

Anyagvizsgálók Lapja

Az Ország vezető szaklapja

A tudomány
szolgálatában

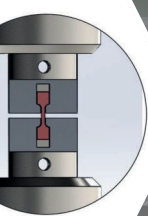
A lap kiemelt
támogatója:

HUN
REN

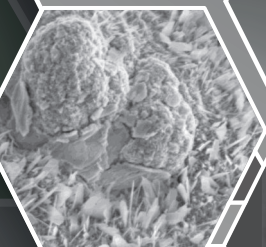


Energiatudományi
Kutatóközpont

Elektronsugaras
vizsgálatok,
Próbatestek
fejlesztése



Szakmai cikkek



Digitális Pár,
Szerkezetintegritás,
Anyagvizsgálatok
innovatív kiértékelési
módszerei

Hűtőközeg-
vesztéses üzemzavar,
Hőkezelési
paraméterek
választása

Trampus Péter
Magyar Érdemrend
tisztikereszt
kitüntetés



Pungor Ernő
születésének
centenáriuma,
Emlékezés Bay
Zoltánra



Fissziós reaktorok
anyagainak
európai kutatási
irányai



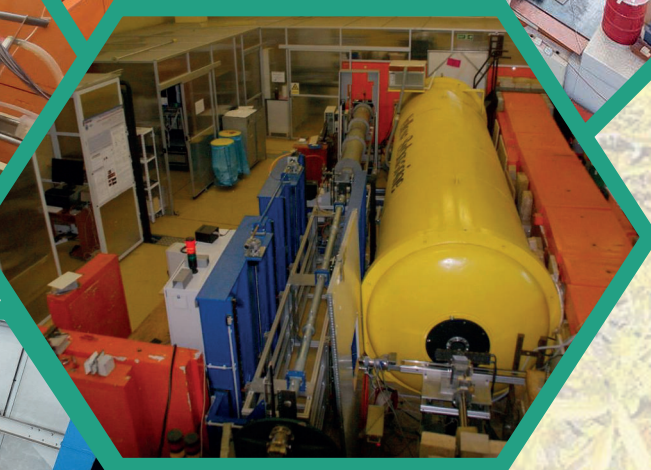
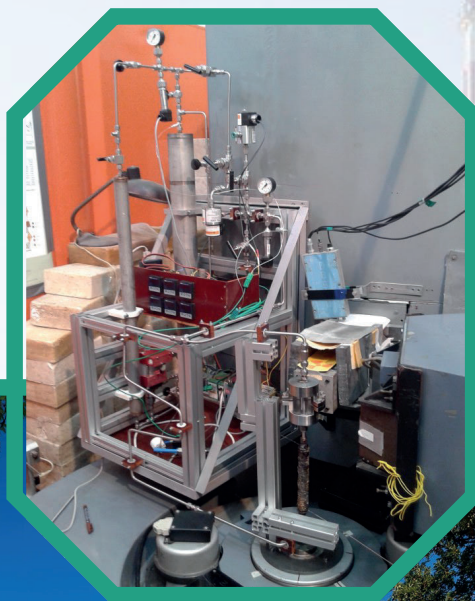
Beszélgetés
Paczoly Győzővel

2023/III.
lapszám

HUN
REN



Energiatudományi
Kutatóközpont



Mélyen tisztelt Olvasóim!



„A 2023-as esztendő nagy iramban indult”-kezdtém előző számunk „Jegyzet” rovatát. Hogy mennyire így volt, mindenki meggyőződhet erről, ha átlapozza a 2023/2 lapszám 64 oldalnyi terjedelmét. Mostanra mindez csak fokozódott – lehetne mondani az olcsó népszerűsége törekedve. Fogalmazhatnám e gondolatot, „politikusi módra” is, de nem kenyerem. A néhai Sályi István (1901-1974) professzoromra, az Almamáterem kiemelkedő professzorára, rektorára emlékezvén inkább az „általánost” – az eseményeket összekötő – és nem a „partikulárist” – az egyedit – keresem a lapunk egymásutáni két számában. Igazán könnyű helyzetben vagyok!! Van egy név, amely szervesen összeköti az egymásután megjelenő lapszámokat. Ez pedig nem más, mint Bay Zoltán (1900-1992). Az előző lapszámban részletes beszámoló olvasható arról, hogyan kerültek újból egymás mellé Gyulaváriban a 45 éves boldog, kiegyensúlyozott családi életet élt házaspár tagjai, és Márki-Zay Lajos mily erős, emocionális közegben őrzi és kezeli Bay Zoltán emlékét. Ezt a kört színesíti, bővíti Kádár György professzor, a Bay Zoltán Tudomány és Technikatörténeti Alapítvány (alapítva 1993-ban, tehát 30 éve) főtítkárának írása, aki ugyancsak személyes kapcsolatába is bepillantást enged. Mindezt erős tónusokkal szélesíti a Bay Zoltán és Pungor Ernő személyes kapcsolata és „ennek terméke” a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., amely most – november 2-án – ünnepli fennállásának 30. évfordulóját. A néhai Pungor Ernő kiváló érzékkel ismerte fel, hogy a hazánkban már működő ipari, egyetemi és akadémiai kutatási struktúrákat ki kell egészíteni a piaci jegyeket is hordozó „non-profit” elemmel. Az elmúlt 30 év igazolta gondolatainak helyességét. Jómagam, mint kiszemeltje (a minta, a Fraunhofer-Gesellschaft működésének tanulmányozója) és a „Bay-struktúra” aktív tagja 30 éve, csak dicsérni tudom a „Professzor Úr” – mert többnyire így szólítottuk Pungor Ernőt – előrelátását. Ahogyan az 1990-es évek gazdasági környezetének lehetőségeit ki- és felhasználta a „non-profit struktúra” létrehozására és „talpra állítására, stabilitásának megeremtésére”, azt tanítani lehetne. De nem csupán a „Bay-struktúra” ünnepe most, hanem az alapító is! Születésének (1923. október 30. Vasszécseny) centenáriumát, azaz százéves jubileumát! Életéről, tevékenységéről sokan és sokat írtak. Talán életrajzi ihletésű könyve¹ az, amelyben maga a gondolkodó ember, az egyén legjobban megismerhető. Ha tovább szeretnénk színeezni azt a kört, amelynek középpontját Bay Zoltán jelöli ki, akkor csupán utalok arra, hogy e lapszámban jelenik meg Hargittai István és Hargittai Balázs új könyvének² recenziója, amelynek 204-208. oldalain Bay Zoltán életrajza olvasható. Az amerikai magyar diaszpórában élő, a kontinuummechanika numerikus módszereinek konvergenciája területén ugyancsak jelentős eredményeket elért Szabó Barna tavaly megjelent életrajzi ihletésű könyvében³ szintén személyes találkozásokat megörökítő mondatok jelennek meg Bay Zoltánnal kapcsolatban.

Egy szakmai folyóirat felelős szerkesztőjének nem is lehet nagyobb szerencséje, mint nekem! Az ok egyszerű. Kutatási struktúrákról, kutatókról beszélve, e lapszám az Energiatudományi Kutatóközpont támogatásával jelent meg. Köszönet érte!

Tóth László
felelős szerkesztő

¹ Pungor E.: Ifjan-Éretten-Öregben. Beszélgetőtárs: Tóth L. 2003.
<https://mek.oszk.hu/html/vgi/kereses/keresesujgy.phtml?tip=gyors&cim=ifjan>

² I. Hargittai, B. Hargittai: Brilliance in Exile. CEU Press, 2023.

³ Szabó B.: Ifjan-Éretten-Öregben. Beszélgetőtárs: Tóth L., 2022.
<https://mek.oszk.hu/html/vgi/kereses/keresesujgy.phtml?tip=gyors&cim=ifjan>

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

Spisák Bernadett

Szűcs Pál

Nemzetközi szerkesztőbizottsági tagok:

Dr. Bitay Enikő (Románia)

Dr. Djorde Dobi (Szerbia)

Dr. Dusza János (Szlovákia)

Dr. Kristián Máthis (Cseh Köztársaság)

Dr. Major Zoltán (Ausztria)

Az 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	

ANYAG, ANYAGSZERKEZET – MATERIAL, MATERIAL STRUCTURE

SZENTHE Ildikó, MÓRITZ Szilvia, HARGITAI Balázs, CINGER Dávid	6
Hőkezelési paraméterek választása nyomott vizes reaktorok primerköri alkatrész anyagainak vizsgálatához	
Selection of heat treatment parameters for testing the primary circuit materials of pressurized water reactors	

RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLATOK – NON-DESTRUCTIVE TESTING

PINTÉRNE CSORDÁS-TÓTH Anna, ILLÉS Levente, PEREZ-FERÓ Erzsébet, NOVOTNY Tamás, HÓZER Zoltán, J. STUCKERT, Martin ŠEVEČEK	11
Magas hőmérsékleteken oxidált krómbevonatos Zr burkolatminták elektronsugaras vizsgálatai	
Electron beam studies of Cr-coated Zr cladding samples after high temperature oxidation	

ÁLLAPOTELLENŐRZÉS, ÉLETTARTAM GAZDÁLKODÁS - RELIABILITY ASSESSMENT, LYFE CYCLE MANAGEMENT

FARKAS Róbert, HÓZER Zoltán, KIS Zoltán, PEREZ-FERÓ Erzsébet, KIRÁLY Márton, HORVÁTH Lászlóné, NOVOTNY Tamás, SZABÓ Péter, BUBONYI Tamás	17
Hűtőközegvesztéses atomerőművi üzemszavar kísérleti modelle	
Experimental simulation of a nuclear power plant loss-of-coolant accident	
FEKETE Tamás	22
Nagyméretű nyomástartó rendszerek szerkezetintegritási kérdéseiről	
On structural integrity issues for large scale pressure systems	

MECHANIKAI VIZSGÁLATOK - MECHANICAL TESTING

FEKETE Tamás	28
Anyagvizsgálatok és kiértékelésük innovatív módszertana	
Innovative methodology for material tests and their evaluation	
FEKETE Tamás, ANTÓK Dániel, TATÁR Levente, BERECKZI Péter	39
Szakítóvizsgálatok innovatív kiértékelési módszertanáról	
An innovative methodology for evaluating tensile tests	
CINGER Dávid, HARGITAI Balázs, CSIKÓS Kristóf Andor, SZENTHE Ildikó	55
Mini-szakító próbatestek fejlesztése	
Development of mini-tensile test specimens	
SPISÁK Bernadett, SZÁVAI Szabolcs	58
Feszültségintenzitási tényező összefüggésének meghatározása hibrid CT próbatesthez	
Determination of the correlation of the stress intensity coefficient for a hybrid CT test specimen	

HÍREK – NEWS

SZENTHE Ildikó	64
Fissziós reaktorok anyagainak európai kutatási irányai	
European research topics in fission reactor materials	
TÓTH László	67
Pungor Ernő születésének Centenáriuma	
For the Centenary of the Birth of Ernő Pungor	
KÁDÁR György	70
Emlékek Bay Zoltánról	
Memories of Zoltán Bay	
TÓTH László	72
Egy kitüntetés margójára, Trampus Péter Magyar Érdemrend tisztikereszt kitüntetése	
On the margins of an award	

PORTRÉ – PORTRAIT

SKOPÁL István

Beszélgetés Pazcolay Győzővel
Interview with Győző Paczolay

73

NEKROLÓG – OBITUARY

TRAMPUS Péter

Milan Brumovsky (1935-2023)

77

ÉRDEKESSÉGEK – POINT OF INTEREST

LACZIK Bálint

Valós és képzelt masinák
Real and imaginary machines

79

TÓTH László

Könyvismertetés: Kiválóságaink a száműzetésben Magyar tudósaink diaszpórája Neumann Jánostól Karikó Katalinig
Book review: Brilliant in Exile, The Diaspora of Hungarian Scientists from John von Neumann to Katalin Karikó

84

Keresztrejtvény - Crossword



Előfizetés megújítás! Még most sem késő!

