hatósági szabályozás szigorodása. A fejlődést természetes módon átítatja a korunkat jellemző digitális átalakulás. Megjelent az Ipar 4.0 analógiájára, pontosabban annak kiszolgálására, az NDE 4.0 (Non-Destructive Evaluation 4.0), ami jól jellemzi a világ roncsolásmentes vizsgáló közösségének „innovatív” képességét. Az NDE 4.0 ma még csak egy elérendő cél, de az a tény, hogy szisztematikusan foglalkozik vele a világ, igazolja a fontosságát és a benne rejlő lehetőségeket.

Ha a fejlődési irányokat nézzük, akkor a következők dominálnak. Az információs technológia, a nano- és a mikroelektronika fejlődése következtében ma már olyan architektúrák vannak, amelyek képesek különböző vizsgálati technológiák integrálására. Megindult a szoftver- és hardver-eszközök határainak összemosisódása az

eszközök egyre „intelligensebbé” válása következtében, sőt a vékonyréteg-technológia fejlődése eredményeként már kvantumfizikai hatások is kimérhetők. Az egyre érzékenyebb szenzorok kiszolgálják a „károsodás korai detektálása” koncepciót, aminek lényege az, hogy a roncsolásmentes vizsgálattal ne makroszkopikus méretűre növekedett repedéseket detektáljanak, hanem azokat a lokális területeket keressék meg, ahol a repedések keletkezésének a valószínűsége a legnagyobb. Az sem zárható ki, hogy a jelenlegi gyakorlatunkból ismert roncsolásmentes vizsgálatot valamikor fel fogja váltani a szerkezet „globális egészségének” a monitorozása (Structural Health Monitoring, SHM). Egyre fontosabb helyet foglal el ezen a területén is a numerikus szimuláció, elsősorban azokban az iparágakban, amelyek igényes vizsgálati eljárásokkal dolgoznak (pl. repülőgépgyártás, közlekedés, energiaipar). Összegezve: a roncsolásmentes vizsgálat rohamos sebességgel lép át a kézművességből a „high-tech” iparba.

Mit tudnak hozzátenni – ha egyáltalán tudnak – a globális fejlődéshez a magyarországi szakemberek?

A hazai szakma, ahogy korábban vázoltam, a gazdaság roncsolásmentes vizsgálat irányába mutatott viszonylagos igénytelensége, a kutatási tevékenység szegényes mivolta következtében jelenleg nincs abban a helyzetben, hogy észrevehető hatást gyakoroljon a globális fejlődésre. Alapvetőnek tartom, hogy minél többen ismerjék meg a roncsolásmentes vizsgálat tényleges értékét, beleértve a vizsgálatok felhasználóit is. Ehhez a jelenleginél lényegesen hangsúlyosabban kell megjelennie a roncsolásmentes vizsgálatnak a műszaki felsőoktatásban. A szakma képviselőinek folyamatosan követniük kell a nemzetközi szakirodalmat, részt kell venniük nemzetközi rendezvényeken, nemzetközi kutatásokban, be kell kapcsolódniuk a nemzetközi roncsolásmentes szervezetek életébe. Mindezekhez motiváltság, nyelvtudás, munkáltatói támogatás szükséges. Első lépésnek, tanuló időszaknak mindenkinek a MAROVISZ napi életében való részvételt javasolnám.

Sok kérdés tolul fel az általad elmondottak nyomán, háromra kérek választ Tőled:

Gondolva a hazai IT-szektor szép hagyományaira, nem kínálgazik komoly lehetőség, hogy magyar szakemberek nemzetközi szinten is sikeresen részt vegyenek – elsősorban mesterséges intelligencián alapuló – RMV szoftverek fejlesztésében?

Természetesen ki kell / kellene használni a hazai tudást ezen a területen. Ismereteim szerint mesterséges intelligenciával foglalkoznak egyetemeken és kutató intézetekben, némelyikben igen magas színvonalon. Biztosan vannak és lesznek olyan kutatási eredmények, amelyek nemzetközi szinten is megállják a helyüket, találkoztam ilyenekkel egy-egy nemzetközi projektben történő tevékenységem során. Én egyelőre azt a letisztult koncepciót

nem látom, amelyik a jelenleginél jobban motiválná a kutatóhelyeket vagy az egyes kutatókat.

Tudna-e ebben a MAROVISZ valamilyen katalizáló szerepet játszani, például összehozva a gyakorló vizsgáló és a vállalkozó kedvű IT szakembereket?

Erre a kérdésre csak egy válasz lehetséges: igen, és nemcsak tudna, hanem a MAROVISZ-nak el is kellene indulnia ezen az úton. Napirendre fogom tűzni ezt a kérdést az elnökség soron következő üléseinek egyikén.

Talán növelné a szakmánk presztizsét egyrészt a felsőoktatásban, másrészt a kutató-fejlesztő területeken, ha a Szövetség díjat alapítana a legjobb RMV tárgyú szakdolgozatok, illetve publikációk és megvalósított eszközök honorálására. Mi a véleményed erről (anélkül, hogy itt a részletekbe belemennénk)?

Van a Szövetségnek néhány együttműködési megállapodása hazai egyetemekkel (Debreceni Egyetem, Dunaújvárosi Egyetem) és kutatóintézetekkel (Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.). Ezekben rendre szerepel szakdolgozat- és diplomatervezési témák kiírása, a tervek konzultálása. Sajnos a megállapodásokban írt dolgok aprópénzre váltása lassan vagy egyáltalán nem halad. De talán innen indulva a kérdésben foglalt javaslat megfontolható és megvalósítható. Ez egyúttal a fiatal korosztálynak a Szövetség életébe történő bekapcsolását is segítené.

2005 óta vagy a MAROVISZ elnöke. Mit ért el, miben fejlődött az elmúlt 17 évben a Szövetségünk, és milyen célkitűzéseid voltak, melyeket nem sikerült megvalósítani?

A Szövetség beágyazódott a hazai szakmai közéletbe, szinte valamennyi – egy nemzeti roncsolásmentes vizsgálati szövetségtől elvárható – területen aktív munkát végez. Oktat, személytanúsítást folytat, körvizsgálatokat szervez, részt vesz a szabványosításban, folyóiratot ad ki, konferenciákat és egyéb rendezvényeket szervez, továbbá képviseli a hazai roncsolásmentes vizsgálók közösségét nemzetközi szinten. Ez a jó oldal. Ami számomra kudarc, mert személyesen is az átlagosnál több energiát öltem bele lényegében eredménytelenül, az, hogy ugyan rendre megfogalmazzuk, de nem értük el, hogy rang legyen a MAROVISZ-tagság. Előnyt – akár gazdasági előnyt is – jelentsen a tagság és büszkének legyenek a tagok arra, hogy ehhez a Szövetséghez tartoznak. Ennek a sikeretelenségnek ki kell elemezni az okait és szívósan neki kell rugaszkodnunk megint. Említenem kell egy másik területet az árnyékos oldalon, ez a szakbizottsági munka. Nincsenek a MAROVISZ-nak élő, dolgozó szakbizottságai. Enélkül pedig a Szövetség kritizálható, és tagjaink kritizálnak is, hogy mit kapnak a tagdíjukért. Ha fel tudnánk mutatni egy értékes szakmai programot, azzal a kritikusok hangja elhalkulna. Ez utóbbinak oka lehet, hogy nem a

megfelelő embereket kértük fel a szakbizottságok vezetésére, természetesen tisztelet a kivételnek, de oka lehet az is, hogy az érintettek (tagjaink és potenciális tagjaink) energiája kimerül a napi bevétel megszerzésében, és szabadidejüket inkább pihenésre, mint ismereteik bővítésére használják.

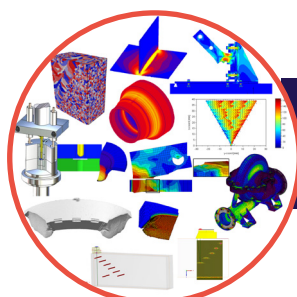
25 éves lett a MAROVISZ. Egy évvel ezelőtt, egy kibővített elnökségi ülésen úgy fogalmaztál, hogy az egyesületünket jobban ismerik és elismerik a nemzetközi téren, mint itthon. Miért alakult ez így, és hogyan javíthatunk a hazai reputáción?

A Szövetség mérsékelt hazai reputációja nyilván betudható a vezetés (elnökség) nem megfelelő működésének, de összefügghet más tényezőkkel is. Ilyen a sajnálatos és érthetetlen módon megosztott szakma, amit emberi

gyengeség, szakmai és anyagi féltékenységek, gazdasági frusztráció és hasonlóak okozhatnak. A vizsgáló laborok már említett helyzete is hozzájárulhat a megosztottsághoz. A Szövetség szempontjából az fogja a kiutat jelenteni, ha szakmai és üzleti szempontból is vonzó programokat tudunk kínálni tagjainknak és azoknak, akiket tagjaink között szeretnénk tudni, továbbá tagjaink – elsősorban jogi tagjaink – érzik majd saját gazdasági tevékenységükben a tagság előnyeit. Dolgoznunk kell ezeknek a megvalósításán.

Ehhez és minden más, ma is szerteágazó tevékenységedhez kívánok Neked nagyon jó egészséget! Kívánom együtt, hogy évekig legyen még erőd támogatni a Szövetségünk és a magyar roncsolásmentes vizsgálati szakma továbbfejlődését és megújulását. Kedves Péter, Isten éltesse!

Szerkezetintegritás és Gyártástechnológia Osztály



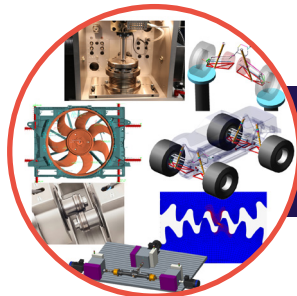
Komplex szerkezetek vizsgálata,
hegesztett kötések elemzése

Új és meglévő erőművi rendszer és
rendszer elemek szakértése

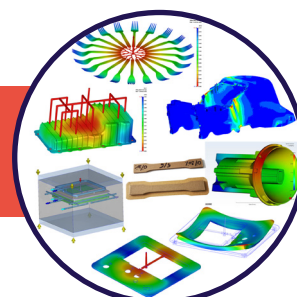
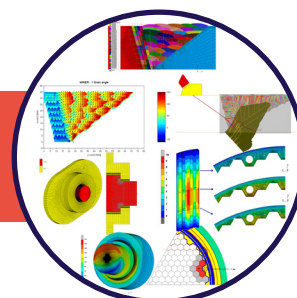


Digitális Valóság Laboratórium

Műanyag- és additív technológiai
elemzések, szimulációk



Járműdinamika, erőátvitel,
hajtáslánc, tribológia



Egy híres anyagvizsgáló: Egon Orowan

Egon Orowan, a renowned materials scientist and technologist

Hargittai István, Hargittai Balázs

Egon Orowan (Orován Egon, 1902-1989) Budapesten született, apja a Műegyetemen végzett gépészmérnök volt, anyja háztartásbeli. Orowan a IX. kerületi Főgimnáziumban érettségizett. További életútját meghatározták a zsidóüldözések, előbb Magyarországon, majd Németországban. Éppen amikor leérettségizett és tovább szeretett volna tanulni, lépett életbe az ún. numerus clausus törvény és Orowan Bécsben tanult tovább. Két év után Berlinbe ment és ott fejezte be tanulmányait a Berliini Műszaki Egyetemen. Végzés után Richard Becker professzor asszisztense lett, aki mellett egy ideig Wigner Jenő is dolgozott. Orowan Berlinben szerezte meg doktorátusát 1933-ban, kutatásait a szilárd testek fizikájában végezte. A következőkben otthon, Budapesten próbált elhelyezkedni, egy ideig a Tungsram alkalmazta, de a jövő kilátástalan volt, pedig már nemzetközileg számon tartották, mert fontos eredményei voltak a diszlokációk elméletének kialakításában és a képlékeny alakváltozás megértésében. Meghívták a londoni Royal Society által szervezett Nemzetközi Fizikai Konferenciára 1934-ben, amely a világ vezető fizikusainak nagy seregszemléje volt. A résztvevők egy csoportjában mutatja Orowant az egyik itt közölt fénykép. A másik fénykép egy későbbi, ugyancsak tekintélyes tudományos tanácskozás alkalmával készült.

1937-ben Orowant meghívták az angliai Birmingham Egyetemre és a következő 3 évben a fizika tanszéken dolgozott Rudolf Peierls munkatársaként. A fémek fáradásával és plaszticitásával foglalkozott. Vizsgálati eszközöket tervezett és épített roncsolásmentes anyagvizsgálóra. Neki is köszönhető, hogy a Birmingham Egyetem hamarosan a világ élvonalába tartozó metallurgiai tanszékkal büszkélkedhetett. 1939-ben a világhíres Cavendish Laboratóriumba került Cambridgeben, amelyet a Nobel-díjas krisztallográfus W. Lawrence Bragg igazgatott.

Orowan egyre inkább a védelmi kutatásokra helyezte munkájának hangsúlyát. Egyik fontos eredménye azoknak a fémeknek a javítása volt, amelyeket a hajóépítésben alkalmaztak. Nagy-Britannia számára létfontosságú volt az Atlanti Óceánon keresztül történő hajózás, mert ez biztosította a hadianyag utánpótlást és az élelmiszer-ellátást a háború idején. Gyakran fordultak elő balesetek a kereskedelmi hajók acélszerkezetében bekövetkezett törések miatt. A feladatok megoldásában a fizikában és az anyagvizsgálatban egyaránt otthonosan mozgó Orowannak kitüntetett szerep jutott.

A háborút követő időkben viszont már kevésbé érezte magát otthon az előkelő angol egyetemi életben és amikor egy különösen vonzó meghívást kapott Amerikából, áttelapult az Egyesült Államokba. A tekintélyes Massachusetts Technológiai Egyetem (Massachusetts Institute of Technology, MIT) gépészmérnöki tanszékének professzora lett és hamarosan megbízták az anyagvizsgálati részleg vezetésével. Az idő múlásával érdeklődési köre egyre tágabb lett, bár az anyagvizsgálat mindig munkájának középpontjában maradt. Foglalkozott geológiával, filozófiával és szociológiával is és megoldásokat ajánlott feszítő társadalompolitikai problémákra. De igazán az anyagok és nem a társadalom területén nyilvánult meg alkotói tehetsége. Amikor 1986-ban a Challenger amerikai űrhajó felrobbant, az űrhajó burkolóanyagának merevségét és törékenységét hibáztatta, ami nem volt messze azoktól a megállapításoktól, amelyekre a hivatalos vizsgálat jutott. Véleménye olyan tekintélyes helyen is megjelent, mint a világszerte olvasott Scientific American. Különösen nehezményezte, hogy az űrhajó tervezői nem foglalkoztak az anyagok tulajdonságainak hőmérséklet-függésével.