Ne felejtse el

**a meglévő előfizetését megújítani vagy
új előfizetését elindítani!**

**A korábbi nyomtatott lapszámok
kedvezményesen megvásárolhatók!**

Írjon a marovisz@marovisz.hu email címre!



Hőkezelési paraméterek választása nyomott vizes reaktorok primerköri alkatrész anyagainak vizsgálatához

Selection of heat treatment parameters for testing the primary circuit materials of pressurized water reactors

Szenthe Ildikó^a, Mórítz Szilvia^b, Hargitai Balázs^c, Cinger Dávid^d

^aHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Reaktoranyagok kutatócsoport vezető, szenthe.ildiko@ek.hun-ren.hu

^bHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, mérnök, moritz.szilvia@ek.hun-ren.hu

^cHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, mérnök, hargitai.balazs@ek.hun-ren.hu

^dHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, anyagvizsgáló mérnök, cinger.david@ek.hun-ren.hu

Kulcsszavak

ausztenites acél,
nyomott vizes reaktor,
hőkezelés,
hosszútávú élettartam,
öregedés

Keywords

austenitic steel,
pressurized water reactor,
thermal treatment,
Long Term Operation,
embrittlement

Absztrakt

A nyomottvizes reaktorok hosszabb távú, 60 évnél hosszabb üzemidejű működésének elengedhetetlen feltétele a primerköri berendezések, szerkezetek anyagainak vizsgálata is. Az Európai Unió támogatásával 2022 júniusában indult projekt, a DELISA: „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” a hosszú távú, 60 éven túli működés néhány problémájára akar választ adni. A projekt egyik célja a hosszú távú működés szempontjából leginkább érintett és veszélyeztetett komponensek meghatározása, 60 éven túli működésük anyagtulajdonságokra gyakorolt hatásának leírása, kifejezetten az öregedés során fellépő duzzadásra és a termikus igénybevétel által okozott öregedési mechanizmusokra fókuszálva. A munka egyik első lépése a megfelelő hőkezelési paraméterek kiválasztása, amelyekkel vizsgálható a résztvevő intézetek, intézmények által felajánlott, elsősorban primerköri komponensek és csővezetékek anyagain a termikus öregedés hatása a 60 évet meghaladó üzemelés esetén.

Abstract

The examination of the materials of the primary circuit equipment and structures is also an essential condition for the long-term operation of pressurized water reactors, with a service life of more than 60 years. DELISA, a project launched in June 2022 with the support of the European Union: "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" - wants to answer some of the problems of long-term operation beyond 60 years. One of the objectives of the project is to determine the most affected and endangered components from the point of view of long-term operation and to describe the effect on the material properties after 60 years operation, specifically focusing on swelling occurring during aging and aging mechanisms caused by thermal stresses. One of the first steps of the work is the selection of the appropriate heat treatment parameters, which can be used to examine the effect of thermal aging on the materials of the primary circuit components and pipelines offered by the participating institutes, in the case of more than 60 years of operation.

1. Bevezetés

Az 5 résztvevő ország: Finnország, Csehország, Magyarország, Szlovákia, Ukrajna 9 kutatóintézet részvételével az Európai Unió támogatásával 2022 júniusában elindult DELISA: „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” projekt célja a nyomott vizes reaktorok biztonságos működése szempontjából kritikus elemeinek vizsgálata hosszú távú, 60 évet meghaladó üzemidő esetén. A projekt célja a vízzel moderált/vízűtűtes reaktorok (VVER) hosszú távú üzemeltetése (LTO) szempontjából leginkább érintett és veszélyeztetett komponenseinek meghatározása, az LTO anyagtulajdonságokra gyakorolt hatásának leírása, vizsgálatokkal olyan szimulációs eszköz kifejlesztése, amely képes a meghibásodások korai előrejelzésére. A projekt kutatási eredményeinek beépítése az atomerőművek jövőbeli üzemeltetésére vonatkozó ajánlásokba az üzembiztonság növekedésének irányában hat és befolyásolja a reaktor élettartamának kiterjesztését is a lehetséges meghibásodás időbeni előrejelzése révén. A projekt kifejezetten az öregedés során fellépő duzzadásra és a termikus igénybevétel által okozott öregedési mechanizmusokra fókuszálva vizsgálja, hogy melyek a hosszú távú, 60 éven túli üzemidő szempontjából leginkább érintett és veszélyeztetett reaktortartály belső és primerköri komponensek. A modellezési technikák, a mechanikai, mikroszerkezeti és alkalmazott, akár működés közbeni roncsolásmentes

anyagvizsgáló eljárások együttes értékelése szükséges a rendszer integritásának csökkenését jelző, hatékony, „korai figyelmeztető” szimulációs eszköz fejlesztéséhez.

A munkát a konzorcium résztvevői 6 munkacsomagra osztották fel. A projekt koordinációját a cseh CVR (Centrum výzkumu Řež) végzi, a kritikus komponensek, anyagok meghatározását, a vizsgálandó anyagok kiválasztását, értéklését a VÚJE kutatóintézet, a kapcsolódó szimulációs munkát az ukrán SSTC NRC (State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety) intézet vezeti, részt vesz benne a magyar Bay Zoltán Kutatóintézet is. A kísérleti munkát a cseh VÚJE, a biztonsági irányelvek szintézisével kapcsolatos munkát a magyarországi HUN-REN Energiatudományi Kutatóintézet, az eredmények publikálásával kapcsolatos munkát pedig a szlovákiai STUBA (Slovenská technická univerzita v Bratislave) egyetem vezeti. A projekt kezdete óta eltelt idő alatt a résztvevő intézetek szakmai kérdőíveket dolgoztak ki a hosszú távú üzemeltetés során a biztonság szempontjából kritikusnak minősülő, rendszerek, szerkezetek és alkatrészek (SCC = safety critical components) ország- illetve reaktor típusonkénti meghatározásához a kapcsolódó biztonsági irányelvek felméréséhez. A rendelkezésre álló anyagok összegyűjtése után elvégeztük a termikus öregedés hatásának kísérleti felméréséhez és LTO esetre történő validálásához szükséges hőkezelési lépések meghatározását és összefoglalásukat a termikus öregítés mátrixába. Ez szolgál alapjául a projektben végzendő további munkához,

a kísérleti mátrix elkészítéséhez is.

2. A projekt során vizsgált rendszerek és anyagai

A projekt előkészítésének időszakában a projektben pályázó intézetek felmérték a rendelkezésre álló, további vizsgálatra alkalmas anyagokat. A 60 éven túli üzemidő szempontjából leginkább érintett komponensek közé tartoznak a gőzfejlesztők hőcserélő csövei jellemzően ciklikus termikus igénybevétellel, és a duzzadás szempontjából a reaktortartály belső részei. Olyan, a partner intézeteknél már rendelkezésre álló anyagokra volt szükség, amelyek legalább 20-30 évet üzemben töltöttek, naplózott körülmények között, ugyanakkor rendelkezésre állnak a beépítés előtti eredeti anyagjellemzők is. A rendelkezésre álló anyagok közül végül a 28 évig üzemelt, leállított Jaslovské Bohunice Atomerőműből (VVER 440 V230 típusú, Szlovákia - 1. blokk és 2. blokk,) a magyarországi Paksi Atomerőműből és VVER 1000 típusú ukrainai reaktorokból származó, főképp reaktorbelső és primerköri eredetű anyagokra került a választás (1., 2. és 3. táblázat).

3. A termikus öregedés és hatása

A hosszan tartó hőmérsékletnek való kiettség által okozott mechanikai tulajdonságváltozás halmazát termikus öregedésnek hívjuk. A termikus öregedés következtében megváltozik a szerkezeti állapot, ami a fém elridegedéséhez vezet.

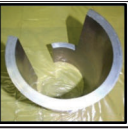
Az atomerőmű berendezések és csővezetékek esetében a termikus öregedés különösen a hosszú távú üzemelés során fejt ki hatását, ezért ennek a hatásnak a figyelembevétele kiemelten fontos az atomerőművi berendezések és csővezetékek élettartamának meghosszabbítása során.

Az atomerőművek hosszú távú üzemeltetésének tapasztalatai szerint ez a degradációs mechanizmus számos berendezés számára jelent potenciális károsodást, ezért hatását folyamatosan szükséges monitorozni. Bár a szakirodalom [1, 2] ismeri a jelenséget, a 60 éven túli üzemeltetés esetén a termikus öregedés hatásának további vizsgálata, a roncsolásos vizsgálatok eredményeire épülő mikroszerkezeti vizsgálatok szükségesek.

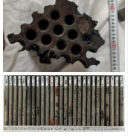
A primerköri berendezések, csövek, a reaktorbelső anyagainak nagy része ausztenites acélból készültek. Az ausztenites hengerelt, kovácsolt, húzott acélokból készített berendezések esetén a szívós tönkremeneteli mód a jellemző. Ezek az acélok nem érzékenyek termikus öregedésre az atomerőmű üzemelési hőmérsékletén és hosszú idejű üzem után is megőrzik a szívós tulajdonságaikat. Az ilyen anyagokra, a szilárdsági jellemzők mellett a J-R görbe alkalmas a törési szívósság, repedéssel szembeni ellenállás leírására. Azoknál az anyagoknál, ahol a J-R görbe és a Charpy ütmunka jelentős csökkenése nem várható hosszú idejű 300 °C alatt történő üzem közben, a gyári szilárdsági számítások, illetve az ASME szerinti szilárdsági felülvizsgálat során a gyári dokumentációban megadott törési szívósságra vonatkozó adatok használhatóak.