Egon Orowan a kép közepén az 1934-es londoni Nemzetközi Fizikai Konferencián és ugyancsak a kép közepén 1951-ben a brüsszeli Solvay konferencián (az ülő W. Lawrence Bragg mögött áll)

Orowan sok kitüntetést és elismerést kapott. Különösen értékes volt számára, hogy 1947-ben megválasztották a londoni Royal Society (az angol tudományos akadémia) tagjává, 1969-ben pedig az amerikai Nemzeti Tudományos Akadémia tagja lett. Hosszú életet élt, boldog házasságban. Felesége, Jolan Schonfeld, Bartók Béla egykori tanítványa volt. Lányuk elismert egyetemi könyvtárosként működött. Az MIT-n Orowan és a szintén ott professzor magyar emigráns, elméleti fizikus, Tisza László jó barátok lettek. Közös hobbijuknak megfelelően együtt látogattak meg botanikus kerteket. A növények szeretetén túl sok más is összekötötte a két idős tudóst. Mindketten Magyarországról származtak, mindketten külföldre kényszerültek továbbtanulásukhoz, mindketten Európában lettek nemzetközileg elismert tudósok, és mindketten Amerikában lettek végleges otthonra – soruk meglehetősen tipikus tudós emigráns sors volt.

Emlékezés Prohászka János professzorra

In memory of Professor János Prohászka

Szakmánk, a műszaki anyagtudomány nagyjaira való emlékezés mindannyiunk kötelessége. E feladat teljesítésekor azonban különös gondossággal kell mondatainkat megfogalmazni, hiszen a visszaemlékező sorokat olvashatják olyanok, akik még személyesen ismerték, és vannak olyanok, akik már csak a visszaemlékezések alapján alkotnak képet róla. Vigyázni kell arra, hogy a visszaemlékező sorok ne torzítsák a kialakult képet, illetve az új generációkban is helyes kép alakuljon ki a professzor személyéről. Arra még fokozottabban kell figyelemmel lenni, hogy a személyes visszaemlékezés ne a visszaemlékezőről, hanem róla szóljon.

Dr. Prohászka János professzor úrral egyetemi éveim után ismerkedtem meg, édesapám, dr. Verő József és a közöttük lévő baráti viszonyunk köszönhetően. Ebben az időben fő kutatási területe a fémek anyagok krisztallitjainak maradási idomok segítségével történő orientáció-meghatározása volt. Ehhez a kutatási irányhoz kapcsolódtak az én emissziós elektronmikroszkópos vizsgálataim is. A szemcsék egyedi orientációjának meghatározására kiváló lehetőséget biztosítottak az in situ deformációs kísérletek során keletkező csúszási sávok, illetve a nagyhőmérsékletű vizsgálataim során az átalakuló acélok ausztenit krisztallitjaiban megjelenő különböző helyzetű újrakristályosodási ikrek leképzése. Ez utóbbi téma keltette fel érdeklődését, különösen akkor, amikor olyan felvételeket tudtam mutatni neki, amelyeken egy-egy krisztallitban legalább három, de sokszor négy különböző helyzetű ikertartomány volt látható. A professzor úr, látva ezeket a felvételeket, papírt ragadott, és elmagyarázta, hogy az alapszemcse orientációjának ismeretében hogyan lehet kiszámítani az ikertartományok felületre merőleges irányát. Az orientáció és az egyes kristálytartományok „szürkeségi szintje” alapján sikerült az orientációs egységháromszögben ezt az összefüggést ábrázolni. Ebből a munkából született egy közös publikációnk, amely az NDK kohászati lapjában, a Neue Hütte-ben jelent meg.

Ezek a számítások meglehetősen sok időt vettek igénybe. Amikor 1975-ben kijutottam Ausztriába ENSZ ösztöndíjasként, az első dolgom e témakör irodalmának a felderítése volt. Találtam is egy cikket egy vastag melléklettel együtt, amely az oktaéder síkokra vonatkozóan megadta egy fokos lépésekben az alapszemcse orientációját. Amikor hazajöttem, félve mutattam meg ezt a cikket a professzor úrnak, hiszen ebben a cikkben az ő általa kidolgozott megoldásnál általánosabb és könnyebben kezelhető megoldás szerepelt. Félelmem azonban nem igazolódott be, Prohászka professzor úr örömmel vette tudomásul, hogy az orientáció meghatározásnak ez a módja másokat is érdekel, így jól illeszkedik saját munkája is a nemzetközi élvonalhoz.

Az Ausztriából való visszatérésem éve, 1975. édesapám

számára nehezen magyarázható eseményekkel indult, puccsal leváltották a Vasipari Kutató Intézet igazgatói pozíciójából. Sokan elfordultak emiatt tőle, de Prohászka professzor úr hűségesen kitartott mellette. Rendszeresen látogatta őt lakásunkon, és a Műszaki Tudományok Osztálya keretében is együtt dolgoztak. Az együttműködésnek kézzel fogható eredménye lett a kétalkotós rendszerek egyensúlyi fázisdiagramjáról szóló átfogó cikkük, amelyet valamelyik neves nyugati folyóiratnak küldtek meg publikálásra. Arra is emlékszem, hogy a publikációban egy vagy két, addig még nem ismert típusú egyensúlyi fázisdiagramról is írtak. Pár hét elteltével megkapták a lektori véleményt, amelyben megdicsérték a témakör minden részletre kiterjedő feldolgozását, de a publikálását nem javasolták, mert véleményük szerint a munka nem tartalmaz új eredményt. A lektori véleményre adandó választ nálunk beszéltek meg, és még most is előttem van két professzorom csalódott tekintete. Meg voltak ugyanis győződve arról, hogy ez a munka messze megüti az adott folyóiratban megjelenő publikációk színvonalát, és új eredményeket is közöl. Úgy emlékszem, a lektori véleményre nem válaszoltak írásban, és az akkor még létező Műszaki Tudomány folyóiratban való közlés mellett döntöttek¹.

Édesapám 1985-ben bekövetkezett haláláig barátságuk mindvégig töretlen volt, és ez a barátság sokat jelentett az édesanyám '77-ben bekövetkezett halála utáni években. Édesapám 1985 májusában halt meg, a Farkasréti temetőben történt hivatalos búcsúztatás után néhány héttel helyeztük örök nyugalomra szülővárosában, Sopronban. Az Akadémiát Prohászka János, elsősorban mint barátja képviselte. A búcsúszertartás a szokásoknak megfelelően a ravatalozóházban kezdődött, melynek személyzete úgy gondolta, hogy egy kétszeres Kossuth-díjas professzor temetésekor a háttérzene csak egy munkásmozgalmi induló lehet. A jelenlévők megdöbbenése után Prohászka professzor volt, aki azonnal intézkedett az oda nem illő zene leállítására.

Prohászka János kutatói tevékenysége a '70-as évek második és a '80-es évek első felében elsősorban az úgynevezett gyorshevítes technológia megvalósítására irányult, így a kristálytani kutatások háttérbe szorulásával egy ideig nem volt közös szakmai témánk. Pályafutásomat azonban figyelemmel kísérte, és jól emlékszem arra a pillanatra, amikor bemutatott a V2 épület első emeleti tanterme titkárságra nyíló szobája új lakójának, dr. Ginsztler Jánosnak. A bemutatás előtt még saját szobájában mondta nekem: „figyelj Balázs, akivel most találkozni fogsz, lesz az utódod, s nagy ember lesz.”

Néhány évvel később, és ez már a nagydoktori címem elnyerése után történt, egy beszélgetés végén hozzám fordulva mondta: „Balázs, javasolni fogunk a levelező tagságra, és vedd fel a kapcsolatot dr. Terplán Zénó

¹ Verő J, Prohászka J: A kétalkotós ötvözetek állapotábrái. Műszaki Tudomány, 52 (1976) 1–25.



Az I. OATK konferencia elnöksége és résztvevői. Az elnöki asztalnál dr. Prohászka János akadémikus nem az őt megillető helyen ült, mert csak késve érkezett a helyszínre

professzorral, aki egyik ajánlód lehet.” Úgy meglepődtem, hogy tőlem szokatlan módon visszakérdeztem: „engem?”

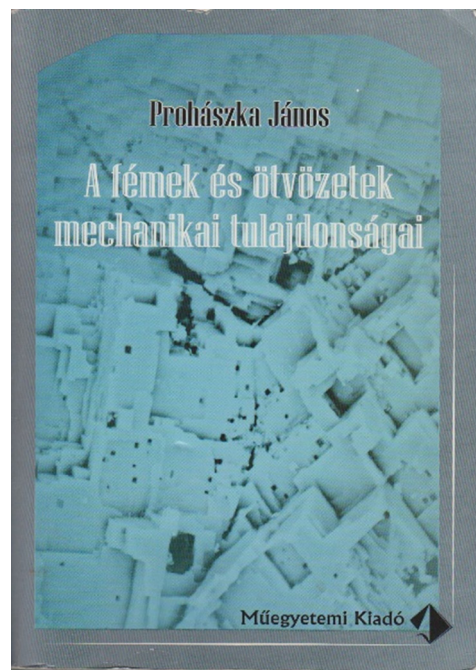
Prohászka professzorral a szakmai és társadalmi élet számos területén tevékenykedtünk együtt, az együttműködés minden elemét az segítette, hogy bár végzettsége szerint gépész volt, de a kohászokat nagyon tisztelte. A '80-as évek legvégétől a 2000-es évek elejéig a BKL Bányászati és Kohászati Lapok Kohászat című folyóiratának felelős szerkesztője voltam, és ebben a minőségemben felkértem a lap szerkesztőbizottsági elnökének. Az Öntödei Múzeumban tartott szerkesztőbizottsági üléseken mindig segítőkészen támogatta a lap ügyeit. Ezeknek a hangulatos együttléteknek kedves színfoltja volt, amikor egyik kerek születésnapján a szerkesztőség egy ikresedett kvarckristállyal ajándékozta meg, emlékeztetve a kristálytani orientációs kutatásaira. Prohászka professzornak minden bizonnyal meghatározó szerepe volt abban, hogy a Kohászat című folyóiratot az MTA Műszaki Osztálya befogadta a doktori eljárásban értékelt lapok közé.

A rendszerváltás utáni zavaros években több alkalommal beszélgettünk az anyagtudomány és az anyagtechnológia hazai helyzetéről. Prohászka János is többször kifejezte, hogy tenni kellene valamit a szakma továbbéléseért. Egy ilyen beszélgetés során fogalmazódott meg az I. Országos Anyagtudományi és Technológiai Konferencia és Kiállítás megszervezésének gondolata. A Dunai Vasmű és személy szerint dr. Zsámbok Dénes támogatásával sikerült megfelelő helyszínt és körülményeket biztosítani az első rendezvénynek. Prohászka professzor örömmel vállalta a megnyitó előadás megtartását. Zsámbok Dénessel együtt nagy izgalommal készültünk a Dunai Vasmű Lemezalakító Szabadidő Központjában a konferencia megnyitására. Ez a Szabadidő Központ a Vasműbe vezető úttól távol, a Duna-parton van. A konferencia előadóinak és a mintegy 60 résztvevőnek a megnyitóra sikerült megérkeznie, éppen csak a legfontosabb személy, a konferenciát megnyitni hivatott Prohászka János hiányzott. Az elnökségben a Dunai Vasmű akkori vezérigazgatójával, dr. Horváth Istvánnal és dr. Zsámbok Dénessel együtt úgy döntöttünk, hogy kezdjük el a programot az eredeti tervek szerint. Így én kaptam szót, és rövid előadásom közepén a terem ajtajában megjelent a várva-várt Prohászka professzor, és látva a helyzetet, csak annyit mondott: „Balázs, nyugodtan fejezd be, majd utána én elmondom, amit terveztem.” Ez

az apró incidens is rávilágított nagyvonalúságára és a jó ügyek iránti elkötelezettségére.

Ahogy a professzor úrhoz fűződő emlékeimet sorra veszem, egyre újabb és újabb emlékek merülnek fel. Egy ilyen visszaemlékezés azonban teljességre nem törekedhet, nem az a célja. Mégis a következő két epizódot nem hagyhatom ki a sorból, ezek már az ezredforduló utáni évekhez kötődnek.

Professzor úr szakmai-tudományos munkásságának összefoglalását jelentette a Fémek és ötvözetek mechanikai tulajdonságai című könyv megírása, amelyben az adott kor legrangosabb angolszász szakkönyveinek példáját követve foglalta össze a mechanikai metallurgia alapvető ismeretanyagát. E munka alapját a dolgozószobájának hangulatát meghatározó könyvszekrényben őrzött, mintegy kétszáz könyv jelentette. Nagy megtisztetésnek vettem a könyv lektorálására való felkérését. Ez két részben történt meg. Az első, alapvetően a mechanikai vizsgálatokkal foglalkozó rész lektorálásába bevontam egyik fiatal munkatársamat, Takács Mártont,



Dr. Prohászka János professzor Fémek és ötvözetek mechanikai tulajdonságai című könyvének címlapja

aki elsősorban a vonatkozó szabványok nagy tudója volt. A könyv terjedelmének mintegy egynegyedét kitevő rész alapos lektorálására elegendő idő volt. Észrevételeinket személyesen egyeztettük professzor úrral, ő pedig készségesen elfogadta a javító szándékú megjegyzéseinket. A hátralévő rész lektorálására a kézirat leadásának sürgető határideje miatt – ha jól emlékszem – egy vagy két hét állt rendelkezésemre. A helyzetemet még nehezítette, hogy éppen ebben a két hétben terveztük a balatonfüredi UNI Hotelben első unokánkkal szabadságunk eltöltését. Ekkor már túl voltam első szemműtéten, és a lektorálás csak feleségem segítségével volt lehetséges. Szerencsére, a könyv szerkesztőjének, dr. Dobránszky Jánosnak a gondos munkája következtében lényeges javításra nem volt szükség, a lektori véleményem megfogalmazásakor legfeljebb arra utalhattam, hogy egyes fejezetek témaköréről szívesen olvastam volna még többet professzor úr megfogalmazásában.