Más a helyzet az öntött ausztenites acél alkatrészeknél, és egyes ausztenites hegesztési vagy ausztenites-ferrites

1. táblázat: A VUJE részéről felajánlott anyagok listája

Reaktor	Komponens	Állapot	Anyag	Működési hőmérséklet T _{op} (°C)	
V1 NPP WVER-440	Hűtő köri csővezeték és ellátócsővezeték közötti T elágazás		08Ch18N12T-alapanyag, hegyanyag, hő érintett zóna	294	
	Csővezeték darabok	28 év üzemidő	08Ch18N10T-alapanyag, hegyanyag, hő érintett zóna	276	
	Nyomásszabályozó tartály bekötő cső darabok		08Ch18N10T-alapanyag	276	
	Primerköri csővezeték	Eredeti állapotú	08Ch18N12T-alapanyag		
	Nyomásszabályozó tartály bekötő cső darab		08Ch18N10T-alapanyag		

2. táblázat: Az IPP-Centre részéről felajánlott anyagok listája

Reaktor	Komponens	Állapot	Anyag	Működési hőmérséklet T _{op} (°C)	
WVER-1000	Karimás rögzítés részei: csap, anya, alátét	30 év üzemidő	38ChN3MFA	240-305	
	Gőzfejlesztő és hőcserélő csövek	Bemutató darab	08Ch18N10T		
	Fő hűtőköri csővezeték	Eredeti állapotú	10GN2MFA plattírozással	(290)	
	csap, anya darabok	Eredeti állapotú	38ChN3MFA	(240-305)	

3. táblázat: Az MVM Paksi Atomerőmű részéről felajánlott anyagok listája

Reaktor	Komponens	Állapot	Anyag	Működési hőmérséklet T _{op} (°C)	
WVER-440	mintafűző termikus tokok	24 év üzemidő	08Ch18N10T	278	
		32 év üzemidő	08Ch18N10T	278	
	FKSZ vezetőkerék darab	27 év üzemidő	10H18N9TL	266	

átmeneti hegesztési varratoknál. Ezeknél az alkatrészeknél az atomerőmű üzemi hőmérsékletén hosszú idejű üzem után jelentős termikus elridegedésre lehet számítani, és a J-R görbe, valamint a Charpy ütőmunka értékeit az üzemi hatások figyelembevételével kell meghatározni 50, illetve 60 üzemévet figyelembe véve. A J-R görbe alapján kerülnek meghatározásra a számításokhoz szükséges jellemzők, úgymint:

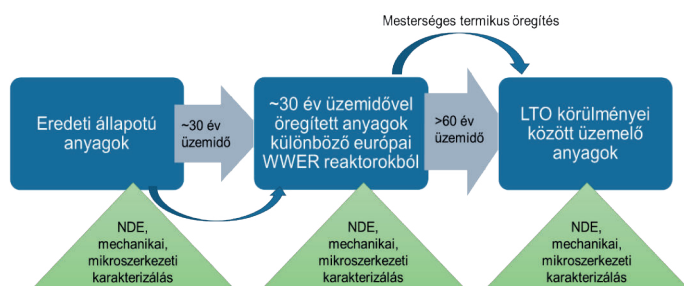
- $J_{0,2}$ – 0,2 mm stabil repedésterjedéshez tartozó J-integrál érték, mint kritikus érték,
- $J_{0,1}$ – 0,1 mm in stabil repedésnövekedéshez tartozó J-integrál érték.

Bár a saválló plattírozás is a hegesztett ausztenites acélok közé tartozik a plattírozásnál jelentős termikus elridegedést nem tapasztaltak.

Hegesztett kötések termikus elridegedése esetén jól ismert jelenség, hogy az öntött saválló acél szerkezetek hajlamosak termikus elridegedésre a 250 °C feletti hőmérséklet tartományban [3]. A maximális hatás 475 °C-on jelentkezik, ezért a jelenséget gyakran a 475 °C-os ridegedésnek hívják. Ez a hőmérséklet ugyan jóval meghaladja a nyomott vizes reaktorok fő hűtőkörének maximális üzemelési hőmérsékletét, de jelenleg nem áll rendelkezésre adat a 60 éven túli üzemidő hatására vonatkozóan.

4. A termikus öregedés hatásának kísérleti felmérése a DELISA projektben

Olyan anyagok termikus öregedését követik nyomon a 60 éven túli üzemidő által okozott károsodás meghatározásáig, amelyek rendelkezésre állnak eredeti állapotban is, vagy rendelkezésre állnak az üzemeltetés előtti, eredeti anyagtulajdonságok. A kb. 30 évet üzemelt anyagok tulajdonságainak mechanikai, mikroszerkezeti és nondestruktív vizsgálati eredményeit összehasonlítják a további 30 évnyi üzemidőnek megfelelő, laboratóriumi körülmények között végzett, mesterséges termikus öregedés által okozott tulajdonságváltozással, ezzel nyerve információt a 60 éven túli, LTO üzemelés anyagöregedést okozó következményeiről.



1. ábra: Anyagtulajdonságok meghatározása ~30 évet üzemben töltött és mesterségesen hőkezelt anyagokon

A rendelkezésre álló anyagok alapján, a résztvevő laboratóriumok által elvégzendő kísérleti módszerek és eljárások (pl. szakítóvizsgálat, mikroszkópos vizsgálat, törési szívósság) számbavételével készül el a termikus öregítés vizsgálati mátrixa, amely a kísérletek során az alapot adja a termikus öregítés hatásának felmérésére.

5. Módszertan

A laboratóriumi körülmények közötti, mesterséges termikus öregítéshez szükséges időt az Arrhenius egyenlettel határoztuk meg.

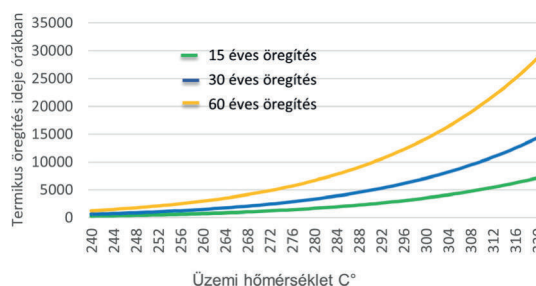
$$\frac{t_1}{t_2} = \exp \left[\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right], \quad (1)$$

ahol t_1 az üzemidő T_1 hőmérsékleten, t_2 pedig a mesterséges termikus öregítéshez szükséges idő T_2 hőmérsékleten, Q az Arrhenius aktiválási energia értéke (100 kJ/mol), és R az egyetemes gázállandó (8,368 J/molK) [4, 5].

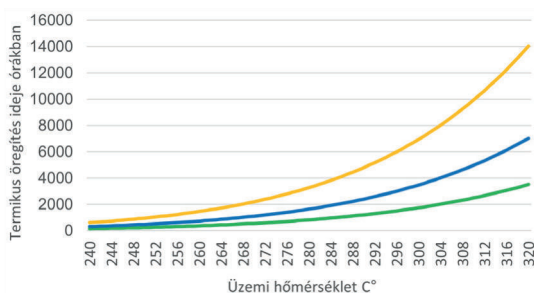
Első lépésben a mesterséges termikus öregítés T_2 hőmérsékletét 420 °C-ra választottuk. Feltételeztük, az öregítendő anyagok üzemi hőmérséklete (T_1) átlagosan 270 °C. Ezekkel az értékekkel számolva a 15 évnek megfelelő termikus öregítési idő 1080 óra, a 30 évnek megfelelő termikus öregítési idő 2160 óra és a 60 megfelelő termikus öregítési idő 4320 óra. Ezeket az értékeket a továbbiak során iránymutatóként használtuk.

Mivel a projekt 4 éves, ezért behatárolt a mesterséges öregítésre rendelkezésre álló idő. Az anyagvizsgálatok és a kiértékelési idejét is figyelembe véve a projekt résztvevői a termikus öregítésre használt maximális időt 6 hónapban határozták meg. Az üzemi hőmérséklettartományt figyelembe véve, különböző termikus öregítési hőmérsékletekhez kiszámoltuk a szükséges óraszámot. 420 °C öregítési hőmérsékletet figyelembe véve, a 294 °C üzemi hőmérsékletnek megfelelő termikus öregítés időszükséglete kb. 11380 óra, ami több, mint 15 hónap. Minél alacsonyabb termikus hőkezelési hőmérsékleten számoljuk ki az adott üzemi hőmérséklethez tartozó hőntartási időt, annál hosszabb ideig tart a termikus hőkezelés. A hőntartási időt 10 °C-onként, 370-től 500-ig különböző termikus hőkezelési hőmérsékleteken számoltuk ki. A termikus öregítéshez szükséges idő értékének trendjét a 2., 3. és 4. ábrák diagramjai mutatják.

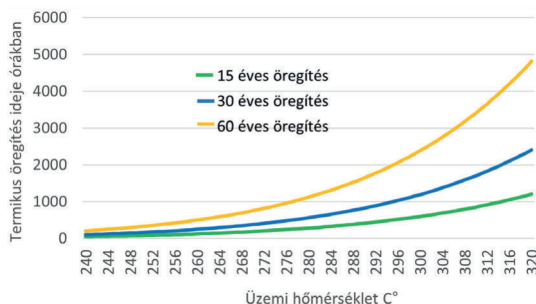
A szükséges termikus öregítéseket a projekten belül különböző résztvevő intézetek fogják elvégezni, tehát az eredmények összehasonlíthatósága miatt egy termikus öregítési hőfokot kell választani, ami az összes anyag öregítésére alkalmazható. Az öregítéshez szükséges időt az éves leállás nélküli valós üzemórákkal vettük figyelembe. A 450 °C az alsó küszöb hőmérséklet a megfelelő hőmérséklet a 290 °C-os üzemi hőmérsékleten már 30 évet



2. ábra: A mesterséges termikus öregítéshez szükséges idő órákban, 15, 30 és 60 éves üzemidőkre, ha az öregítési hőmérséklet 420 °C



3. ábra: A mesterséges termikus öregítéshez szükséges idő órákban, 15, 30 és 60 éves üzemidőkre, ha az öregítési hőmérséklet 450°C



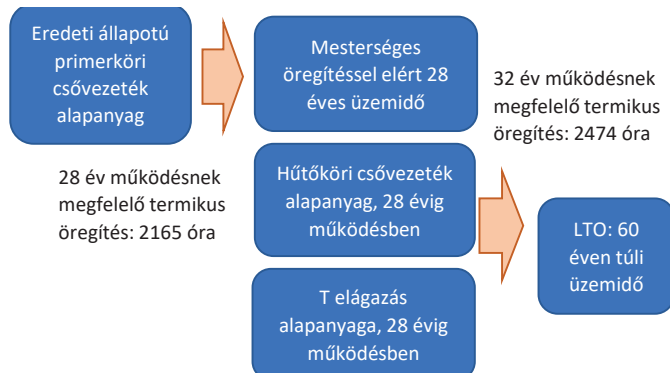
4. ábra: A mesterséges termikus öregítéshez szükséges idő órákban, 15, 30 és 60 éves üzemidőkre, ha az öregítési hőmérséklet 500°C

használt anyagok további 30 évet jelentő termikus öregítéséhez, mert így a szükséges idő 3994 óra, ami már befér a 6 hónapos időkeretbe. Az ennél magasabb termikus öregítési hőmérsékletet a 475°C-os elridegedési hőmérséklettartomány elkerülése érdekében nem választottuk. A rendelkezésre álló anyagok csoportosításával, az azonos kémiai összetételű, de eredeti anyagok tulajdonságaival, majd a további, 60 éves üzemidőnek megfelelő mesterségesen öregített anyagok tulajdonságaival is. Ehhez az azonos üzemi hőmérsékleten működő, azonos kémiai összetételű alkatrészek anyagait választottuk ki, majd meghatároztuk a szükséges termikus öregítés lépéseit.

Azokat az anyagokat, amiből a rendelkezésre álló mennyiség nem elegendő a termikusan öregített állapot mikroszerkezeti és mechanikai karakterizálásához, kizártuk.

6. A választott, LTO-nak megfelelő, anyagspecifikus termikus öregítési lépések

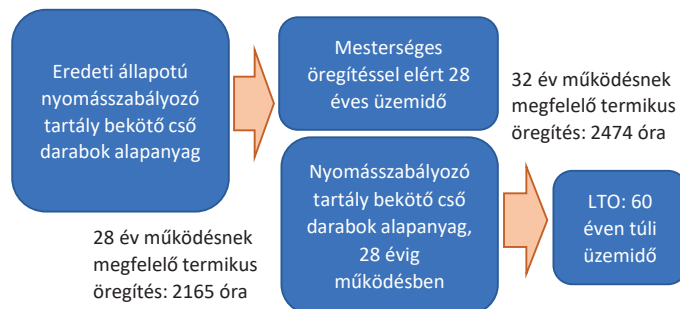
08Ch18N12 alapanyag esetén:



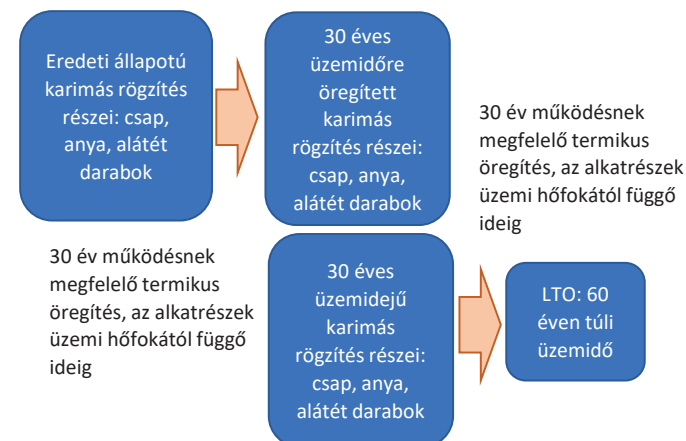
04Cr19Ni11Mo3 hegyanyag és hő érintett zóna esetén:



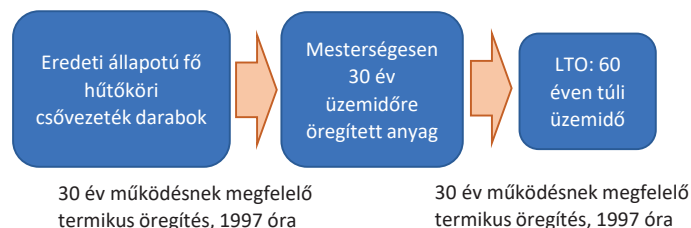
08Ch18N10 alapanyag esetén:



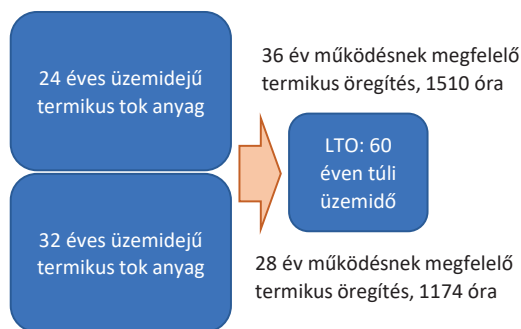
38ChN3MFA alapanyag esetén:



Plattírozott 10GN2MFA csővezeték anyag esetén:



08Ch18N10T termikus tok anyag esetén:



A termikus öregítést 450 °C-os hőmérsékleten végezve, az anyagcsoportok szerinti termikus öregítés lépéseit tartalmazó mátrixot a 4.táblázat mutatja.

4. táblázat: Az anyagcsoportok szerinti termikus öregítés mátrixa a DELISA projektben

Anyag	Üzemi hőmérséklet (°C)	Hőkezelés ideje (óra)
08Ch18N12 alapanyag, eredeti állapotú	294	2165 (->28 év)
08Ch18N10 alapanyag, eredeti állapotú	276	1085 (->28 év)
08Ch18N12 alapanyag, 28 évet működött	294	2474 (->60 év)
04Cr19Ni11Mo3 heganyag és hő érintett zóna, 08Ch18N12 alapanyagon	294	2474 (->60 év)
08Ch18N10 alapanyag, 28 évet működött	276	1240 (->60 év)
08Ch18N12 T elágazás alapanyaga és heganyag, 28 évig működésben	294	2474 (->60 év)
38ChN3MFA alapanyag, karimás rögzítés részei: - csap, anya, alátét darabok, 30 évet működött - Csap felső része - Csap középső része - Csap alsó része - Anya - Alátét	240	252 (->60 év)
	275	1117 (->60 év)
	305	3465 (->60 év)
	240	252 (->60 év)
	245	316 (->60 év)
	290	252 (->60 év)
Eredeti állapotú, plattírozott 10GN2MFA fő hűtőköri hidegági csővezeték darabok	290	3994 (->60 év)
08Ch18N10T termikus tok anyag, 24 éves működésű	278	1510 (->60 év)
08Ch18N10T termikus tok anyag, 32 éves működésű	278	1174 (->60 év)

7. A további feladatok

A termikus öregítés mátrixán alapulva, a projekt teljes mechanikai, mikroszerkezeti vizsgálati mátrixa elkészült. A szerkezeti elemek vágási tervei alapján a résztvevő intézetek megkezdték a vizsgálandó, hőkezelendő minták megmunkálását.

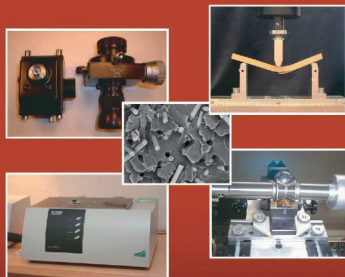
Irodalomjegyzék

- [1] Koutsky, J. and Kocik, J., "Radiation damage of structural materials", ed. Academia Prague, (1994).
- [2] ILOLA, R., NADUTOV, V., VALO, M., HÄNNINEN, H.: On irradiation embrittlement and recovery annealing mechanisms of Cr–Mo–V type pressure vessel steels. In: Journal of Nuclear Materials, vol. 302, 2002..
- [3] IAEA-TECDOC-1361 Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety Primary piping in PWRs
- [4] Y.H. Yao, J.F. Wei, Z.P. Wang: Effect of long-term thermal aging on the mechanical properties of casting duplex stainless steels. Materials Science and Engineering A 551 (2012) 116-121
- [5] S. Kawaguchi, N. Sakamoto, G. Takano, F. Matsuda, Y. Kikuchi, L. Mráz: Microstructural changes and fracture behaviour of CF8M duplex stainless steels after long-term aging



Czél György-Kollár Mariann

Anyagvizsgálati praktikum



GYÖRGY CZÉL

Materials Testing



Czél
György

Anyagvizsgálat szakkönyv

magyar és angol nyelven!

Információ és rendelés:
Prof. Dr. habil. Czél György

e-mail:

gyorgy.czel@uni-miskolc.hu

Magas hőmérsékleteken oxidált krómbevonatos Zr burkolatminták elektronsugaras vizsgálatai

Electron beam studies of Cr-coated Zr cladding samples after high temperature oxidation

Pintérné Csordás-Tóth Anna^a, Illés Levente^b, Perez-Feró Erzsébet^c, Novotny Tamás^d, Hózer Zoltán^e, J. Stuckert^f, Martin Ševeček^g

^aHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, nyugdíjas tud. főmunkatárs, pinterne.csordas.anna@ek.hun-ren.hu

^bHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, villamosmérnök, illes.levente@ek.hun-ren.hu

^cHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, tudományos munkatárs, perez-fero.erzsebet@ek.hun-ren.hu

^dHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, tudományos munkatárs, novotny.tamas@ek.hun-ren.hu

^eHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, laboratóriumvezető, hozzer.zoltan@ek.hun-ren.hu

^fKarlsruhe Institute of Technology, juri.stuckert@kit.edu

^gCzech Technical University in Prague, martin.sevecek@tjfi.cut.cz

Kulcsszavak

pásztázó elektronmikroszkópia, elektronsugaras mikroanalízis, mikroszerkezet, bevonatok, fűtőelem burkolatok

Keywords

SEM, EDX, microstructure, coatings, fuel claddings

Absztrakt

A krómmal bevont Zr-alapú burkolatok fejlesztése fontos lépés a könnyűvízes atomreaktorok fűtőelem burkolatai oxidációs ellenállásának növelésében. Elektronsugaras vizsgálati módszerekkel tanulmányoztuk négyféle, kísérleti Cr réteggel bevont burkolat – E110, Zircaloy-4, ZIRLO és optimalizált ZIRLO – mikroszerkezetét vízgőz atmoszférában 1000, illetve 1200 °C hőmérsékleten történő oxidáció után. Vizsgáltuk a Cr és a képződött Cr-oxid(ok) vastagságát és összetételét. A leghomogénebb, 12-16 µm vastagságú Cr bevonatot az E110 burkolatmintán találtuk 2,1-5 µm-es Cr-oxiddal. A Zircaloy-4 és a ZIRLO mintáknál a Cr-réteg alatt is képződött Zr-oxid 1200 °C-on.

Abstract

Development of Cr coated Zr-based claddings is an important task to increase the oxidation resistance of the fuel claddings in light water reactors. Electron beam methods were applied to investigate the microstructure of 4 types of experimental Cr-coated claddings – E110, Zircaloy-4, ZIRLO and optimised ZIRLO after steam oxidation at 1000 and 1200 °C, resp. Thickness and composition of the Cr and Cr-oxide layers were studied. The most homogeneous, 12-16 µm thick Cr coating was found for E110 cladding with 2.1-5 µm Cr-oxide. At Zircaloy-4 and ZIRLO claddings Zr-oxide was formed even below the Cr layer at 1200 °C.