A másik epizód egy adott időponthoz kötődik, mégpedig

a Többes fázisú acélok kifejlesztése rövid című program első konzorciumi üléséhez. Ez valamikor 2003 őszén volt, és az első ülésünkre felkértem Prohászka János professzor urat, hogy tartson előadást a többes fázisú acélok szövetszerkezetének kialakulásában meghatározó szerepet játszó ortho- és paraegyensúlyokról, ahogy azt már az anyagtudomány.eu blogom egyik anyagában megírtam. Erről az ülésről a résztvevők, elsősorban az előadó engedélyével hangfelvétel is készült. 20 év távlatából már nagyon bánom, hogy ez a hangkazetta elkallódott, és professzor úr emlékét csak könyvei, publikációi és a képek őrzik.

Prohászka János professzor úr halálának 10 éves évfordulója minden bizonnyal sokunkban visszahozza gazdag életútjának egyes elemeit. Nekünk, utódoknak – például a Prohászka János Alapítványnak – a kötelessége, hogy a műszaki anyagtudomány művelésének az általa kijelölt útján tovább járjunk.

Verő Balázs

A Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség kiadványa

Anyagvizsgálók Lapja

Az Ország vezető szaklapja



A lap kiemelt támogatója: **MFE** Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete

Online Tudományos Közmunkatér a magyar szaknyelv ápolásáért

Magyar Anyagvizsgálók Egyesületének elnökei: Czékus Aurél

110 éve született Gillemot Ferenc

Szakdolgozat és Diplomatervezési pályázat cikkei

2023/I. lapszám

A Vasipari Kutató Intézet 70 éves jubileuma (1952-2022) – IV. rész

70th anniversary (1952-2022) of the Research Institute for Ferrous Metals – Part IV.

Fehérvári Attila

1. Előszó

Dr. Rittinger János 1986-ban történő távozását követően Dr. Szunyogh László visszakapta osztályvezetői megbízatását.

1987-ben a VASKUT megrendezte a KGST 1-13-12 (Hegesztési Egyezmény – ridegtörés) téma, majd a Miskolci Egyetem a 22 K 02 (Anyagvizsgálati Egyezmény – rideg törés) téma specialistáinak értekezletét. Ez a két rendezvény volt a KGST országok hegesztési és anyagvizsgálati szakértőinek utolsó találkozója, amelyen hazánk küldöttjei részt vettek (lásd: Fehérvári Attila, Ifjan-Éretten-Öregen¹). Sajnos ezzel véget ért egy folyamat, amelyben szakmai és személyes barátságok kötődtek, és amely megtermékenyítően hatott a műszaki-tudományos fejlődésre.

2. A rendszerváltás éveinek szakmai programjai

1987-ben Fehérvári Attila kidolgozta „Az olajipar atmoszférikus tárolótartályainak élettartama” című témát (09-111-2079/ 87). Közvetlen munkatársa, Udvardi Tibor adjunktus lett a Budapesti Műszaki Egyetem Közlekedésmérnöki Tanszékén.

2.1 IpM T-7 tárcaprogram: Korszerű, mikroötvözött, növelt folyáshatárú acélok fejlesztése (1988). Programfelelős: Budapesti Kőolajipari Gépgyár (BKG).

A programban szereplő, legfontosabb téma: „Kísérletek Ø 1000 mm tartályokból álló, cseppfolyós-gáz töltőállomás létesítésének előkészítésére.”

A téma kidolgozását a BKG – mint Megbízó – végezte Übelhart István vezetésével, és a VASKUT – mint Megbízott – Fehérvári Attila vezetésével. A gyártási

1. táblázat: A gömbtartályok jellemző tulajdonságai és előkészítésük törésvizsgálatra

tartályvizsgálat			heg.	bemetszés		fárasztás		anyagvizsgálat	
anyaga	vast.	No.	eljárás	helye	a	σ_{max}/R_p	n	No.	
KL 2	18	13	SAW	BM	7.0	1.13	3009	2	A 240
KL 7	18	11	SAW	BM	7.0	1.14	3000	18	A355
	25	12			9.1	0.66	3002		
DLE 500	18	4	SAW	BM	6.5	1.01	2088	8	A 500
		7		WM	6.6	1.04	2088		
DE 700	18	1	SAW	BM	6.8	0.30	1	10	A 700
		20			7.8	0.52	2089		
		9			WM	6.4	0.48		
		19	FCAW	WM	7.1	0.66	2089		
		12	SAW	BM	5.0	0.50	1631		
KL 2	0.10 C	0.74 Mn					N		
KL 7	0.18 C	1.46 Mn					N		
DLE 500	0.20 C	1.63 Mn			0.06 V	0.05 Nb	N		
DE 700	0.17 C	1.27 Mn	0.32 Mo	0.05 Ti	0.005 B	QT (900°C/olaj + 650°C)			

kísérletek a BKG budapesti Gyömrői úti telephelyén folytak Babics Péter vezetésével, az anyagvizsgálatok pedig a VASKUT laboratóriumában Fehérvári Attila irányításával.

A kísérleti tartályokba a VASKUT eszközeivel műhibákat preparáltak. A tartályok törését a Hegesztési Kutató Intézet (VUZ, Bratislava) végezte. A vizsgálat során a VASKUT rögzítette a feszültségeket, a műhibák kinyílását és az akusztikus emissziós (AE) jeleket. Az AE vizsgálatokat Geréb János végezte és értékelte ki. A VASKUT témaszám 71-11-089/8 volt.

A vizsgálatok eredményeit – amelyeket a nemzetközi szakirodalomban is publikáltunk – az 1-3. táblázat és az 1-4. ábra foglalja össze.

2. táblázat: A gömbtartályok törésvizsgálata

tartály	anyaga	vast.	No.	b e m .		törés		repedés	
				helye	hőm.	kiindulópontja	jellege	a	2c
KL 2	18	13	BM	-19	műhiba fárad. rep.	SCG	LBB	7.5	140
								18.0	
KL 7	18	11	BM	-19	műhiba fárad. rep.	SCG		7.3	155
						LBB		18.0	
	25	12	BM	-21	műhiba fárad. rep.	SCG		11.7	174
DLE 500	18	4	BM	-20	műhiba fárad. rep.	BF		8.9	159
		7	WM	-19	műhiba fárad. rep.	BF		7.4	145
DE 700	18	1	BM	+10	varrat heg. rep.	BF		6.8	153
		20	BM	+10	HAZ fárad. rep.	BF		7.9	146
		9	WM	+4				7.9	154
		19	WM	-18				7.9	145
		12	BM	+4				6.8	153



1. ábra: DLE 500 anyagú tartály, bemetszés az alapanyagban, törés -20 °C hőmérsékleten

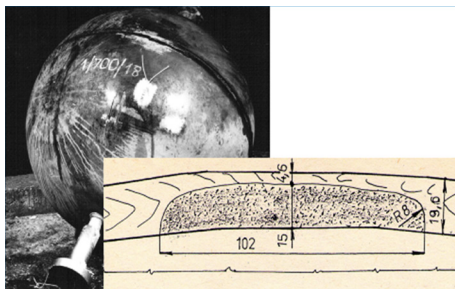


2. ábra: DLE 500 anyagú tartály, bemetszés az alapanyagban, törés -20 °C hőmérsékleten

¹ Fehérvári Attila, Ifjan-Éretten-Öregen – 80+ kérdés-válasz több, mint nyolc évtizedről – Beszélgetőtárs: Tóth László, 2021

3. táblázat: A gömbtartály törésvizsgálatok kiértékelése

tartály			törés			p_c	σ_c	K_c	$K_c(J)_{-20^\circ C}$
anyaga	vast.	No.	helye	hőm.	módja	MPa	MPa	MPa√m	MPa√m
KL 2	18	13	BM	-19	LBB	21.1	422	48.0	
KL 7	18	11	BM	-19		28.0	538	61.2	
	25	12	BM	-21	BF	23.0	398	48.4	254
DLE 500	18	4	BM	-20		33.1	702	77.4	
		7	WM	-19		35.0	659	75.6	
DE 700	18	1	WM	+10	BF	16.3	226		
		20	HAZ	+10		26.3	757	63.3	
		9	HAZ	+4		26.1	600	65.7	
		19	HAZ	-18		35.5	855	58.9	
	12	5	HAZ	+4		23.0	398	48.8	

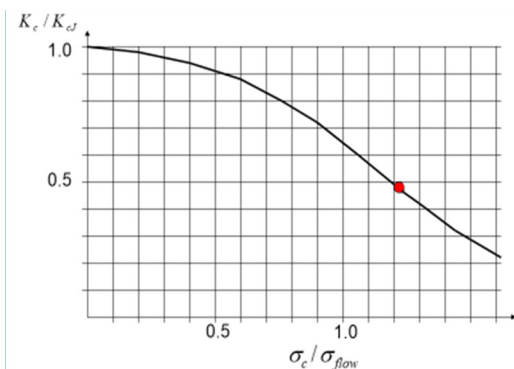


3. ábra: DE 700 anyagú tartály, bemetszés az alapanyagban, törés +10 °C hőmérsékleten



4. ábra: DE 700 anyagú tartály, bemetszés az alapanyagban, törés +4 °C hőmérsékleten

A KL 7 anyagú, 25mm vastag, alapanyagban bemetszett gömbtartály vizsgálati eredményét összehasonlítottam a nyomástartó edények – alább feltüntetett – biztonsági diagramjával (5. ábra). Az egyezés kölcsönösen bizonyítja a biztonsági diagram és a mérési eredmények helyességét.



5. ábra: A tartályvizsgálatok eredményeinek és a biztonsági diagram összhangja

3. Fontos események a VASKUT életében

1989-ben **Horváth János** lemondott a VASKUT vezérigazgatói posztjáról. Lemondásának legfontosabb előzménye a VASKUT mágnesgyártó üzemének létesítése volt az Inter-Európa Bank hiteléből. Az üzem ritka föld-fémek tartalmazó, permanens mágneseket gyártott a székesfehérvári Videoton Elektronikai Vállalat számára, ahol szovjet rakétairányító rendszerek paneljaiba építették be azokat. A gyártási technológiának a Varsói Szerződés országai-ba történő eladására tilalom (embargó) állt fenn, ezért a VASKUT beruházás illegálisan, egy svájci közvetítő cégen keresztül valósult meg.

1989-ben Fehérvári Attilát kinevezik a Hegesztési Osztály vezetőjévé. Dr. Tóth Károly kilép a VASKUT kötelékéből, és a Böhler Schweissttechnik Magyarország képviselője lesz. [1991-ben az Állami Energetikai és Energiabiztonságtechnikai Felügyelet Technológiai Osztály vezetője, majd a Böhler Kereskedelmi Kft. (Budapest, Szép u.) hegesztőanyag termékfelelőse. A Böhler Dunaharaszti irodaházat és telephelyet létesít, ahol Dr. Tóth Károly a Kft. műszaki vezetője].

Dr. Horváth János a Szovjetunióval kereskedő saját céget alapított, a VASKUT pedig pályázatot hirdetett a megüresedett vezérigazgatói poszt betöltésére.

A pályázatot **Fiumei Attila** nyerte meg, akitől – a beruházási és kereskedelmi tapasztalatai miatt – a mágnesüzem eladását remélte a VASKUT, hogy megszabaduljon a bankhitel nagyrésztől.

Fiumei Attila a VASKUT tevékenységének közvetlen irányítása céljából kinevezi Fehérvári Attilát műszaki igazgatóvá, Dr. Tardy Pált pedig tudományos igazgatóvá. Megbízatásukat vállalati tanácsok alakulásáig látták el, amikortól a technológiai osztályok képviselte Fehérvári Attila, a vizsgálati osztályok képviselte Dr. Tardy Pál feladata lett. Később Dr. Tardy Pál a Vaskohászati Egyesüléshez távozott, feladatait Dr. Verő Balázs vette át.

Fiumei Attila tárgyalásokat folytatott potenciális külföldi befektetőkkel. Nehéz dolga volt, mert a befektetőket nem a technológiai eszközök érdekelték, hanem a termék piaca. Azonban megszűnt a Szovjetunió érdeklődése a rakétairányításhoz szükséges magyar termékek iránt. Amint ez a potenciális befektetők tudomására jutott, a mágnesüzem eladhatatlanná vált. Mivel a mágnesüzem eladásának kísérletei sikertelenek voltak, 1991-ben Fiumei Attila kilépett a vállalatból, és a VASKUT ellen felszámolási eljárás indult.

A VASKUT felszámolója az INNOTECH Műgyetemi Innovációs Park Kft. (Budapest, Andor utca 60.) volt Dr. Pálmai Zoltán vezetésével. Az operatív ügyek Dr. Kardos Éva (Dr. Györgyi Kálmán legfőbb ügyész neje) jogtanácsos irányításával folytak.

A felszámoló végkielégítéssel elbocsátotta a VASKUT dolgozóit. Fehérvári Attila javasolta az elbocsátott dolgozóknak, hogy végkielégítésükből vásárolják meg azokat a vagyonelemeket, amelyek eredményesen működtethetők. Az eszközök birtokában teljesítsék a VASKUT szerződésben vállalt kötelezettségeit, majd folytassanak nyereség-érdekelt K + F tevékenységet. A javaslattal a dolgozók

nem kívántak élni, ezért Fehérvári Attila saját kockázatára megkísérelte a tevékenység, és az ahhoz szükséges eszközök megmentését.

Fehérvári Attila mentőakcióját – a felszámolóval egyetértésben – támogatta a Paksi Atomerőmű Vállalat (PAV), amely korábban 30 millió Ft hitelt nyújtott a VASKUT számára azzal a megállapodással, hogy kutatásokat végez a hitel törlesztésére.

Az új jogi helyzetben a PAV 30 millió Ft-ot bocsátott Fehérvári Attila rendelkezésére azzal a feltétellel, hogy abból kivásárolja a PAV-VASKUT szerződések teljesítéséhez szükséges eszközöket, és teljesíti a szerződésben előírt feladatokat. A PAV által nyújtott hitelt a felszámoló a PAV számlájára visszautalta.