1. Bevezetés

A fukushimai atomreaktor balesetnél bebizonyosodott, hogy egy könnyűvízes reaktorban (LWR) történő súlyos balesetnél a hidrogén által okozott robbanás jelent komoly biztonsági kockázatot. A hidrogén a Zr-alapú ötvözetekből készült alkatrészek – mint amilyen a burkolat, a vezetőcső és a távtartórács – oxidációja során képződik. A Zr-alapú ötvözetek magas hőmérsékletű oxidációs sebességének csökkentése az egyik legfontosabb cél a balesetálló fűtőelemek (ATF) fejlesztésében [1-3]. Sokféle ATF koncepciót tekintettek át és fejlesztettek ki, hogy megnöveljék az oxidációval szembeni ellenállást és javítsák a burkolatok mechanikai tulajdonságait LOCA (hűtővízvesztéses baleset) körülmények között, és az így kapott eredményeket összehasonlították a hagyományos Zr-alapú ötvözetekével.

Az egyik ígéretes technológia a Zr burkolat krómmal való bevonása [4-6]. Ez a technológia előnyös a burkolatanyagok oxidációs viselkedése és mechanikai tulajdonságai szempontjából. Mindazonáltal a gyártási paramétereket és a krómréteg vastagságát optimalizálni kell.

Vizsgálataink célja négyféle típusú, bevonat nélküli és kísérleti krómbevonattal ellátott burkolatminta mikroszerkezetének vizsgálata 1000 illetve 1200 °C-os, vízgőz atmoszférában történő oxidáció után. Ebben a cikkben elsősorban a bevonatos minták eredményeit mutatjuk be, és összehasonlítjuk a különböző típusú krómbevonattal ellátott burkolatanyagok oxidáció utáni mikroszerkezetét.

2. Kísérleti rész

Közleményünkben olyan eredményeket mutatunk be, amelyeket főként elektronsugaras módszerekkel, pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) és energiadiszperzív

röntgensugaras mikroanalizátor (EDX) alkalmazásával kaptunk. Ez a két mérési módszer régóta használatos a tudomány és az ipar területén, és az Anyagvizsgálók Lapja 2021/III. lapszámában Herbáth Beáta és Kovács Kristóf cikkében [7] részletes ismertetés jelent meg róluk.

A vizsgálatokat részben a burkolatminták palástján, részben a minták keresztmetszeti csiszolatain végeztük. Ez utóbbiakat a szokásos minta előkészítési eljárásokkal (epoxi műgyantába ágyazás, csiszolás, polírozás, vezető szénréteggel való párologtatás a minták elektromos töltődésének csökkentésére) készítettük el.

2.1 Alkalmazott berendezések és vizsgált minták

A morfológiai vizsgálatokhoz egy ThermoScientific Scios 2 típusú pásztázó elektronmikroszkópot használtunk. Másodlagos és visszaszórt elektronképeket (SEI és BEI) egyaránt készítettünk a burkolatminták palástjáról, amelyhez 5 kV gyorsító feszültséget alkalmaztunk. A keresztmetszeti csiszolatmintákon a rétegek vastagságát a visszaszórt elektronképeken tanulmányozhattuk a legjobban.

A vizsgált minták elemi összetételét és a legfontosabb elemek eloszlását egy Oxford X-MAX 20 típusú energiadiszperzív röntgensugaras mikroanalizátorral vizsgáltuk. Ez az analizátor olyan szilícium detektorral rendelkezik, amely nagy mintaáramokkal is használható. Így rövid mérési idő (néhányszor 10 sec) alatt lehet megfelelő mikroanalízis vizsgálatokat végezni. Ezekhez a mérésekhez általában 30 kV gyorsító feszültséget alkalmaztunk. Az EDX spektrumokat különböző méretű mintaterületekről készítettük.

A krómmal bevont ZIRLO burkolatminták esetén gallium fókuszált ionsugarat (FIB) is alkalmaztunk, hogy mélységi

információkat nyerjünk a mintákról. A FIB használatánál először általában egy vékony platina réteget vittünk fel a mintára a mintafelület megvédésére, majd egy kiválasztott területen elvégeztük a minta bemetszését. A bemetszés mélysége néhány μm -tól 10-20 μm -ig terjedt. Ezekhez a vizsgálatokhoz a mintákat 52 fokra döntöttük. A SEM felvételeken látható rétegvastagságokat erre a döntési szög-re kellett korrigálni.

A FIB segítségével fel tudtuk tární a különböző rétegeket, nevezetesen a Cr-oxid, Cr, vegyes Cr-Zr tartalmú, valamint esetenként a Zr-oxid rétegeket.

Az általunk vizsgált minták külföldről, a Karlsruhe Műszaki Intézetből és a Cseh Műszaki Egyetemről származtak. Az E110 jelű ötvözet orosz szivacsos alapú termék, amely 1 tömegszázalék Nb ötvözt tartalmaz. A Zircaloy-4 (Zry-4) hagyományos burkolatanyag, amelyet gyakran használnak a nyugati atomreaktorokban. Körülbelül 1,4 tömegszázalék Sn ötvözt tartalmaz. A ZIRLO és az optimalizált ZIRLO újonnan fejlesztett burkolatanyagok, amelyeket nióbiummal és ónnal egyaránt ötvöznek.

A vizsgálandó minták oxidációját a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpontban végeztük 12 térfogatszázalék argon vivőgázt tartalmazó vízgőzben, egy csökemencében 1000 és 1200 °C hőmérsékleteken 1 illetve 1/2 óráig.

Az 1. táblázatban összesítettük a vizsgált minták legfontosabb adatait. Az utolsó oszlop a minták egységnyi felületére eső tömegnövekedését ($\Delta m/A$) tartalmazza. Ez utóbbi értékekben a minták teljes felülete szerepel, azaz a bevonat nélküli belső felületek is. Mivel az oxidáció során a burkolatminták belső felületén viszonylag vastag oxidréteg (egyes mintáknál 120-130 μm) is képződhet, az egységnyi felületre eső tömegnövekedés nagy szám lehet. Ez állapítható meg elsősorban a bevonat nélküli burkolatminták 1200 °C-os oxidációja után.

1. táblázat: A vizsgált burkolatminták néhány adata

A burkolat típusa	Minta jele	Oxidációs hőmérséklet (°C)	Oxidációs idő (s)	$\Delta m/A$ (g/m ²)
Cr bevonatos E110	IAEA-08	1200	3600	18,8
Bevonat nélküli Zircaloy-4	ATFTS-01	1000	3600	111,9
Cr bevonatos Zircaloy-4	ATFTS-02	1000	3600	56,0
Cr bevonatos ZIRLO	ATFTS-03	1000	3600	46,4
Bevonat nélküli opt. ZIRLO	ATFTS-04	1000	3600	84,2
Cr bevonatos opt. ZIRLO	ATFTS-05	1000	3600	44,0
Bevonat nélküli Zircaloy-4	ATFTS-06	1200	1800	257,0
Cr bevonatos Zircaloy-4	ATFTS-07	1200	1800	189,2
Cr bevonatos ZIRLO	ATFTS-08	1200	1800	156,7
Bevonat nélküli opt. ZIRLO	ATFTS-09	1200	1800	264,1
Cr bevonatos opt. ZIRLO	ATFTS-10	1200	1800	137,1

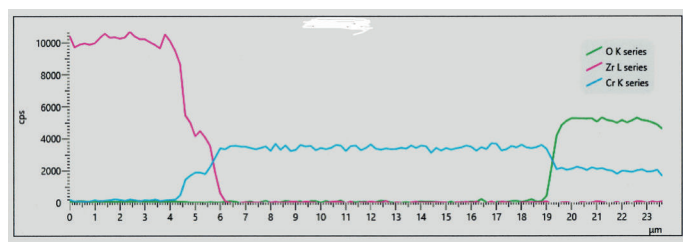
3. A mikroszerkezet vizsgálatok eredményei

3.1 Cr bevonatos E110 burkolatminta

Egyenletes, kompakt, 12-16 μm vastagságú Cr réteget és 2,1-5 μm -es Cr-oxid réteget figyeztünk meg a minta keresztmetszeti csiszolatán (1.a ábra). A Cr-oxid összetétele megközelíti a Cr_2O_3 összetételt. Egy 0,8-1 μm vastagságú határfelületi réteget lehetett azonosítani a Cr réteg és a Zr fém között. Ezt mutatja be az 1.b ábra.



1.a ábra: Az IAEA-08 jelű burkolatminta SEM felvétele

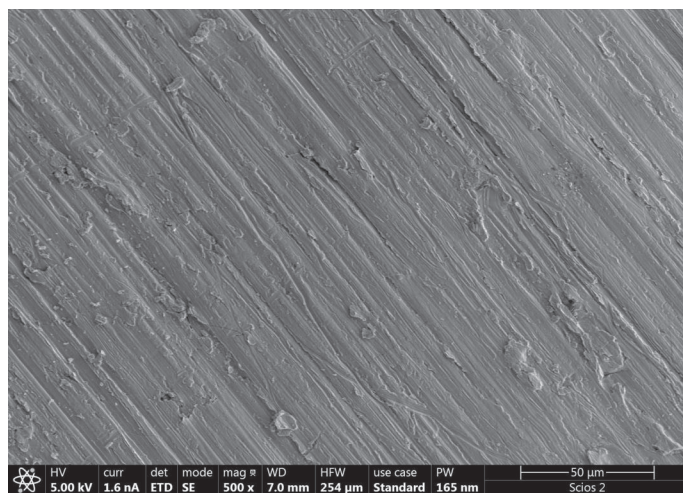


1.b ábra: Az 1.a ábrán látható mintarészleten a fő elemek röntgen vonalprofiljai

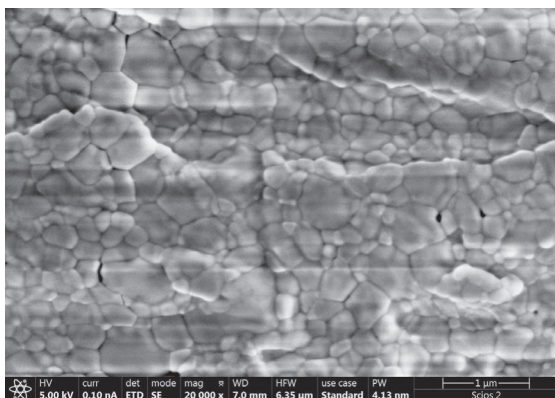
Az 1.a ábra világos kontrasztú, a Zr fémhez tartozó részletéből (a kiválasztott vonal mentén) a Cr felé haladva a világosszürke kontraszttal megjelenő határfelületi rétegben kevesebb Zr és növekvő Cr figyelhető meg. A határfelületi réteg összetétele diffúziós folyamatokra utal.

3.2 Bevonat nélküli és Cr bevonatos Zircaloy-4 burkolatminták

A2.a ábra az ATFTS-01, míg a 2.b ábra az ATFTS-06 jelű burkolatminta palástjának felületét mutatja. Alacsonyabb hőmérsékleten a megmunkálás nyomai, míg magasabb hőmérsékleten kisméretű (néhány tízed μm -es) Zr-oxid kristályok láthatók a minták palástjain.