4. Fehérvári Attila vállalkozói tevékenysége: 1992-1994

Fehérvári Attila teljesítette a PAV-val kötött szerződésben rögzített feladatokat. Fontosabb munkák:

1. Hőerőművi fő-gőzvezeték csőívek vizsgálata.
2. Nikkel bázisú elektróda (Böhler NIBAS 625) alkalmazása olajipari készülékek javításánál.
3. Részvétel az atomerőművi fő-keringtető szivattyú működését áramkimaradás esetén biztosító diesel motorok (18 PA 4-185-VG) törésének vizsgálatában.
4. Szakvélemény kidolgozása
 - Salétromsav tároló tartályok (01 WX09B 001) átalkotására.
 - Martenzites króm-acél tárcsák hőkezelésének és korrozójának kapcsolatára (ÁGISZ).
5. Oknyomozó vizsgálat
 - Armatúra orsó (10 TH80 S201) törésére,
 - Nagyteljesítményű csavar-kompresszor (Linde) törésére,
 - Ammónia bontócsövek repedésére (Péti Nitrogénművek).
6. Technológia kidolgozása
 - NÁ273x20 méretű, ausztenites acélcsovek automatikus keskenyres hegesztéséhez,
 - 220 MW generátorok hűtővíz elosztó kollektorának gyártásához,
 - Reaktortartály átrakószerkezet 42CrMo4 anyagú emelőszárnyak hőkezeléséhez (DIGÉP),
 - Magnézium- és rézötvözetek hegesztésére (Magnex),
 - folyatószerzők gyártása keményforrasztással (Bekomold),
 - PAV reaktorában kiégett fűtőelem tárolócsövek hegesztéséhez. A hegesztőgépet a BDGMF valósította meg Dr. Czinege Imre és Dr. Sárosi György vezetésével, Fehérvári Attila fővállalkozásában. Ezzel a technológiával készült a paksi átmeneti tároló első üteme. Később a Pintér Művek (Kecel) gyártotta a tárolócsöveket.
7. Vizsgálatok
 - Mock up kifejlesztése és legyártása a reaktorcsonk ultrahang-vizsgálatának értékeléséhez. A műhibákat a WELMAT helyezte el Tarnai György vezetésével. A megmunkálást az Országos Bányagépgyártó Vállalat Budapesti Bányagépgyára (Budapest,

Baross utca 91-95.) végezte, amely rendelkezett megfelelő méretű karusszel esztergapaddal (a síktárcsa átmérője meghaladta a csomópontot tartalmazó reaktortartály átmérőjét).

- Tankpezsgő tárolására épített acélszerkezetek nyúlásmérő bélyeges statikai ellenőrzése (Biotech).
- Vasúti vonóhorgok terhelésvizsgálata 100 tonnás hidraulikus gépen (MÁV).
- főelzáró tolózárok feszültségkorróziós károsodása (PA Rt.).

Fehérvári Attila a kutatási-, vizsgálati-, szakértői szerződések és jelentések dokumentációjában használta a WELMAT márkanévét, amelyet egy megalakítandó gazdasági társaság megnevezésére szánt.

A megbízások teljesítésével párhuzamosan Fehérvári Attila nyilvános árverésen megvásárolta a felszámolótól a volt Hegesztési és Anyagvizsgáló Osztály teljes eszközállományát (benne hőkezelő kemencéit és a forgácsoló műhely eszközeit). A megvásárolt eszközök árát a PA Rt. hiteléből, és szakmai tevékenységének eredményéből egyenlítette ki.

Az US-NRC (National Regulatory Commission) nemzeti, csővezeték integritási kutató csoportot (International Piping Integrity Research Group = IPIRG) szervezett annak meghatározására, milyen hatást gyakorol a földrengés az atomerőművi csővezeték hálózatra. 1992-ben Fehérvári Attilát beválasztották az IPIRG II. program tíztagú, műszaki Tanácsadó Testületébe (Technical Advisory Group = TAG). A következő négy évben minden mérési eredményt és azok feldolgozását tartalmazó jelentést megkapott, amit felajánlott hazai felhasználásra.

Ajánlatát érdektelenség fogadta, mert egy BME tanácsk is pályázott a földrengés hatásának vizsgálatára. Javaslatukra megerősítették a paksi épületeket, az US-NRC eredményeinek paksi hasznosítására azonban semmi nem történt.

1993. október 1-jén Fehérvári Attila megalapította saját tulajdonú vállalatát (Kft), amelyet 1994. április 27-én a Cégbíróság „WELMAT Hegesztési és Anyagvizsgáló Kutató-Fejlesztő Intézet” néven bejegyezt az országos cégjegyzékbe (no. 01-09 267 086). Fehérvári Attila a felszámolótól megvásárolt eszközeit apportálta a WELMAT Kft.-be, és hozzájárult a WELMAT minőségbiztosítási rendszerének felépítéséhez.

Fehérvári Attila területrészt és épületrészt is szándékozott vásárolni a volt VASKUT területéből a WELMAT tevékenysége számára. Első sorban az anyagvizsgáló csarnokot, valamint a hőkezelő csarnokot magába foglaló toldalék épületrészt tervezte megvásárolni, mivel az ott lévő berendezéseinek áttelepítése gyakorlatilag lehetetlen lett volna. A tulajdonában lévő hegesztő és forgácsoló gépeket a felszámoló tudomásával, saját költségére áttelepítette a toldalék épületbe.

A tervezett területrészt és épületrészt megvásárláshoz Fehérvári Attila kölcsön igényt kért és kapott az Intereurópa Banktól 17 millió Forint értékhatárig. A terület árverésén azonban az Államkincstár – Dr. Pakucs János kezdeményezésére, és Dr. Orbán Viktor

rendeletére – megvásárolta a VASKUT fa. (felszámolás alatt) megmaradt területét és építményeit, ahol megalapították az INNOSTART innovációs és üzleti nonprofit szervezetet azzal a céllal, hogy inkubátorként hasznosítsa az ingatlan innovatív szervezetek működéséhez. Az INNOSTART igazgatója Dr. Lippényi Tivadar lett, az ingatlan működtetését és karbantartását Dr. Szalai Zoltán végezte.

A VASKUT fa. vagyonából korábban elkelt a főépület előtti parkoló, a belső udvar a volt forgácsoló műhely épületével, továbbá a külső terület csaknem egésze a rajta álló építményekkel együtt. 1994-ben Dr. Pungor Ernő professzor – aki OMFB elnök és tárca nélküli miniszter volt az Antall-Boross kormányban (1990 és 1994) – létrehozta a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Alapítványt, amelynek főigazgatója volt 2002-ig. Az OMFB pénzéből megvásárolta azokat a területeket, építményeket és a bennük lévő eszközöket, amelyek otthont adtak az alapítvány irodáinak, és az alapítványi intézmény-hálózat Anyagtudományi Intézetének (ATI).

5. A WELMAT tevékenysége: 1994 - 1999

Ügyvezető igazgató: Fehérvári Attila

A WELMAT változatlan helyen folytathatta tevékenységét az INNOSTART számlájára utalt bérleti díj fejében. A díj rendkívül kedvező (150.000 Ft/hó), kigazdálkodható volt. A WELMAT néhány, fontosabb kutatási témája:

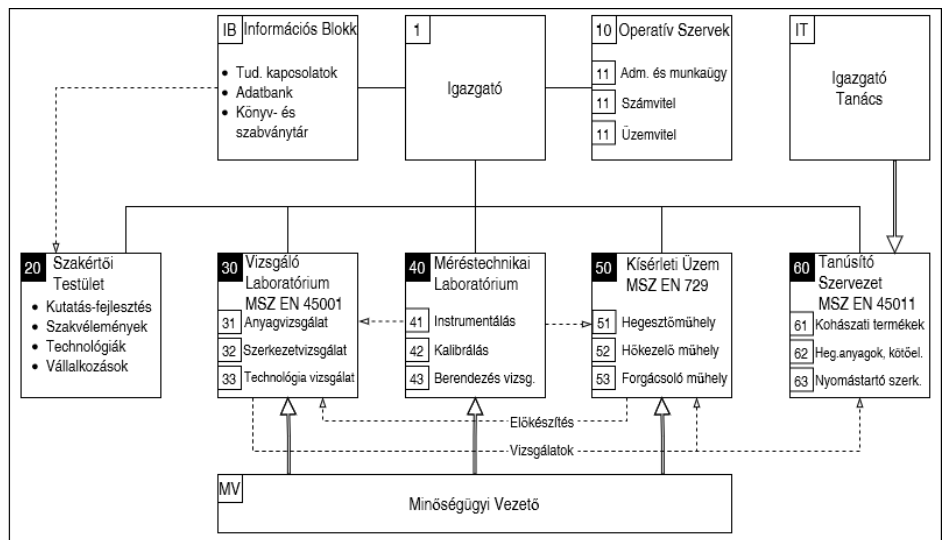
K-005/94 Algyői gázfeldolgozó üzem hidegüzemi készülékeinek vizsgálata. Megrendelő: MOL Rt. Kutatás-termelési Ágazat. Szolnok. Kidolgozta: Fehérvári Attila. Első adatfeldolgozás: 1994. március (36 oldal). Zárójelentés: 1995. május (118 oldal).

K-009/95 Gyakorlási és ellenőrzési módszerek reaktortartály felülvizsgálatához. Megrendelő: PA Rt. Kidolgozta: Fehérvári Attila. Jelentés: 1995. november (125 oldal). Gyakorlás céljára átadta a VASKUT által létrehozott modelltartályt, amelyet a PA Rt. saját telephelyére szállított.

1996: A könyv- és szabványtár létrehozásához a WELMAT átvette, és bérlet működési területén telepítette a volt VASKUT, és az Aluterv-FKI teljes könyvtárát. Ezzel a legjelentősebb hatai könyvtárak egyikének birtokába került, amelyben számos olyan kiadvány is volt, amely más hazai könyvtárakban nem volt megtalálható

1996: A WELMAT minőségbiztosítási rendszert dolgozott ki és léptetett életbe léptette saját tevékenységének szabályozására. A minőségbiztosítási rendszer előírásait két kötet tartalmazta:

- 1.kötet: Minőségügyi kézikönyv. MSZ EN ISO 9001:1996. Tartalmazza a cég történetét,



6. ábra: A WELMAT szervezeti felépítése

szervezeti felépítését (6. ábra) és működésének szabályozását.

2.kötet: Minőségügyi kézikönyv. MSZ EN ISO 9001:1996. függelékei:

- munkaköri leírások,
- technológiai utasítások
 - ausztenites csövek és csővezetékek hegesztésére,
 - szénacél csövek és csővezetékek hegesztésére,
 - ausztenites és ferrit-perlites csövek összehegesztésére
 - csonkok csővezetékbe történő behesztésére,
 - varrathibák javítására
- minőségügyi szabványok jegyzéke

1996-1997: Turbina fő-gőzvezeték csövek szilárdsági vizsgálata. Megrendelő: PA Rt. Kidolgozta: Farkas Jenő, Fehérvári Attila, Dr. Szunyogh László.

1. kötet: szakvélemény (118 oldal).
2. kötet: I.sz. melléklet: A csőívek anyagának vizsgálati eredményei (20 oldal).
II. sz. melléklet: A csőívek geometriájának vizsgálati eredményei (49 oldal).
III.sz. melléklet: Alkalmazott módszerrel számított feszültségek. 40 RA 05 cső-ív beszállított állapotban (16 oldal).
3. kötet: IV.sz. melléklet: A csőívek nyúlásmérő bélyeges vizsgálati eredményei beszállított állapotban (39 oldal).
V.sz. melléklet: A csőíven mért feszültségek összehasonlítása a számított feszültséggel beszállított állapotban (41 oldal).
4. kötet: VI.sz. melléklet: Nyúlásmérő bélyeges vizsgálati eredmények 31 RA 11 cső-ív alakítás után (28 oldal).
VII.sz. melléklet: Mért feszültségek összehasonlítása a számított feszültségekkel 31 RA 11 cső-ív, alakítás után (25 oldal). VIII.sz.

melléklet: Műhibák kinyílása üzemi nyomásig 31 RA 11 (31 oldal).

IX.sz. melléklet: nyúlásmérő bélyeges vizsgálati eredmények 31 RA 11 cső-ív (22 oldal).

5. kötet: Zárójelentés: 1997. március.

1998: A WELMAT Pályázat révén elnyerte a Budapesti Kereskedelmi és Iparkamara (BKIK) 15 millió forintos támogatását azzal a céllal, hogy eszközei és szakértelme révén támogassa a kezdő vállalkozásokat, termékeik minősítésével, ezen keresztül piacra juttatásával. Létrejött a Budapesti Hegesztési és Anyagvizsgáló Centrum.

1998: Dr. Verő Balázs fémtani vizsgálatokkal és Fehérvári Attila törésmechanikai vizsgálatokkal közösen meghatározta egy 18 PA 4-185-VG Diesel motor főtengely törésének okát.

A motor fontos része a reaktor biztonsági rendszernek. Meghajt egy generátort, amely áramot termel a fő keringtető szivattyúk egyikének – a reaktor hűtése céljából nélkülözhetetlen – működtetéséhez a központi áramellátás esetleges kimaradásakor. A biztonság érdekében három párhuzamos egység tartozik minden szivattyúhoz.

A motort a Ganz MAVAG gyártotta, főtengelyét pedig a Diósgyőri Gépgyár az LKM által szállított öntecsből. A törés meglepetést okozott, mivel a hasonló motorral hajtott, 3000 lóerős Diesel mozdonyok megbízhatóan üzemeltek. A törés okát abban láttuk, hogy a szovjet főtengelyeket nagyobb öntecsből gyártották, így az átkovácsolás mértéke is nagyobb volt. Jobban elviselte az indításkor szükséges gyors (1 min.) felterhelést. Az atomerőmű a Ganz főtengelyeket kicserélte.

1998: Nagy átmérőjű NF csavarok szakító vizsgálata céljából a WELMAT tervezett és saját műhelyében legyártott egy készüléket, amellyel létrehoztunk egy 200 tonnás gépet.

1999: Atomerőmű biztonságos üzemelésének anyagtechnológiai és anyagvizsgáló feladatai Megrendelő: PART (képviselője Takács Gyula), kidolgozta: Fehérvári Attila.

6. A WELMAT tevékenysége: 2000 - 2003

Ügyvezető igazgató: Fehérvári Attila

002: Autóbusz futómű szilárdsági ellenőrzése légrugó keret fásasztó vizsgálatával.

Megrendelő: NABI. Képviselője: Kállai Endre.

A téma előzménye: Amerikai befektető kivásárolta a tönkrement Ikarusz Karosszéria és Járműgyár (Mátyásföld) hasznosítható vagyonelemeit. Részvénytársaságot alapított NABI (North American Bus Industries) néven, és elkezdte autóbuszok gyártását Mátyásföldön amerikai tervek szerint. Az első 100 autóbuszt Chicagoba szállították, ahol a városi közlekedésben vettek részt.

A téma eredménye:

Megállapítottuk, hogy várható a légrugó keret repedése. A megbízótól kapott tervezési adatok alapján megbecsültük a repedések megjelenéséig eltelt időt, saját vizsgálataink alapján megállapítottuk a repedés megjelenésének helyét.

A gyakorlat visszaigazolta a megállapításunkat: valamennyi autóbusz légrugó kerete megrepedt a vizsgálatunk által becsült üzemidő után és helyen. Ennek következtében a NABI átfogó vizsgálatot indított a szerkezet módosítására, és a módosítások hatásának ellenőrzésére. A módosított technológiával gyártott autóbuszok egyikénél sem jelentkezett repedés.

Nem mellesleg a légrugó keret fejlesztéséhez végzett vizsgálatokból a WELMAT jelentős bevételre tett szert.

003-056: Anyag- és termékvizsgálatok különböző vállalatok és intézmények megbízásából. A vizsgálatok tárgyát, megrendelőjét és a megrendelő ügyintézőjét a „Fehérvári Attila: Ifjan-Éretten-Öregem” című kiadvány (2021) tartalmazza.

2000.06.02. A Magyar Bányászati Hivatal jóváhagyta a WELMAT minőségügyi kézikönyvét, ezáltal engedélyezte a kézikönyvben szabályozott tevékenységét a Hivatal illetékességi területén.

2000.11.14. PA Rt egy év érvényességgel minősítette a WELMAT céget atomerőművi karbantartást és élettartam vizsgálatokat támogató, hegesztési és anyagvizsgáló tevékenységekre. Lejártakor meghosszabbította a minősítést 2005. január 31.-ig. Okirat a 7. ábrán látható.

A Nemzeti Akkreditáló Testület (NAT) akkreditálta a WELMAT Vizsgáló Laboratóriumát:

- acél és nemvas-fém termékek, öntvények vizsgálatára;
- hegesztett, forrasztott és ragasztott kötéseik roncsolásos (mechanikai, technológiai, korróziós és anyagszerkezeti), valamint roncsolásmentes (vizuális, ultrahangos, penetrációs, mágnesezhető-poros, radiografia-értékelő tömörségi és akusztikus emissziós) vizsgálatra;



7. ábra: WELMAT atomerőművi munkákra való alkalmassági okirata



8. ábra: WELMAT Vizsgáló Laboratórium minősítése atomerőművi munkákra

- c. nyomástartó edények és csővezetékek szerkezeti vizsgálatára, és nyomáspróbájára;
- d. acélszerkezetek, alkatrészek és kötőelemek statikus és dinamikus terhelhetőségének vizsgálatára.

Az akkreditációs vizsgálatot Proksa Ferenc végezte, jóváhagyta Dr. Ring Rózsa ügyvezető igazgató. Az Okirat a 8. ábrán látható.

A WELMAT életbe léptette a Vizsgáló Laboratórium minőségügyi kézikönyve MSZ EN 45001:1990 második kiadását, amely tartalmazza:

- a. a WELMAT anyagvizsgáló gépeinek az Országos Mérésügyi Hivatal (OMH) által elvégzett hitelesítésének bizonyítványait (2000);
- b. vizsgáló eljárásait (2000) Losenhausen 100 tonnás-szakítógéppel, Instron 1197 szakítógéppel, Instron 1115 szakítógéppel, Dávid 100 kN szakítógéppel, ütőgépekkel, Brinell és Vickers és Rockwell keménységmérő gépekkel, rezonancia fárasztógépekkel;
- c. eljárásait (2000) nyúlásmérő bélyeges mérésre, akusztikus emissziós vizsgálatra, törésmechanikai vizsgálatra;
- d. a WELMAT sugárvédelmi szabályzatát (2001);
- e. beszállítóinak és alvállalkozóinak minősítési és akkreditációs jegyzőkönyvét (1993-2001).

Az INNOSTART folyamatosan emelte a bérleti díjat. Ennek egy részét az infláció indokolta. Ennek mértéke 2003-ban 270%, azaz évi 4.860 ezer Ft, (havi 405 ezer Ft) volt. Az INNOSTART azonban az inflációt jelentősen meghaladó bérleti díjat számlázott, ami elvonta az innovációs tevékenység – bér- és eszközfejlesztésre fordítandó – eredményének jelentős részét. 2003-ban 13.750 ezer Ft, vagyis az infláció által indokolt díjnövekmény kilencszerese volt az éves bérleti díj. Az INNOSTART

indoka az volt, hogy üzleti célra ki tudná adni az innovációs célra használt területeket. Ez igaz, viszont szembe megy azzal a céllal, amiért létrehozták az INNOSTART nonprofit szervezetet a volt-VASKUT területén.

2003-ra a WELMAT bevételei már nem fedezték az indokolatlanul megnövelt terheket. Fehérvári Attila prioritásnak tekintette a dolgozók érdekeit, ezért folyósította fizetésüket, és átutalta a munkájukat terhelő költségeket és annak járulékait nyugdíjjogosultságuk megőrzése végett. Az egyéb költségek utalására azonban csak részben maradt lehetősége. A WELMAT adóját is csak részben tudta utalni, ezért az ÁVÜ elvonta a WELMAT bankszámláján lévő, 2 millió 300 ezer Ft forgótőkét – amivel ellehetetlenítette további működését – és felszámolási eljárást indított ellene.

Fehérvári Attila 1 hónap moratóriumot kért annak érdekében, hogy eladja a céget a WELMAT alkalmazásában álló dolgozók munkahelyének és a cég tevékenységének megőrzése érdekében. Fehérvári Attila megkapta a moratóriumot, mert az állam nagyobb hasznot remélt a cég eladásától, mint a felszámolásától.

Fitos Zoltán, a Ganz Holding Zrt. (Budapest, Kőbányai út 21.) vezérigazgatója – megtekintve a WELMAT eszközeit – vételi nyilatkozatot tett, amelynek értelmében

1. a Ganz Holding Zrt. – a WELMAT igazgatói irodájának kivételével – megvásárolja, és 6 munkanap alatt, 6 kamionnal saját telephelyére szállítja a WELMAT eszközeit. Létrehoz egy Laboratóriumot, amelynek működéséhez biztosítja a szükséges infrastruktúrát.
2. a Ganz Holding Zrt. jogfolytonosan állományába veszi a WELMAT dolgozóit az igazgató kivételével.
3. a Ganz Holding Zrt. vállalja a bérleti díj fizetését a tulajdonába kerülő eszközök elszállításáig.
4. a Ganz Holding Zrt. és a WELMAT szerződést köt a Laboratórium nyereségérdekelt működtetésére. Ennek értelmében a működtetéséből származó eredmény fele a WELMAT Kft.-t illeti meg.

A Laboratórium eredményessége biztosnak látszott, mert a Ganz Holding Zrt. érékkörébe tartozó 17 vállalat mindegyikének voltak vizsgálati igényei.

A moratórium lejártakor létrejött a szerződés, amelyben a Ganz Holding Zrt. mindössze a WELMAT adótartozásának (kb. 20 millió Ft) megfizetését vállalta, amely töredéke volt a tulajdonába került eszközök forgalmi értékének. Fehérvári Attila aláírta a szerződést, hiszen a moratórium lejártá miatt nem is lett volna más lehetősége.

A Ganz Holding Zrt. valójában 16 millió forintért jutott az eszközök birtokába, mivel a vételár ÁFA tartalmát viszszaigényelte. Az ÁFA a WELMAT tartozásává vált, amelyet Fehérvári Attila annak reményében vállalt, hogy az a Laboratórium működtetésének eredményéből megtérül. A Laboratórium azonban nem valósult meg, ezért az eszközök vételárának ÁFA tartalmát (kb. 4 millió Ft) Fehérvári Attila volt kénytelen megfizetni.

A Ganz Holding Zrt. tulajdonába került eszközök nem 6, hanem 160 kamionra fértek fel. Az átszállítás pedig nem 6 napot, hanem 3 évet vett igénybe. Ez alatt sok minden megváltozott a Ganz Holding Zrt. életében:

1. Az Energetikai Gépgyár és a Motorgyár kivételével elvesztette nagyüzemeit.
2. Az átszállított hegesztőanyagok és forgácsoló gépek tönkre mentek, mert a tárolásukra szolgáló, fűtetlen csarnokban lévő csővezetékben lévő víz megfagyott, majd a csővezeték törése után elöntötte a csarnokot.
3. A WELMAT anyagvizsgáló berendezései ismeretlen helyre kerültek.
4. A WELMAT hőkezelő berendezései egy záratlan csarnokba kerültek, ahol a működtető motorokat ismeretlenek ellopták.
5. A hegesztőgépeket az Energetikai Gépgyárba szállították, ahol termelőeszközként használták.

Az eszközök átszállítása 2005-ben befejeződött. Mivel a Laboratórium nem valósult meg, a WELMAT fenntartása értelmetlenné vált, de kötelezettsége nem szűnt meg. Ebből a helyzetből a WELMAT csak úgy tudott kiszabadulni, hogy felszámolási eljárást kezdeményezett saját maga ellen. A felszámolást a Seratus Kft. végezte, amely saját érdekkörében értékesítette a WELMAT irodájának stílbútorait és egyéb eszközeit. Az értékesítésből befolyt összegek fedezték a felszámolási költségeket, így a WELMAT károkozás nélkül szűnt meg.

Az Ganz Holding Zrt. – WELMAT szerződés mérlege sajnos negatív, mert:

1. A szállítási költség, az INNOSTART számára fizetett bérleti díj és a könyvtár elhelyezésének költsége valószínűleg meghaladta a megszerzett eszközök értékét.
2. Fehérvári Attila elvesztette vállalatát, amelyért – tudományos karrierjét feláldozva – 10 évet dolgozott. A tudományos és gazdasági veszteségei azonban nem érdekelték, mert 2005-ben elvesztette imádott

feleségét, akivel 7 éven át küzdöttek egy halálos kór ellen, amely 2005. február 3-án elragadta őt.

7. EPILÓGUS

Lóránt Károly egyik munkájában² a következőket írja:

„A rendszerváltáskor összeomló magyar ipari rendszer tönkre tette a kutatóintézetek nagy részét is, a kutatók szétszéledtek, nyugdíjba mentek, vagy valamilyen kft-ben próbáltak közvetlenül pénzt hozó tevékenységre áttérni. Hatalmas, több évtizeden, egy évszázadon keresztül felhalmozódott tudás vált az enyészet martalékává. A rendszerváltást megelőzően mintegy 130 ipari és mezőgazdasági kutatóintézet létezett. A rendszerváltás során vagy megszűntek, vagy kft-kre estek szét.”

A VASKUT történetét bemutató cikksorozathoz Dr. Tóth László professzor az alábbi megjegyzést fűzte:

A VASKUT történetének egy szakmai szeletét felidéző, négy részben publikált sorozat egyrészt meggyőzően bizonyítja a Lóránt Károly megállapításának valóságát, megnevezi résztvevőit, de főleg visszaadja azt a környezetet, atmoszférát, amelyben a felhalmozódott tudás az enyészetté válhat. Egy 1952-ben létrehozott, a rendszerváltásig a szakmai területein nemzetközileg is ismert és elismert tevékenységet folytató kutatóintézet „haláltusájának” és annak a „gyászindulónak” – amelynek „karmesterei” folyamatosan változtak a „szűk szakmai”-tól a tágabb „privatizációs körökig” – lehattunk tanui. A részletek arra is rámutatnak, hogy a rendszerváltás zavaros gazdasági és „jogértelmezési” forgatagában az értéktermelő, korrekt és időtálló, a társadalmi lét alapjául szolgáló műszaki tevékenység miképpen szorul hátrébb és hátrébb, válik egyre lényegtelenebbé.

² Lóránt Károly: A műszaki és természettudományos kutatóhelyek átalakulása a rendszerváltás során és azt követően. RETÖRKI, 2015. december (Kézirat)



ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA ÚJRA NYOMTATOTT VÁLTOZATBAN

16 év után újra kézbe vehetik

az olvasók

az Anyagvizsgálók Lapját!

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



Dr. Béres Lajos (1932 – 2022)

A fenti két sort leírva szinte megbénult a kezem, hiszen az egy emelettel éppen alattam lévő lakás nagyon is tisztelhető, kedves embereinek sziluettjei váltakoztak képzetemben jellegzetes arckifejezéseikkel és mondataikkal. Korom előrehaladtával egyre kisebb megrázkódtatással veszem tudomásul a természet azon törvényét, hogy a születést a halál is követi. Mégis, amikor a közeli kapcsolatokból tép ki valakit a megmásíthatatlan elmúlás, gyöttrődöm, de egyben vissza is tekintek arra, hogy mi is köszönhető szűkebb-tágabb környezetünkben annak, akit gyászolunk. Tisztában vagyok azzal, hogy minden részlet nem idézhető fel, sőt a kiemlések is szubjektívek. Kérem a Tisztelt Olvasót, hogy megemlékezésemet egészítse ki a saját gondolataival annak érdekében, hogy egy kiváló EMBER teljesebb lényében álljon előtte.



elsőéves hallgatóknak. A diákévekben – ne feledjük, az 1950-es periódus első felében vagyunk, a „Rákosi-érában” – még nagy hangsúlyt fektet a rendszer az „éberségre” és az ebből adódó honvédelmi ismeretekre, ezek elméleti-gyakorlati súlykolására. E törekvés az órarendi oktatás mellett a nyári táborokban is testet öltött.

Végzését követően a Zorkóczy Béla vezette Mechanikai Technológiai Tanszékre kerül, ahol 1954-1962 között tanársegéd, ezt követően 1975-ig adjunktus, majd egyetemi docens volt. Időközben 1959-ben Radiológiai Anyagvizsgáló képesítést, 1964-ben „Hegesztő Szakmérnöki Oklevelet”

szerez, és 1966-ban „dr. tech. univ” cím használatára jogosító oklevél birtokosa lesz. Ne feledjük, a Nehézipari Műszaki Egyetem első doktoravató nyilvános tanácsulése 1960. június 4-én volt, amelyen minden korábbi minősített (kandidátus, DSc) oktató megkapta a „dr. tech. univ” oklevelet. A Magyar Tudományos Akadémia Műszaki tudományok kandidátusa fokozatot 1993-ban védi meg. A tudományos minősítések változását követve megkapja a formális PhD fokozatot is 2000-ben, a már Miskolci Egyetem nevet viselő alammaterétől.