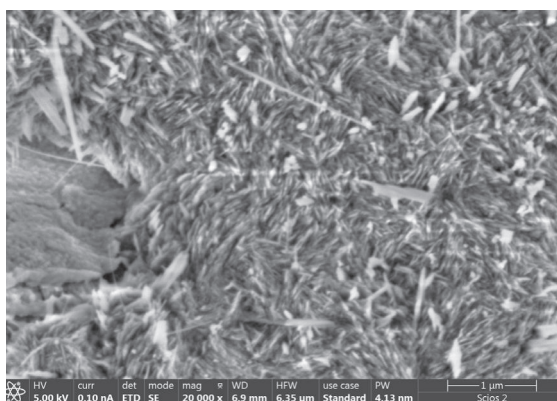


2.a ábra: Az ATFTS-01 jelű minta palástjáról készült SEM felvétel



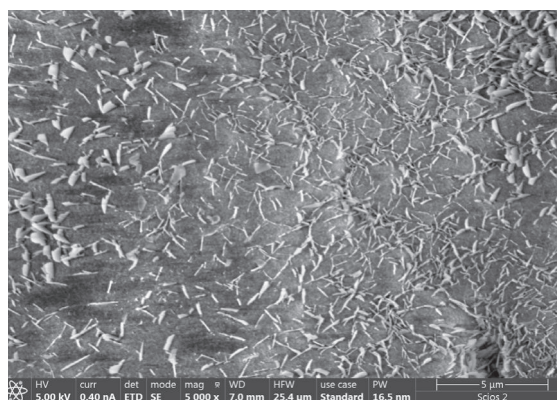
2.b ábra: Az ATFTS-06 jelű burkolatminta palástjáról készült SEM felvétel

Az ATFTS-02 jelű, Cr-bevonatú, 1000 °C-on oxidált Zircaloy-4 minta palástja kisebb nagyításban simább felületet mutatott. Nagyobb nagyításban tús-lemezes kristályok és kevés számban kicsit nagyobb szemcsék figyelhetők meg (3. ábra). A minta keresztmetszeti csiszolatán 7-10 µm vastagságú Cr réteget mutattunk ki, és nem volt értékelhető Cr-oxid réteg.

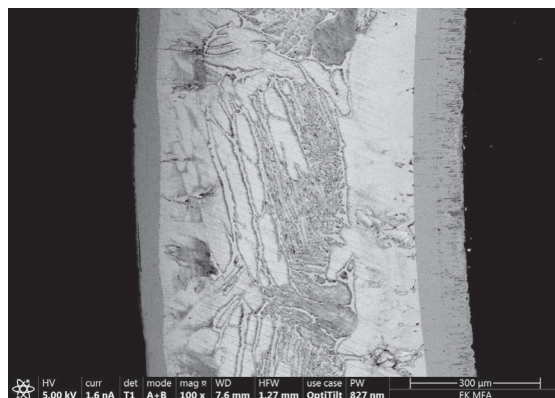


3. ábra: Az ATFTS-02 jelű burkolatminta palástjáról készült SEM felvétel

A magasabb hőmérsékleten oxidált ATFTS-07 jelű minta felületén kevesebb számú tús-lemezes Cr-oxid kristály látható (4.a ábra), mint az alacsonyabb hőmérsékleten oxidált ATFTS-02 mintánál. A tús kristályok hosszúsága 1-2 µm is lehet, szélességük néhány tized µm.



4.a ábra: Az ATFTS-07 jelű burkolatminta palástjáról készült SEM felvétel



4.b ábra: Az ATFTS-07 jelű burkolatminta keresztmetszetéről készült kissnagyítású SEM felvétel

A Cr-bevonatú Zircaloy-4 burkolat 1200 °C-on történő oxidációja során vastagabb rétegrendszer képződött a burkolatminta külső felületén. A 4.b ábra kissnagyítású SEM felvétele azt mutatja, hogy a külső szélén egy 41-55 µm vastagságú rétegrendszer van, amely az EDX vizsgálatok alapján Cr-oxid, Cr és Zr-oxid rétegeket tartalmaz (5. ábra, 2. táblázat).

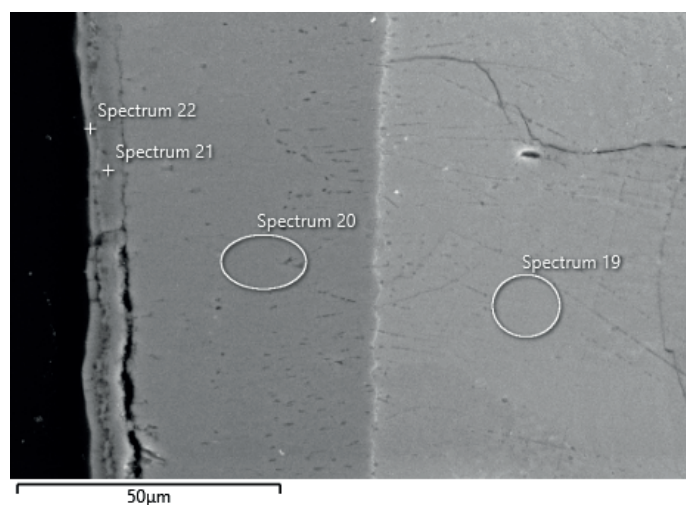
A minta belső, bevonat nélküli felületén ~120 µm vastagságú Zr-oxid réteg képződött.

A minta külső szélén lévő rétegeket nagyobb nagyításban mutatja az 5. ábra, amelyen bejelöltük azokat a területeket, amelyekről EDX analízist végeztünk.

A 2. táblázat a kiválasztott mintaterületek EDX adatait tartalmazza. CrO; Cr, O és Zr tartalmú réteg; Zr-dioxid és Zr kevés O tartalommal azonosítható.

2. táblázat: Az 5. ábrán bejelölt területek EDX adatai atomszázalékban

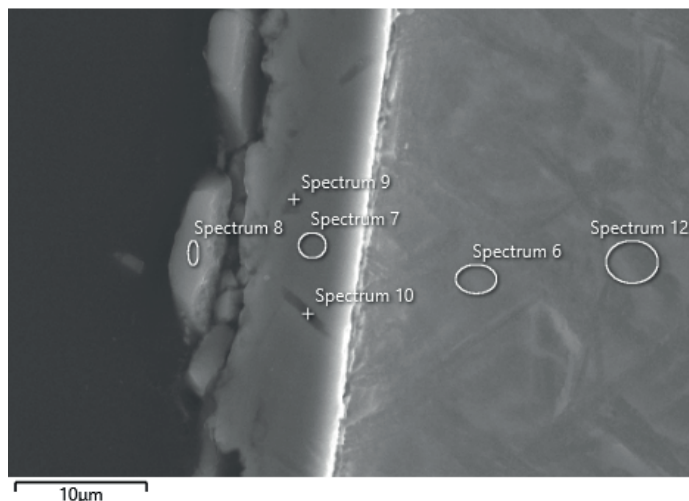
Elem	Spektrum 19	Spektrum 20	Spektrum 21	Spektrum 22
O	34,27	70,87	11,25	51,89
Cr	2,82	0,5	81,01	47,46
Fe	0,4	-	0,8	0,12
Zr	61,98	28,39	6,95	0,18
Sn	0,53	0,19	-	-



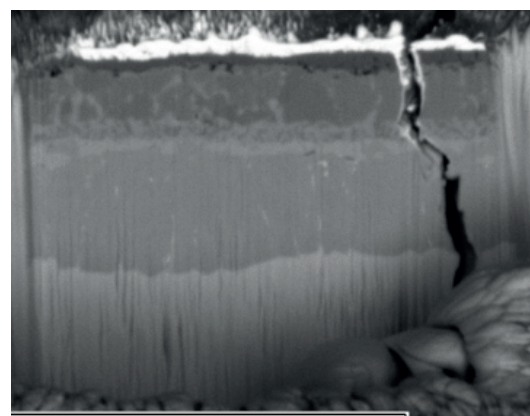
5. ábra: Az ATFTS-07 jelű burkolatminta külső szélénél lévő rétegek SEM felvétele

3.3 Cr bevonatos ZIRLO burkolatminták

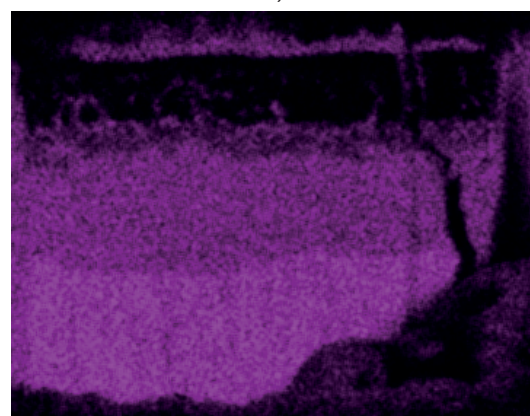
Vékony, leváló Cr-oxid és 7-10 µm vastagságú Cr réteg jellemzi az ATFTS-03 jelű burkolatmintát. A 6. ábra a minta külső szélének SEM felvétele. CrO₂ képződése mellett a Cr kismennyiségű oxigénnel együtt fordul elő a Zr fémekben is. A Cr-nak a Zr-ba való diffúziója állapítható meg a 3. táblázat EDX adataiból.



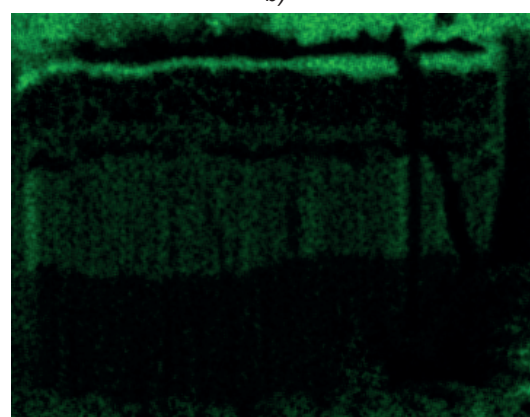
6. ábra: Az ATFTS-03 jelű minta SEM felvétele az EDX elemzések területeivel



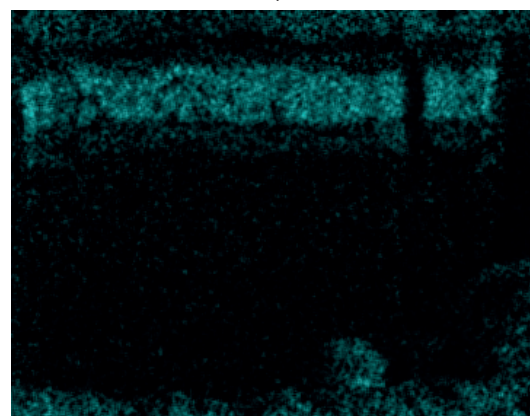
a)



b)



c)



d)

7. ábra: Az ATFTS-08 jelű burkolatminta FIB metszetének
a) SEM felvétele, b) a Zr Lα,
c) az O Kα és d) a Cr Lα röntgenterképek

3. táblázat: A 6. ábrán jelölt területek EDX adatai atomszázalékban

Elem	Spektrum 6	Spektrum 7	Spektrum 8	Spektrum 9	Spektrum 12
O	21,9	3,84	71	-	-
Si	-	0,21	0,82	0,93	-
Cr	4,54	95,38	28	98,83	3,59
Zr	67,08	0,39	0,04	0,24	96
Nb	1,25	-	-	-	-
Sn	0,27	-	-	-	-

A Cr-bevonatú ZIRLO minta 1200 °C-on történő oxidációja során kisméretű, Zr-oxid tartalmú szemcséket figyelünk meg a 4,5-5 µm vastagságú Cr rétegben.