Béres Lajos Gyulán született 1932. augusztus 31-én. Középiskolai tanulmányait Békéscsabán folytatta. Miskolcra az akkori nevén a Nehézipari Műszaki Egyetemre vették fel, a Gépészmérnöki Kar hallgatójának 1950-ben. Ez volt hazánk új, 1949-ben létrehozott egyetemének második évfolyama. Tanulmányai során alammaterének névváltozását is megérte, hiszen az egyetem 1952. március 8. - 1956. október 18. közötti periódusára megkapta a Rákosi Mátyás „előnevet” is. Ez tükröződik gépészmérnöki oklevelében is, amelynek egyik aláírója Sályi István rektor, a másik pedig az államvizsga bizottság elnöke, Zorkóczy Béla. Mindkettőjük közös jellemzője az ismert és elismert szakmai tekintély mellett, hogy az egyetemi oktatás során bizonyított tehetséges fiatalokkal vették körül magukat. Így került az oktatói karba az első, 1953-ban végzettek közül, pl. Béda Gyula, Kozák Imre, Fancsali József, Kazár László, Szabó Imre, Szaladnya Sándor, Szedlacsek József, Tarján Iván, Vidó Endre, majd folytatódott Zorkóczy Béla kiválasztásaival, aki az egyetemi és a VASKUT-ban betöltött munkahelyére olyan hallgatókat választott, akik a későbbiekben a hegesztés és a mérnöki szerkezetek anyagainak károsodása témakörében meghatározó egyéniségekké váltak hazai és nemzetközi téren is, pl. Béres Lajos, Rittinger János, Fehérvári Attila, Bacskai Antal. A „szárny-bontogatást” a tanszéki demonstrátori megbízás periódusa segítette. Béres Lajos harmadéves korában az alaptantárgyak közül a metallográfia és az anyagvizsgálat tárgyait oktatta demonstrátorként az

OKLEVÉL

Szám: 1/1954

Ezt az oklevelet **BÉRES LAJOS**

száma alá állítottuk ki,
aki 1932. évben augusztus hó 31. napján
Gyula városban (községben)
Békés megyében Magyar-országban
született és az 1950-51. tanévtől az 1953-54. tanévig terjedő
időben a Rákosi Mátyás Nehézipari Műszaki
Egyetem Gépészmérnöki Karának szerszám-
gépészeti (gyártástechnológus) szakán
tanulmányi kötelezettségeinek eleget tett. Az Állam-
Vizsgáztató Bizottságnak 1954. évi szeptember hó
28. -i határozata alapján nevezett szerszám-
(gyártástechnológus) szakos gépészmérnöknek nyilvánítottuk.
Miskolc 1954. év szept. hó 28. n.

Zorkóczy Béla
Az Áll. Vizsg. Biz. elnöke

Sályi István
Rektor (Dfán, Igazgató)

Béres Lajos gépészmérnöki oklevele

Jómagam 1969-ben kerültem a tanszékre de Béres Lajost szinte mindig „*vasdarabokkal a kezében*” láttam jönni-menni, avagy a mikroszkóp előtt ülni. E tény a „*győződjünk meg arról, amit gondoltunk*” ember típusát erősítette meg bennem. Igen, Ő ilyen volt és ez egész életének minden szakmai tevékenységét jellemezte. Már fiatal korában 1958-1960 között félállásban volt a Diósgyőri Gépgyár Nagykovácsüzemében, de gyakorlati tapasztalatokat szerzett a nagyolvasztónál, az acélműben, a vasöntődében, a durva- és finomhengerműben, az indukciós kemencénél és az anyagvizsgáló laboratóriumban is, amelyet abban az időben Németh Emil irányított. Szakmai tevékenysége minden esetben az iparban alkalmazható új eredményekhez vezetett. Ezek főbb területei:

- Termithegesztés (vasúti síneknél, PAKS I. Atomerőmű építésénél használt betonacélok hegesztésénél).
- Erősen ötvözött melegsilárd acélok előmelegítési hőmérsékletének meghatározása, az ún. Schaeffler diagram módosítása.
- Javító- és felrakóhegesztések.

A termithegesztésben 1960-1987 között elért eredményeinek szűkszavú összefoglalója:

- Kifejlesztésre került a vasúti sínek termithegesztési technológiája a szükséges hegesztőanyag összetétellel, majd bevezetésre került a MÁV hegesztő telephelyein és 25 éven át a MÁV teljes sínhálózatán csak ezt alkalmazták. A technológiához két szabadalom (1961 és 1971) és egy szakkönyv „Sínek hegesztése” kötődik, amelyet a Műszaki Könyvkiadó bocsájtott útjára (1978, 1980).
- Hengerdei hengerek letört csapjainak visszahegesztésére alkalmas termithegesztési technológia kidolgozása és megvalósítása kb. 300 db henger-nél. A munka a Diósgyőri Kohászati Üzemekben realizálódott.
- Kidolgozásra került a Paksi Atomerőmű (PAKS I.) vasbetonszerkezeteinek építésénél használt betonacélok hegesztéstechnológiája. Mintegy 8000 kötés készült el. Ezek közül 2015 júniusában ellenőriztek a PAKS II. építésének előkészítése kapcsán, és az eljárást alkalmazandónak találták a PAKS II. építése során is. E munkához is szabadalom kötődik.
- Az alumíniumtermikus hegesztéshez kötődő 1967-1982 között született szabványok mindegyike támaszkodik e témakörben a Béres Lajos által elért eredményekre.

Az erősen ötvözött melegsilárd acélok hegesztésével, üzemeltethetőségével kapcsolatos eredmények – ugyancsak szűkszavúan az alábbiakban foglalhatók össze:

- Olyan új eljárást dolgozott ki, amely az erőműiparban alkalmazott erősen ötvözött acélok hegesztésénél az előmelegítési hőmérséklet becslésénél nem

csupán a hegesztendő acél vegyi összetételét veszi figyelembe, hanem a martenzites átalakulás hőmérsékletét is. A számítási módszert a nemzetközi szakma nem csupán ellenőrizte, hanem üdvözölve az elgondolást, azt át is vette és szakkönyveiben Béres Lajos nevét is említi.

- Fenti elgondolását kiterjeszti az azonos (homogén) és különböző (heterogén) anyagú csököttésekre is azzal, hogy rámutat a hegesztéstechnológia minden egyes lépésének fontosságára, szigorú betartásának szükségességére. Mivel egy jól kivitelezett kötés elkészítésének időigénye minimum egy teljes nap, 24 óra, ezért kezdeményezi az egyedi varratok készítésének „felelős művezetője” munkakör létrehozását. Természetesen ennek fontosságát és terhelését önmagán ellenőrzi a Tiszai Vegyi Kombinátban, valamint a Mátrai Hőerőműben is.
- A témakörben számos előadást tartott alapvetően a német nyelvterületen, de cikkei a világ és Európa legjelentősebb hegesztési folyóiratai fogadták el (Welding Journal, Schweissen und Schneiden).

Béres Lajos egyike azon kutatóknak, oktatóknak, akik megszerzett tudásukat nem „íróasztal-fiókjaikban” tárolják, hanem törekszenek azok terjesztésére mind a hazai, mind pedig a nemzetközi szakmai életben. Részletes szakmai önéletrajzát és saját tapasztalataimat alapul véve rá mindig és mindenkor a legteljesebb nyitottság volt jellemző. Éppen ebből adódóan a Műszaki Könyvkiadó az alábbi könyveit jelentette meg:

- Sínek hegesztése (1978, 1980)
- Anyagválasztási útmutató (1982)
- Javító- és Felrakóhegesztés (1984)
- Vasúti lexikon, Főszerkesztő: Urbán Lajos (1984)
- Hegesztési kézikönyv, Főszerkesztő: Baránszky Job Imre (1985)
- Hegesztési Zsebkönyv, Főszerkesztő: Gáti József (1996), 2003-ban az átdolgozott kiadást a COKOM Kft. jelentette meg.

Könyveinek sorát bővíti még:

- Acélok, öntöttvasak javító- és felrakóhegesztése. Monteditió Kiadó (1992, 1993, 1995)
- A javító- és felrakóhegesztések technológiája, TÜV Akadémia Kft. (1999)
- Hegesztés és rokontechnológiák. Kézikönyv, Főszerkesztő: Szunyogh László, Gépipari Tudományos Egyesület (2007)
- Egyetemi jegyzetei
 - Hegesztés, Nehézipari Műszaki Egyetem (1967)
 - Hegesztéstechnológia I., Felrakóhegesztés Nehézipari Műszaki Egyetem (1980, 1986, 1988)
- A Budapesti Műszaki Egyetem Továbbképző Intézetének kiadványai
 - A hegesztés anyagismerete (1988)
 - A hegesztés anyagismerete és a hegesztéstechnológia alapjai (1995)

Külön eddig nem emeltem ki azokat a szakmai területeket, amelyekben kiváló meglátásai, ötletei voltak. Ezek megvalósításához is hozzákezdett, de leterheltsége miatt igyekezett fiatalokat is bevonni. Így kerültem jómagam is nagyon közvetlen szakmai kapcsolatba vele hazánk legnagyobb ipari balesete, a répcelaki robbanás és sínanyagok törésmechanikai tulajdonságai kapcsán. E közös eredményeink mellett sem mehetek el szó nélkül, már csak azért sem, mert Ő volt az, aki egyik meghatározó személyisége volt szakmai életem alakulásának. A 9 emberi életet követelő répcelaki baleset (1969. január 2.) „felborzolta” mind a nyomástartó edények gyártóinak, üzemeltetőinek, mind pedig az ezek felügyeletét ellátó hatósági szervezeteket. A jogi eljárások nyilvánvaló „példát statuálunk” célzata a korabeli újságok tudósításaiból jól tükröződnek egyrészt a jogászok szakmai hiányosságai, másrészt a jól felkészült műszakiak bizonytalanságai is. Az ilyen fajta, az ún. ridegtörés megelőzésére a hazai műszaki szakembergárda nem volt igazán felkészülve. Így az akkor létező két műszaki egyetem (a BME és az NME), valamint a témában illetékes akkori vezető kutatóintézet a VASKUT (amely nemzetközi szinten is „iparos” módjára tevékenykedett) gyorsan bekapcsolódott e tevékenységbe. Az NME részéről Béres Lajos kiváló, pozitív kompromisszumokat kereső szakember volt az, aki minden érintett szervezettel (üzemeltető, kutatás, felügyeleti hatóság) tartotta a kapcsolatokat és irányította a tanszéken folyó kutatásokat, munkákat. Ezek a következő három területre koncentráltak:

- az üzemelő nyomástartó edények anyagainak vegyi összetétele és ridegedési hajlama közötti korrelációs kapcsolatok keresése,
- a ridegedési hajlam roncsolásmentes meghatározását célzó roncsolásmentes vizsgálati eljárás kidolgozása,
- az üzemelő nyomástartó edények tényleges szerkezeti szilárdságának meghatározása vízzel végzett repesztővizsgálatokkal.

E három témában elért eredmények számtalan hazai és nemzetközi közleményekben, előadásokban bemutatásra kerültek, ill. új kutatási területeket, témaköröket indított el tanszékünkön. Hogy milyen jelentőségű volt „Béres-sejtés” számomra? E témakörökből készült a „kisdoktori” és Prohászka János támogatta kandidátusi disszertációm és egész szakmai pályafutásomat átfogó „nyomástartó rendszerekhez” kötődő, máig is élő ipari kapcsolatom.

Az nem kérdéses, hogy Béres Lajosnak „szíve egyik csücske” a „sínek világa” volt. Egészen fiatal koromban, nem sokkal végzésem után e témakörbe is bevezetett úgy, hogy csodálattal adóztam emberi bölcsessége előtt is. Máig kristálytisztán él emlékezetemben az a nap, amikor közösen ballagtunk a Ferencvárosi Pályaudvar közelében levő MÁV Anyagvizsgáló Laboratórium irányába Kecskés Péterhez, aki a teljes méretű sín

fárasztóvizsgálatait végezte. Lajos valahogyan így határozta meg a sikeres kutatói életpálya hozzávetőleges időskáláját:

- 35 éves korodig tanulj, szélesítsd ismereteidet, kezdj hozzá a publikálásokhoz és próbáld megtalálni azokat a területeket, amelyeken alkotni szeretnél, de ne feledkezz meg az idegen nyelvek fontosságáról!
- 45-50 éves korodig mélyedj azon témakörben, amelye(ke)t választottál és találd meg azon szűk témakört, területet, amelyhez újat tudsz hozzátenni. Ezeket folyamatosan publikáld és mutasd be nemzetközi konferenciákon.
- 50 éves korod felett írd könyveket, és ezzel tedd le névjegyed a szakmai közönség asztalára.

Akik szakmai életemet jól ismerik, azok visszaigazoltatják, hogy „Öreg Barátom” tanácsait kisebb-nagyobb pontossággal megfogadtam. A sínanyagok törésmechanikai jellemzőinek vizsgálata új témakörként jelent meg Miskolcon. Eredményeinket hazai és nemzetközi folyóiratokban, konferenciákon publikáltuk.

Béres Lajos szakmai tevékenységét mintegy 120 közleményben, cikkben tette közzé. Ezek mintegy harmada idegen nyelven (német, angol, lengyel, orosz, sőt még kínaiul is) jelent meg. Kiváló német nyelvtudása miatt számos alkalommal járt Németországban és Ausztriában, ahol többnyire szakmai előadásokat is tartott. Kiemelkedő kapcsolatok fűzték az Otto von Guericke Hochschule-hoz Magdeburgban, ennek hegesztéstechnikai intézetéhez.

Szakmai tevékenységét különböző kitüntetések adományozásával formálisan is elismerték. Ezek között szerepelt az Oktatásügy kiváló dolgozója (1974) és Kiváló Munkáért érdemérem (1979), MÁV vezérigazgatói köszönet és dicséret (1980), GTE Egyesületi Érem (1994), Zorkóczy Emlékérem (1998) is.

A felsorolt elismerések Béres Lajosnak a szakmai tevékenységét próbálták honorálni, de számára, mint egyetemi oktatónak, mint embernek talán az a legemlékezetesebb, amit diákjaitól kapott, akikkel mindig és mindenkor nyugodtan beszélgetett, segített a maga közvetlen módján mind a zárthelyikre, vizsgákra való felkészülésben, mind pedig a diplomaterv összeállításában. Béres Lajos már végzését követően bekapcsolódott a Terplán Zénó kezdeményezte periodikus diákújság, a HÚZÓTÜSKE (HÜTÜ) (1954-1991) szerkesztésébe. Az 1954-ben megjelent első számban a szerkesztőbizottság tagjaként is olvasható neve. A későbbiekben még négy (1960, 1964, 1970 és az 1982-ben kiadott) HÜTÜ-ben találhatunk vele foglalkozó anyagokat. Az almanáter strukturális átalakulásával, az új karok megjelenésével a diákújság is változik. A Gépészmérnöki Kar „GÉPKÖNYV” névvel foglalja össze az egyetemen eltöltött idő „diákságait”. Ennek első számában olvasható újból Béres Lajos neve, az 1981-ben végzett gépészmérnöki évfolyam „Tiszteletbeli Évfolyamtárs”

adományozással ismerte el azt a habitust, amely minden hallgató számára kedves és örömteli volt. A gondviselés kivételezettjének és ezzel hosszú életének köszönhetően a vasoklevelét is átvehette 2019. júliusában.



Béres Lajos vasoklevelét átvéve és az oklevél

Eljutva eddig, megálltam, visszaidézve Béres Lajossal eltöltött idő megannyi közös pillanatát, amelyeket őrzök mindaddig, míg agyam erre képes. Ha összefoglalni kellene mindazt, amit gondolok, akkor csupán ezt írnám: **Kedves Lajos! Végtelenül szomorú vagyok, hogy elmentél, hogy személyesen e földön már nem találkozhatunk. De büszke lehetsz magadra, mert hosszú életedben kedves, értelmes emberként sok olyan új tudással gyarapítottad szakmádat, amelyet nem csupán a jelenlegi, de még a következő generációk is használni fognak. Az 1932. augusztus 31-i (szerda) felsírásodtól a 2022. november 11-i (péntek) végleges elnémulásodig eltelt 32.944 napot úgy használtad ki, hogy annak csupán nyertesei vannak. A közvetlen környezeteden kívül búcsúzik Tőled az a szakmai közösség, amelyben életed leélted, annak minden egyes tagja szomorúan veszi tudomásul a megváltozhatatlant, de mindnyájunknak melegség fut át szíven, amikor átsuhan agyában életének egy-egy olyan pillanata, amelyben Társad lehetett, amelyet Veled tölthetett.**

Nyugodj békében!

Tóth László



ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA
PUBLIKÁLJON NÁLUNK!

**Írjon szakmai vagy általános
témájú cikket**

az

Anyagvizsgálók Lapjába!

Részletekért látogassza meg honlapunkat,
vagy írjon az alábbi email címek valamelyikére:

info@anyagvizsgaloklapja.hu
avilap.szerk@gmail.com

www.avilap.hu



A „Széchenyi” katlanpattanása

Boiler explosion of Széchenyi steam boat

1844. augusztus 10-én az Óbudai Hajógyár sólyaterén vízre siklott a „Széchenyi” gőzhajó törzse. Habár a gépezet és az árbóc még nem volt felszerelve, és a nevét kölcsönző legnagyobb magyar csupán a hajóorrban álló, róla készült szobor alakjában vett részt az eseményen, a nagy számú közönség tomboló lelkesedését tovább emelte, hogy első alkalommal itt csendült fel (a Nemzeti Színház kardalosai előadásában) Kölcsey Ferenc „Hymnus”-a [1].



1. ábra: A „Széchenyi” gőzhajó modellje [2]

A 100 lóerős gőzgéppel hajtott, teljesen fémtestű hajó 1845 márciusában állt forgalomba. Pontos menetrend szerint hozta-vitte az utasokat, néhány héttel később, május 8-án azonban drámai cikk jelent meg a pesti „Jelenkor” lapban [3].

„Folyó hó 5-kén kora reggel azon borzasztó hírrel ébresztetem álmambul fel, hogy „Széchenyi” katlana Gönyűnél szétpattant 's nem tudhatni még: hány – de alkalmasint sok – ember veszté éltét, 's még több sebesült súlyosban könnyebben.”

Így kezdődött gróf Széchenyi István közleménye Magyarország első, igazi műszaki balesetéről, a „Széchenyi” hajó kazánjának felrobbanásáról [3].



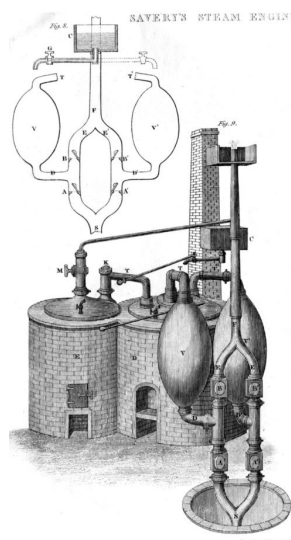
2. ábra: A „Széchenyi” katlanpattanása, a képet az egyik utas festette [1]

A cikk írása közben befutott újabb hírek pontosították a történeteket:

„...egy fűtő már megholt, kettő pedig haldoklik. – Kissé jobban van a két mozgonyár (Maschinist), noha ők is erősen megsérültek. Mindnyájuk közt leginkább reméllhetni Buchsler megmenthetését. – Szerencsére az első helyi utasok éppen a kabinban voltak ebédnél; csak egy a tüzelő-fa közelében állott ur vetteték a Dunába, fíja azonban, ki szinte a hajón volt, utána ugorván, szerencsésen kiszabadítá. – Egy katonatiszt nyakszirten sérült meg, több innen beszállott utas különféle könnyebb sebet kapott csavarok st. eff. által. – A katlan fele a Dunába repült; az egész gőzmozgony szét van rombolva. – Minthogy még több sapkát fogtak ki a vízből, sokan azt hiszik, több utas esett a Dunába; e hiedelem azonban mindeddig nem bizonyult be, mert lehetetlen vala összehozni áttekintés végett az utasokat.”

A Dunában úszkáló sapkákon túl a közvéleményt méltán foglalkoztatta a katlanpattanás kiváltó oka.

A gépiparral együtt fejlődő gőzgép történetjének állandó kísérői voltak a kazánrobbanások. Az első gőzgép szabadalmát 1698-ban jelentette be Thomas Savery (1650-1716). A „Bányászok barátja” néven reklámozott szivattyúban mozgó alkatrész nem volt, a víz szívását, majd tovább nyomását a gép tartálycsapjainak kézi nyitásával és zárásával vezérelt, munkaütemenként lekondenzáltatott gőz végezte (lásd 3. ábra). Az angol szénbányákban gyorsan elterjedt szerkezethez fűződik az ipari forradalom első ipari balesete. Savery egyik gépe 1706-ban felrobbant, a baleset során a gép kezelője életét vesztette.



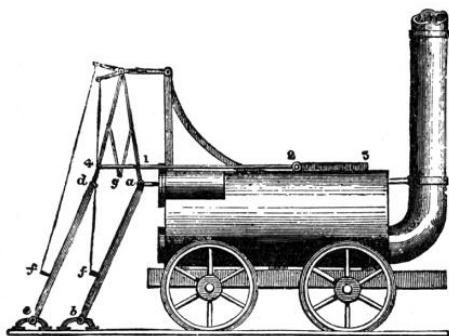
3. ábra: Savery gőzszivattyúja [4]

Az első gőzgépekben a dugattyút nem a gőznyomás, hanem a dugattyúra ható atmoszféra mozgatta. James Watt (1736-1819) hatalmas, helyhez kötött szerkezeteiben a kazán nyomása alig haladta meg a külső légnyomást. Az atmoszférikus gőzgép járművekben történő használatra alkalmatlan volt. Az úton és a sínen járó kocsik hajtására csupán a nagy nyomású gőzzel hajtott gépek kínáltak lehetőséget.

Az önjáró kocsik legkorábbi fejlesztésében komoly problémát jelentett annak eldöntése, hogy a meghajtott, sima kerék egyáltalán képes-e gördülni sima felületen. A feltalálók többsége nem bízott az álló és a mozgó felzínek közötti ébredő súrlódásban. A haladást különféle fogaskerék-fogaslécs kapcsolatokkal, vontató láncokkal és megannyi más módon megvalósító járművek között a

legbizarrabb szerkezet a „Gőz-ló” konstrukció volt.

William Brunton (1777-1851) skót feltaláló sínen járó mozdonyának négy kereke szabadon futott. A haladást egy vízszintes gőzhenger dugattyújával mozgatott csuklós mechanizmus lábai biztosították (lásd 4. ábra). Az 1813-ban üzembe helyezett lépegető mozdony a wales-i Newbottle szénbánya csilléit 1:36-os emelkedésű lejtőn óránként 3 mérföldes sebességgel vontatta.



4. ábra: Brunton lépegető mozdonya [5]

Brunton a szerkezetet továbbfejlesztette, újabb lépegető mozdonyába már két munkahengert és az előzőnél nagyobb kazánt szerelt. 1815. július 31-én, a gép nyilvános bemutatóján a nagyobb teljesítmény reményében a biztonsági szelepet is kiiktatták. A felrobbant kazán tucatnyinál több bányászot ölthet meg.

A reformkori magyar folyóiratok gyakran számoltak be külföldi gőzhajó balesetekről.

„...Amerikában a gőzösökkel folyvást sok szerencsétlenség történik. Moselle gőzösnek, az Ohion katlana szétpattanván a rajta volt 280 utazó közül alig menekedett meg 30 vagy 40 személy. A hajó személyzete jobbára német kivándorlottakból állott. – Hasonló gyászos eset történt apr. 23-án Orinoko gőzössel Vicksburgnál a Mississippin t. i. katlana ennek is szétpattanván, mintegy 75-100 ember veszté el életét; 30 sebesülve vitették Princetonba, hol nem sokára 16 közülök meg is halt.” [11]

„...A baltimorei kikötőben ismét egy új és Amerikában gyakori baleset történt. A Baltimore- Norfolk közlekedésre rendelt „Medorall” nevű új gőzhajó midőn mintegy 150 személylyel próbaútját tevé a (Patolesco) folyón, alig hogy az evező kerekek néhányat fordulának, a gőzkatlan iszonyú robajjal szétpattant, s a hajót és utasokat szétfúszva légbe röpté. A parttól száz lábnyira is találtak csonka holttesteket. A jelenet szívrepesztő látvány volt...” [12]

Mark Twain (1835-1910), a Tom Sawyer és Huckleberry Finn történetek szerzője, fiatal korában folyami kormányosként dolgozott. „Élet a Missisipin” című, magyar nyelven is olvasható könyvében a szemtanú hitelességével írta le két gőzhajó kazánjának tragikus robbanását.

A „Széchenyi” katlanpattanásának okáról elsőként Széchenyi István írt [3]. A gépezet a tekintélyes belga Cockerill gépgyárban készült, a katlant a bécsi Polytechnicum illetékesei a normál nyomás kétszeresével vizsgálták és jónak minősítették, Széchenyi véleménye szerint a robbanást csakis a kezelők gondatlansága okozhatta.

„...ha történt hiba – mi, mennyire lehető, szigorún meg fog vizsgáltatni – az alkalmasint áttalok, de bizonyosan nem készakarva történt, s így ők lettek áldozatává, s most béke hamvaiknak; hátramaradtakért pedig tegyen mindenki, mit tehet.”

A magyar gőzhajózás első 15 éve alatt nem történt hasonló esemény, s remélhetőleg

„...kevés idő alatt helyre álland azon bizodalom, mely a dunai gőzhajózást eddig kísérte, s ezen bizodalommal a vágy is, honunk minden folyóit ellátni gőzösökkel minél előbb.” [1]

A katlanpattanás ügyében mások is megszólaltak. Az első magyar Iparműkiállítás¹ „Gépészművek” alkotói között Knuczen Henrik „A műipar magasabb régióiban honos érdemeit” ezüst emléképpel tüntették ki. Knuczen díjnyertes hidraulikus sajtójáról a kiállítást ismertető 72 oldalas kis könyvben így írt Kossuth Lajos:

„más hasonló gépek felett azon jeles sajátsággal és elsőséggel bírt, hogy a gép külsejére alkalmazott erőmérték (dynamometer) tányérán minden nyomásnál látni lehetett, hogy a sajtó hány mázsányi súly erejével hat, miért is az sokféle természettudományi tapasztalatokra, különösen a testek sűrűségének s szilárdságának s ragosságának (cohaesio) kitapogatásánál megbecsülhetetlen szolgálatot tehet, aminthogy azon kiállított hidraulikus sajtó csakugyan az eperjesi iskola számára vétetett meg, s azzal természettani szerszobája kétségtelenül egy igen jeles szerzeményt tön.”² [6]

Knuczen Henrik gépgyártó Pest, Király utca 743. szám alatti műhelyét 1836-ban nyitotta meg. A derék szakember a hazai Iparegylet alapító tagjaként a közéletben is szerepet vállalt. Iparegyleti munkálkodásaiban több, kifejezetten az anyagvizsgálathoz kapcsolódó témával foglalkozott. Az egylet kiadványában, a Hetilap 1845. 1. évf. 26. számában a krompachi hengermű lemezeiből gyártott, valamint a hagyományos technológiával, kézi kalapálással készült rézedények tulajdonságait vetette össze.

A katlanpattanás okát Knuczen – az egylet Mechanikai szakosztályát elnöklő Prof. Jedlik Ányos³ (1800-1895) óvatos álláspontjához csatlakozva – a víz forráspontjánál lényegesen magasabb hőmérsékletre hevült gőz különlegesen megnövekedett nyomásában vélelmezte.

A XIX. század harmincas éveinek leghíresebb magyarországi szeszgyára, szeszkísérleti állomása, szeszfőző iskolája és szeszipari gépeket gyártó üzeme Ghillányi

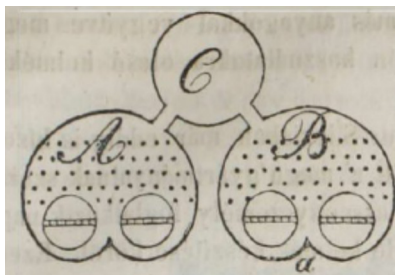
¹ A kiállítást 1842. augusztus 25. – szeptember 21. között, Pesten rendezték.

² Sajnos a berendezés több adata nem került elő. A leírtak alapján azonban az olvasóban óhatatlanul felsejlik az anyagvizsgálat klasszikus berendezése, az ingasúlyos szakítógép...

³ Jedlik saját kezű feljegyzései szerint 1845-48 között több magyarországi gőzgép műszaki ellenőrzését végezte. A háztartási bevételeket és kiadásokat sok évtizeden át aprólékosan rögzítő „Háztartási napló” szerint a professzor úr nyolc alkalommal vett részt „gőzmozgonyok (sic!) megpróbálásában”, és e munkákért összesen 81 forint díjazást kapott. [7, 8]

Sándor báró szerednyei (Ung megyei) birtokán működött. A báró 1836-tól a kor legjobb erjedési technikust és lepárló készülék szerkesztőjét, a Bajorországból Magyarországra költözött Gáll (a korabeli újságokban gyakran Gall) Lajos doktort alkalmazta. A címére igen büszke doktor úr a reformkori magyar iparfejlesztés különösen tevékeny közreműködője volt, az Iparegylet lapjában számos cikket publikált, a katlanpattanás ügyében is részletes állásfoglalást adott közre [9].