Az ATFTS-08 jelű minta FIB metszetének SEM felvételén és a hozzá tartozó Zr, O és Cr röntgenterképeken (7. ábra) jól megfigyelhetők a különböző rétegek. A legkülső réteg egy 0,4-1,3 µm vastagságú Cr-oxid. Ezt követi a 4,5-5 µm vastagságú Cr réteg Zr-oxid részecskéikkel. A határfelületi réteg 0,7-0,9 µm vastagságú. Alatta 6,6-8 µm vastagságú Zr-oxid réteg helyezkedik el, amely alatt van a Zr. A Cr-nak a Zr-ba történő diffúziója mellett a Zr is diffundál a Cr-ba. A felvétel jobb oldalán nagyméretű repedés látható, amely az összes rétegen áthalad. A FIB metszés előtt egy vékony Pt réteget vittünk fel a minta felületére. A nagyon fényes kontrasztú felső réteg Pt, amelynek Mα vonala átlapolja a Zr La vonalát. Ezért a Zr röntgen térképen lévő felső réteg Pt és nem Zr. A környezetből természetesen származhat Zr.

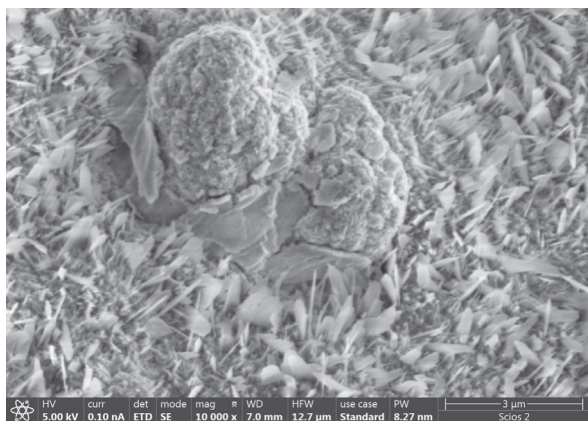
A Zr röntgenterkép jobb alsó részén hiányzik a Zr. Ez a jelenség a minta döntése miatt van, mert a detektor nem lát bele a metszet alsó részébe.

3.4 Cr bevonatos optimalizált ZIRLO burkolatminták

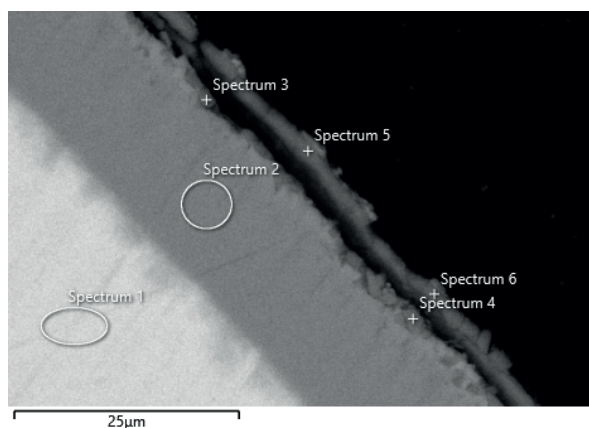
Az ATFTS-05 jelű minta palástjának SEM vizsgálata tű alakú krisztallitokat, nagyobb méretű lemezeket és gömb alakú aggregátumokat mutat (8. ábra).

A tű alakú krisztallitok Cr-ban dúsultak, míg a lemezek és a gömb alakú aggregátumok főként Zr-oxidok. A minta keresztmetszeti csiszolatának külső szélét mutatja a 9. ábra. A Cr-réteg vastagsága $\approx 15 \mu\text{m}$, míg a Cr-oxid tartalmú szemcséké $3-5 \mu\text{m}$. Néhány terület EDX adatait a 4. táblázat tartalmazza. A 9. ábra a gyűrűminta külső széléhez közeli részletet mutat.

A Cr-rétegben kevés Zr is van (Spektrum 2). Kétféle összetételű Cr-oxidot azonosítottunk: CrO-t (Spektrum 4 - Spektrum 6) és Cr₂O₃-t (Spektrum 3). Az α -Zr O-t is tartalmaz és helyenként kimutatható az ötvözőként szolgáló Nb és Sn (Spektrum 1).



8. ábra: Az ATFTS-05 jelű burkolatminta palástjáról készült SEM felvétel



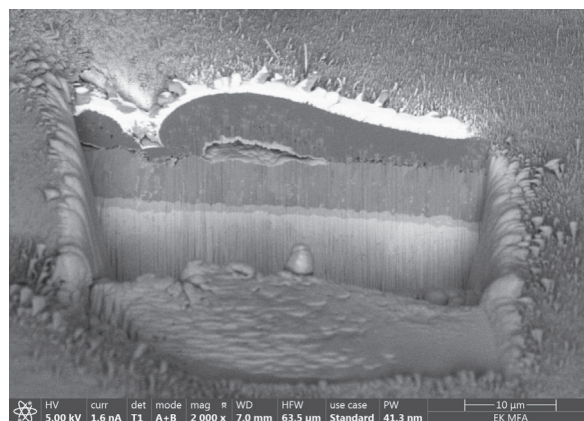
9. ábra: Az ATFTS-05 jelű burkolatminta keresztmetszeti csiszolatának SEM felvétele

4. táblázat: A 9. ábrán jelölt területek EDX adatai atomszázalékban

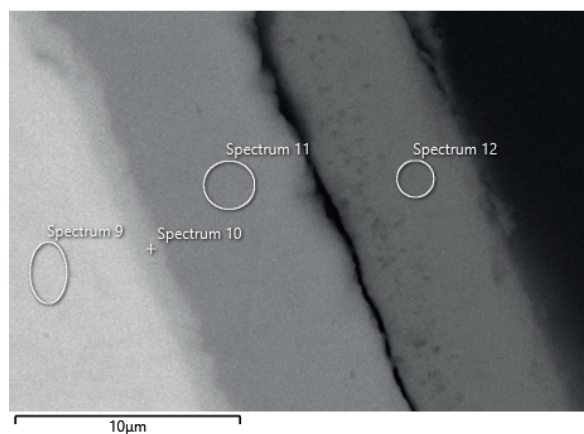
Elem	Spektrum 1	Spektrum 2	Spektrum 3	Spektrum 4	Spektrum 5	Spektrum 6
O	17,14	-	58,15	46,4	48,25	46,98
Cr	2,53	97,5	39,42	46,73	47,42	47,54
Fe	0,32	0,18	-	-	-	-
Zr	77,9	1,95	1,21	5,27	1,06	1,34
Nb	1,7	-	-	-	-	-
Sn	0,42	-	-	-	-	-

A Cr-bevonatú optimalizált ZIRLO burkolatminta 1200 °C-on történő oxidációja során esetenként kétféle Cr-oxid réteg képződött. A külső nagyobb, a belső kisebb O tartalommal rendelkezett. A Cr-oxid és a Cr rétegekben kisméretű Zr-oxid részecskék találhatók. Ez látható a 10. ábrán, amely a minta FIB metszetének SEM felvétele.

A minta keresztmetszeti csiszolatának SEM és EDX vizsgálata azt mutatta, hogy a képződött Cr-oxid és a Cr réteg közel azonos vastagságú: a Cr-oxid réteg $6,5-7 \mu\text{m}$ -es, a Cr réteg $7,5-8 \mu\text{m}$ -es. Ez figyelhető meg a 11. ábrán, amelyen egy $\approx 1 \mu\text{m}$ vastagságú határfelületi réteg is látható a Cr és a Zr között. Úgy tűnik, hogy a Cr-bevonatú optimalizált ZIRLO burkolaton homogénebb Cr-oxid és Cr rétegek voltak, mint a Cr bevonatú Zircaloy-4 és ZIRLO burkolatokon.



10. ábra: Az ATFTS-10 jelű burkolatminta FIB metszetének SEM felvétele



11. ábra: Az ATFTS-10 jelű burkolatminta keresztmetszeti csiszolatának SEM felvétele

4. Összefoglalás

SEM és EDX vizsgálatokat végeztünk az alábbi négyféle típusú fűtőelem burkolaton: E110, Zircaloy-4D, ZIRLO és optimalizált ZIRLO. A burkolatanyagokat két külföldi intézetben látták el Cr réteggel. A burkolatminták magas hőmérsékletű oxidációját vizsgoztunk atmoszférában az intézetünkben hajtottunk végre. Vizsgálataink célja a burkolatminták morfológiai jellemzőinek és elemi összetételének tanulmányozása volt. A SEM és EDX vizsgálatokból az alábbiakat állapítottuk meg:

1. A Cr-bevonatú, 1200 °C-on oxidált E110 burkolat 12-16 µm vastagságú Cr rétege tömör és jól tapad a Zr fémhez. 2,1-5 µm vastagságú Cr₂O₃ réteg képződött a burkolat felületén az oxidáció hatására. A Cr réteg és a fém között egy vékony, vegyes Cr–Zr összetételű határfelületi réteg utal a diffúziós folyamatokra. Ilyen réteg a többi, főként 1200 °C-on oxidált burkolatmintában is képződött.
2. A Cr réteg vastagsága csak 7-10 µm volt a Cr-bevonatú Zircaloy-4 és ZIRLO burkolatmintáknál.
3. Az 1000 °C-on oxidált Zircaloy-4, ZIRLO és optimalizált ZIRLO minták Cr rétegei csak kis mértékben oxidálódtak és a Cr-oxid rétegek helyenként leváltak.
4. A 3. pontban említett minták 1200 °C-on történő oxidációja során kisméretű Zr-oxid részecskék jelentek meg a Cr vagy a Cr-oxid rétegben. Különböző összetételű – úgymint CrO, CrO₂ és Cr₂O₃ – krómoxidok képződtek. A Cr-bevonatú Zircaloy-4 és a ZIRLO bevonatokban Zr-oxid réteg is kialakult a Cr réteg alatt. Intenzív diffúziós folyamatok játszódtak le a Cr és a Zr fém között mindkét irányban. A Zr-oxid réteg vastagsága sokkal kisebb volt, mint a gyűrűminták első oldalán képződött Zr-oxid.
5. Az 1200 °C-on oxidált Cr-bevonatú optimalizált ZIRLO burkolaton homogénebb Cr–oxid és Cr rétegek voltak, mint a 4. pontban említett mintákon. Kisebb volt a felületegységre eső tömegnövekedése is, mint a 4. pont mintáié.
6. 1000 °C-on a vizsgált minták oxidációs viselkedése és mikroszerkezete általában kedvezőbb volt, mint 1200 °C-on.

keretében végeztük, amelyet a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség támogatott.