A Hetilap 1845. évfolyamának 127. oldala közölte a felrobbant kazán keresztmetszeti rajzát (lásd 5. ábra).



5. ábra: A „Széchenyi” katlanának keresztmetszete

Az alsó, A és B jelű víztereket a középen kettéosztott, kör keresztmetszetű fűtőcsövek hevítették, a felső, C jelű térben összegyűlő száraz gőzt vezették el a hajógép munkahengereihez. Az első robbanás az „a” jelű helyen, a második a C térben történt. A detonáció okát Gall doktor Alban⁴ közkeletű kézikönyvére hivatkozva, a kazán súlyos konstrukciós és mérethibáiban vélte megtalálni.

Az A és B vízterek különleges, fordított szív alakú keresztmetszetei „nem növelték a tartósságot”, ugyanis „...a gőzkatlan felületének, miszerint alakját el ne veszthesse, soha sem szabad befele menő hajításokkal bírnia.” További hiba volt a felhasznált lemezanyag elégtelen vastagsága, valamint a kazánlemezekeken kialakított szegecsfuratok fölöslegesen nagy száma. A robbanások éppenséggel ezeknél a furatoknál szakították el a lemezeket.

A baleset időszakában Magyarországon a gőzkazánokkal kapcsolatban semmiféle hatósági szabályozás nem volt. Gall doktor az általános törvény megjelentéig legalább ideiglenes rendeleteket várt volna az illetékes kormányhivataloktól.

A Magyarország területére vonatkozó legkorábbi gőzkazán szabályzat azonban csak a szabadságharc leverése után, a rossz emlékezetű Bach-korszakban, 1853. február 5-én született meg [10]. Veretes címéből kitűnik, hogy a rendelet bizony csak ideiglenes volt.

A „biztonléti szabályrendeletek” táblázataiban azonban igen részletes előírásokat tartalmaztak. Különösen fontos volt a biztonsági szelepek egész és tized bécsi hüvelykben megadott átmérőinek összeállítása. A veszélyességi fokozat ellenőrzéséhez közreadott formulákban „...a katlanbani legmagasb gőzfeszülés atmosphaerákban (egy bécsi négyszög hüvelykre 12 3/4 font), a katlannak fűtőlapja pedig bécsi négyszög lábokban van számítva”.

Fontos megjegyzés, hogy „... a tapasztalás azt tanítja, hogy a katlan átmérőjével s a gőzfeszítésével nem kell annyira menni, hogy a megkívánható pléhvastagság 6 1/2 vonalt meghaladjon, mert az igen vastag pléhből (mellynek jó minősége különben is sohasem olly biztos, mint a vékony pléheké) készített katlanok a tűz behatása által nagyon is könnyen megromlanak.”

Az ideiglenes „biztonléti szabályrendeleteket” az 1853. november 25-i „legfelsőbb határozvány”, majd az 1854. február 11-én kelt Kereskedelmi miniszteri, a Belügyi minisztériummal és a legfőbb rendőri hatósággal egyetértőleg kiadott 4137. számú, 29 §-t tartalmazó rendelet követte. Ez a két (magyar és német nyelven egyaránt olvasható) szabályozás a gőzkazánok használatba vétel előtti és időszakos ellenőrzését egy rendőri és egy „műértő” hivatalnokból álló szakértő bizottmány közreműködésével írta elő. A gőzkazán kezelését kizárólag szakképzett, vizsgázott személy kezelhette; a szabályok ellen vétők büntetése a hatályos „Büntető törvénykönyv” szerint történt.

Ezek a rendeletek alapozták meg Magyarországon a veszélyes berendezések, elsőként a kazánok tervezését, gyártását, vizsgálatait és hatósági felügyeletét. Innen eredeztethető a hazai műszaki biztonsági felügyelet máig tartó története.

Laczik Bálint

Irodalomjegyzék

- [1] Petneki Á.: A haladás jelképe: a gőzhajó, Rubicon, 2016. 9. szám 92-101 o.
- [2] PestBuda: Pestről Konstantinápolyig – Kiállítás a dunai hajózásról https://pestbuda.hu/cikk/20220420_pestrol_konstantinapolyig_kiallitas_a_dunai_hajozasrol (megtekintés: 2022. december 8.)
- [3] gr.Széchenyi I.: Széchenyi szétpattan! Jelenkor, Pest, 1845. 37. szám, május 8, 1. o.
- [4] The Engines of Our Ingenuity: Inventing the Steam Engine: <https://uh.edu/engines/CD-RainSteamSpeed/track8.html> (megtekintés: 2022. december 8.)
- [5] Catskill Archive: Curiosities of Locomotive Design: <http://www.catskillarchive.com/rrextra/odcuri.Html> (megtekintés: 2022. december 8.)
- [6] Misángyi V.: Tömeggyártás az öntödékben, Technika, Budapest, 1942 5. sz. 139-143. o.
- [7] Ferenczy V.: Jedlik Ányos élete és alkotásai, Győr, 2000, a Czuczor Gergely Bencés Gimnázium kiadása
- [8] Mayer F.: Epizódok Jedlik Ányos életéből, a Jedlik Ányos Társaság és a Magyar Szabadalmi Hivatal kiadása, 2010
- [9] dr.Gall: „Széchenyi gőzös” katlana szétpattanásáról, Budapesti Híradó 1845, 415. o.
- [10] Hirdetés Ő cs. k. Főhercegségétől Magyarország hadi és polgári kormányzójától 1853-ki február 5-kéről 3049 sz., amellyel ideiglenesen mindenféle gőzkatlanok használatánál megtartandó biztonléti szabályrendeletek tételnek közzé, Kormánylap, 1853, február 5, 149-162. o.
- [11] Hazai's Külföldi Tudósítások, 1838. 45. (június 6-i) szám, 352. o
- [12] Világ, 1842 évi 41. (május 21-i) szám, 84. o.

⁴ Ernst Alban (1791-1856) a nagynyomású gőzgépek fejlesztésének kiemelkedő egyénisége volt. 1843-ban adta ki „Die Hochdruckdampfmaschine” című könyvét, amely mihamar a nagynyomású gőzgépek tárgykörének több nyelvre is lefordított, hivatkozási alapműve lett.

Anyagvizsgálók Lapja keresztrejtvény



Vízszintes

- 1 Páratlan szám
- 3 Űrmérték rövid.
- 4 Riad belüli!
- 6 Község Győr közelében
- 14 Elöl nyom!
- 15 Döntéshozókhoz tartozók
- 18 Zoom közepe!
- 20 **Megfejtés 1:** Erfurti központú TÜV szervezet
- 21 Összegző függvény az Excelben
- 23 Nagy helyiség
- 24 Ék eleje!
- 25 Kötőszó
- 26 Női név
- 28 Névelő
- 29 Kerékpár márka
- 30 Cseresznye pirosodása
- 32 Elöl tol!
- 33 Elme vége!
- 34 Vége eleje!
- 35 Sugár
- 36 Mutatószó
- 37 Páros lenez!
- 38 Figyelem
- 42 Kedvelt valakit
- 44 Vég nélküli unió!
- 46 Medál
- 47 Társasági forma

Függőleges

- 48 Haladás egyenemű!
- 49 Függeszt
- 51 Ókori görög szolga
- 53 Sor vége!
- 54 Publicisztikai műfaj
- 56 Egyik helyen sem
- 58 Kérdőszó
- 59 A Volga mellékfolyója
- 61 Hím macska
- 63 Az a végén!
- 64 Piszok
- 67 Kukta része!
- 68 Huta belseje!
- 69 Német személyes névmás
- 70 Egy harmada!
- 71 Angol úr
- 72 Orvosnál mondhatjuk
- 73 Bíró
- 77 Lumen része!
- 78 Gyorsan
- 80 Őt vége!
- 81 Felület fényérzékenységének egyik egysége
- 82 Zenei alkotás
- 85 Angol öreg
- 86 Esély
- 88 Iratokat rendez
- 89 Szita

Függőleges

- 1 Maga
- 2 Súlymérték rövid.
- 3 Összejevetelt elnököl
- 4 Indiai valuta
- 5 Vita
- 6 Saját erő
- 7 Iker-iker transzfúziós szindróma rövid.
- 8 Német tea
- 9 ...kelve
- 10 Vers eleje!
- 11 Test dísz
- 12 Mássalhangzó
- 13 Angol te
- 15 Iroda
- 16 Tagadószo
- 17 Európai Unió
- 19 Német nagymama
- 20 Elmélet
- 22 Karzat része!
- 23 Társadalom biztosítás rövid.
- 27 Fentről levez
- 30 Év eleje!
- 31 Magam szintén
- 32 Közterület
- 34 Dunántúli hegység
- 39 Utolér
- 40 Jelentéssel bíró hangsor
- 41 Népszerű videójáték
- 42 Stílus történelmi korszak
- 43 Arány
- 44 **Megfejtés 2:** Milyen jel kell 2023. január 1-től az Egyesült Királyságba szállítható nyomástartó berendezésekhez?
- 45 Indiai kenyér
- 46 Kémiai vegyület, régen alkotószó
- 49 Északi sark
- 50 Délutáni összejevetelt
- 52 Római 50
- 55 Dehogy
- 57 Korház
- 60 Rövid
- 62 Község Szeged közelében
- 64 Autó márka
- 65 ...Mária, történet
- 66 Apáca lakhely
- 68 Vonaton ül
- 70 Nem amaz!
- 74 Ital eleje!
- 75 Kicsinyítő képző
- 76 Urán vegyjele
- 79 Női hang
- 83 Latin és
- 84 Római ezer
- 86 16-os rendszámú elem vegyjele
- 87 Nitrogén
- 88 Névelő
- 90 Oxigén

A helyes megfejtők között a **TÜV Thüringen Hungary Kft.** által felajánlott ajándék kerül kisorsolásra.

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

Beküldési határidő: **2023. március 5.**

A **2022/III. lapszám keresztrejtvényének nyertese:** Sátán-Papp Szonja

**Mechanikai anyagvizsgálatok:**

- Szakító-, nyomó-, hajlító-, torziós vizsgálatok (miniszakító vizsgálatok is)
- Axiális, torziós és biaxiális fárasztó vizsgálatok (LCF, HCF)
- Törésmechanikai vizsgálatok (KIC, JIC, DKth, dadN)
- Szerkezet-fárasztó vizsgálatok
- Szerkezetek terheléses vizsgálatai
- Ütővizsgálat (műszerezett is)
- Ejtő vizsgálatok (műszerezett is)
- Keménységmérések (HBW1...5, HV0,05...HV10, HRC, SHORE)
- Műszerezett keménységmérés (ABIT)
- Felületi érdesség meghatározás
- Fajsúlymérés
- Műanyagok dinamikus tulajdonságainak meghatározása (DMA)
- Hegesztéstechnológiai vizsgálatok
- Biomechanikai vizsgálatok
- SmallPunch (SP) vizsgálatok

Roncsolásmentes anyagvizsgálatok:

- Ultrahangos falvastagság-mérés és hibakereső vizsgálatok
- Fázisvezérelt ultrahang vizsgálatok
- Penetrációs vizsgálat
- Mágnesporos vizsgálat
- Örvényáramos vizsgálatok
- Roncsolásmentes vizsgálati tervek készítése

SZERKEZETINTEGRITÁS ÉS GYÁRTÁSTECHNOLÓGIA OSZTÁLY

**Komplex szerkezetek vizsgálata, hegesztett kötések elemzése:**

- Törésmechanikai és szilárdsági elemzések
- Hegesztett kötések modellezése
- Komplex szerkezetek numerikus analízise

Új és meglévő erőművi rendszer és rendszerelemek szakértése:

- Szerkezetintegritás elemzések atomerőművi szerkezetekben
- Üzemelés hatására bekövetkező károsodások elemzése
- Ultrahangos vizsgálatok modellezése
- Nemzetközi K+F projektek, SNETP AISBL részvétel
- Független műszaki szakértői tevékenységek

Digitális Valóság Laboratórium:

- Virtuális- és kiterjesztett valóság rendszerek fejlesztése
- Ipari és orvosi környezetek virtualizációja, digital twin megoldások
- Jármű-vezetéstámogató rendszerek kutatása

Műanyag- és additív technológiai elemzések, szimulációk:

- Fröccsöntési és additív gyártástechnológia szimulációja
- Termékek mechanikai modellezése, szerszámtervezés
- Erősített biopolimerek vizsgálata

Járműdinamikai, erőátvitel, hajtáslánc, tribológia:

- Többtest dinamikai, rezgés- és tribológiai modellezés
- Gyorsított élettartamvizsgálat
- Hajtásláncok laborkörülmények közötti automatizált tesztelése

Támogatjuk vállalkozások projektötleit technológiai fejlesztési-, technológiai és üzleti kockázatelemzési-, minőségbiztosítási-, szellemi tulajdon védelmi kompetenciáinkkal.

Stratégiai irányok

- KKV támogatás, vállalkozásfejlesztés
- Nemzetközi kapcsolatok
- Innovációmenedzsment
- Tudománykommunikáció
- Szervezetfejlesztés

Szolgáltatásaink

- Hazai és nemzetközi pályázatírás
- Projekttervezés
- Projektmenedzsment
- Piackutatás, trendfigyelés
- Hálózatépítés
- Üzleti tervezés és tanácsadás, üzleti modellek kialakítása
- Oktatás, pályázati disszemináció
- Forrásteremtés, nemzetközi forrásbevonás
- Szellemi tulajdon-védelmek adminisztrációja
- Technológiai inkubációs szolgáltatások

Hosszútávú együttműködés – Ügyfélből partner

[HTTPS://BAYZOLTAN.GETLEARNWORLDS.COM/](https://bayzoltan.getlearnworlds.com/)

A Bay Zoltán Kutatóközpont
új ismeretterjesztő platformja

Mi micsoda az Ipar 4.0-ban?



A legújabb kutatási eredmények az Ön cégének szolgálatában

Innovatív, interaktív oktatóanyag, amely az átfogó ismeretanyagon túl bemutatja a magyar vállalatok helyzetét és viszonyukat az Ipar 4.0 technológiákhoz.

Világszínvonalú tudás

/ Üzleti szemlélet

/ Gyakorlati példák