Irodalomjegyzék

- [1] Carmack, J., Goldner, F., Bragg-Sitton, S. M., Snead, L. L.: Overview of the U.S. DOE Accident Tolerant Fuel Development Program. TopFuel. 2013, p. 734.
- [2] Pint, B. A., Terrani, K. A., Brady, M. P., Cheng, T., Keiser, J. R.: High temperature oxidation of fuel cladding candidate materials in steam–hydrogen environments. Journal of Nuclear Materials. 440. 2013, pp. 420-427.
- [3] Terrani, K. A., Zinkel, S. J., Snead, L. L.: Advanced oxidation-resistance iron-based alloys for LWR fuel cladding. Journal of Nuclear Materials. 448. 2014, pp. 420-435. [http://dx.doi.org/10.1046/j.jnucmat\(2013\)06041](http://dx.doi.org/10.1046/j.jnucmat(2013)06041)
- [4] Wang, Y., Zhou, W., Wen, Q., Ruan, X., Luo, F., Bai, G., Qing, Y., Zhu, D., Zhang, Y., Liu, T., Li, R.: Behaviour of plasma sprayed Cr coatings and FeCrAl coatings on Zr fuel cladding under loss-of-coolant accident conditions. Surface & Coatings Technology. 344. 2018, pp.141-148.
- [5] Brachet, J. C., Le Saux, M., Le Flem, M., Urvoy, S., Rouesne, E., Guilbert, T., Cobac, C., Lahogue, F., Rousselot, J., Tupin, M., Billaud, P., Hossepied, C.: On-going studies at CEA on chromium coated zirconium based claddings for enhanced accident tolerant LWRS fuel. TopFuel 2015, Zurich, Switzerland, 2015, September 13-19, pp. 1-8.
- [6] Ševeček, M., Gurgen, A., Seshadri, A., Che, Y., Wagih, M., Phillips, B., Champagne, V., Shirvan, K.: Development of Cr cold spray – coated fuel cladding with enhanced accident tolerance. 2018 Nuclear Engineering and Technology. 50. 2018, pp. 229-236.
- [7] Herbáth, B., Kovács, K.: Anyagvizsgálói lehetőségek a cink-foszfátos felület-előkezelő folyamatok technológiai ellenőrzésére. Anyagvizsgálók Lapja. 2021/III. lapszám. RAKK-AGY 2021 Konferenciai cikkek válogatott gyűjteménye. 2021, 75-81. oldal

Köszönetnyilvánítás

Ezt a munkát a Fejlett Technológia és Baleset Álló Fűtőelem (ATF) tesztelése és szimulációja projekt



ANYAGVIZSGÁLOK 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



Hűtőközegvesztéses atomerőművi üzemzavar kísérleti modellezése

Experimental simulation of a nuclear power plant loss-of-coolant accident

Farkas Róbert^a, Hózer Zoltán^b, Kis Zoltán^c, Perez-Feró Erzsébet^d, Király Márton^d, Horváth Lászlóné^d, Novotny Tamás^d, Szabó Péter^e, Bubonyi Tamás^f

^{a-e}HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont.

^atudományos segédmunkatárs ^blaboratóriumvezető, ^ctudományos főmunkatárs, ^dtudományos munkatárs, ^evegyész

^fMiskolci Egyetem, tudományos segédmunkatárs

^bhozer.zoltan@ek.hun-ren.hu

Kulcsszavak

fűtőelem,
 cirkónium,
 üzemzavar,
 integrális kísérlet

Keywords

nuclear fuel,
zirconium,
incident,
integral test

Absztrakt

A CODEX-SLIM kísérlet egy hűtőközegvesztéses atomerőművi üzemzavart modellezett. Az elektromosan fűtött kísérleti köteg a Paksi Atomerőműben használt burkolattal ellátott fűtőelemekből állt. A kísérlet során 900 °C fölélti hőmérsékletet értek el, a szimulált folyamatot vizes elárasztás zárta le. A köteg állapotát roncsolásmentes és roncsolásos eljárásokkal mérték fel. A mérési eredmények szerint nem várható a fűtőelemek épségének elvesztése hűtőközegvesztéses tervezési üzemzavar során.

Abstract

Loss-of-coolant accident in a nuclear power plant was simulated in the CODEX-SLIM experiment. The electrically heated fuel rod bundle contained cladding material used at the Paks NPP. The maximum temperature reached 900 °C and the test was terminated by water quench. The state of the bundle was examined using non-destructive and destructive techniques. According to the experimental data, the fuel rods would keep their integrity during a design basis loss-of-coolant accident.

1. Bevezetés

A CODEX (COre Degradation EXperiment) kísérleti berendezésen 1995-től hajtanak végre méréseket elektromosan fűtött kötegekkel. A kísérleti programban számos üzemzavari és súlyos baleseti forgatókönyvnek megfelelő eseménysort modelleztek.

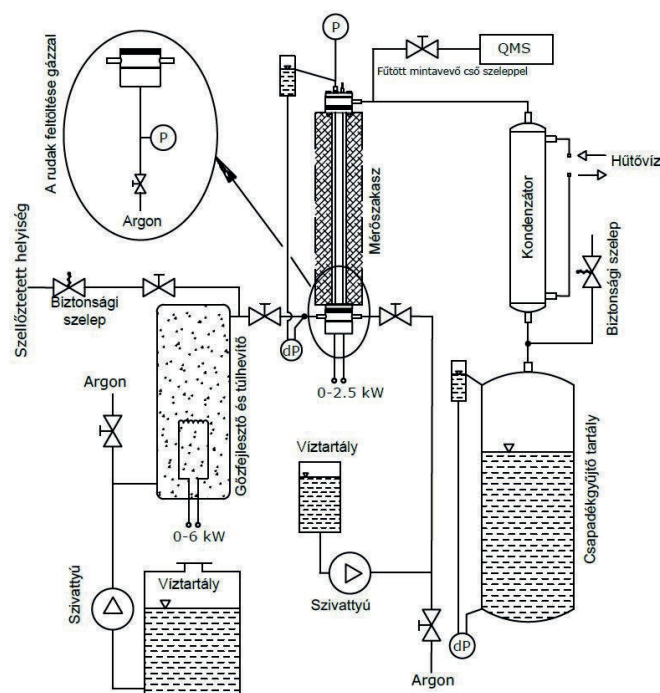
Az egyik legutóbbi mérésben olyan fűtőelemburkolatot használtak, ami a Paksi Atomerőműben nemrég került bevezetésre. Az ún. víz-urán arányra optimalizált üzemanyag-kazettában a fűtőelemek burkolatának vastagsága 100 µm-rel kisebb, mint az eddig használt burkolaté volt és a cirkónium ötvözet gyártástechnológiája is változott. A korábban végrehajtott oxidációs mérések szerint az új gyártástechnológiával gyártott ötvözet felületén magas hőmérsékleten nem jön létre olyan leváló oxidréteg, mint a hagyományos burkolaton és ezért a fém elridegedéséhez sokkal hosszabb idő szükséges. Az izotermikus körülmények között végzett felfűvódásos kísérletek eredményei azt mutatták, hogy a vékonyabb falvastagság miatt nem csökkent a burkolat felhasadási nyomása. A CODEX-SLIM integrális kísérlet alapvető célja az volt, hogy ezeket – a reaktor biztonsága szempontjából pozitív – eredményeket olyan transziens körülmények között ellenőrizze, amelyek reprezentatívnak tekinthetők az atomerőműben feltételezett hűtőközegevesztéses üzemzavarra.

2. A CODEX berendezés

A CODEX-SLIM kísérlethez használt berendezés fő elemei azonosak a korábbi CODEX mérésekben [1, 2] használt eszközökkel. Az új köteg összeállítása mellett azonban számos változtatásra volt szükség a berendezésen.

A berendezés központi eleme a kísérleti köteg, amelyet olyan terheléseknek kell alávetni a vizsgálatok során, ami a vizsgált tranziens állapotokban várható. A mérési körülmények létrehozásához a kísérleti köteghez több részegység is csatlakozik (1. ábra):

- a mérőszakasz, amely magában foglalja a kísérleti



1. ábra: A CODEX berendezés fő komponensei

köteget, a fűtéshez és a nyomásszabályozáshoz szükséges csatlakozásokat, valamint a hőszigetelést, ami lehetővé teszi a kívánt magas hőmérsékletek elérését. A mérőszakaszon külső fűtést is alkalmaztak ebben a mérésben.

- a gőzfejlesztő a mérőszakasz aljához csatlakozik és biztosítja a megfelelő állapotú és összetételű közegek beáramoltatását. A gőzfejlesztőben levő túlhevítő nemcsak a megtermelt gőz, de a rajta átvezetett argon gáz hevítését is elvégzi.
- a kondenzátor a mérőszakasz kilépő részéhez csatlakozik és fő feladata a kényszerítetten áramló és a kísérlet során a vizsgált kötegben keletkező kémiaiilag módosult anyagáramok hűtése, illetve kondenzáltatása.



2. ábra: A CODEX-SLIM köteg keresztmetszete

A kísérleti köteg hét darab, elektromosan fűtött fűtőelem szimulátorból áll (2. ábra). A modell fűtőelem rudakhoz a legújabb fejlesztésű, a Paksi Atomerőműben bevezetésre került vékonyfalú E110 (Zr1%Nb) ötvözetből készült, szivacsos alapanyagból előállított pálcákat és távtartórácsot használtak.

A nyomásállóság biztosítására mind a hét cső felső végét hegesztett cirkónium dugó zárja le. A csövek alsó részében grafit tömítéseket alkalmaztak. A fűtőelem rudakat Al_2O_3 tablettákkal töltötték fel, amelyek hőtechnikai paraméterei hasonlóak az UO_2 tablettáéhoz.

A fűtőelem rudak fűtését volfrám fűtőszálak biztosítják, az egyes rudak fűtése párhuzamosan kapcsolt, a kísérleti köteget egyenáramú tápegységek fűtik. A hét rúdból álló kísérleti köteget E125 (Zr2,5%Nb) anyagú köpeny (kazettafal) és több hőszigetelő réteg veszi körül.

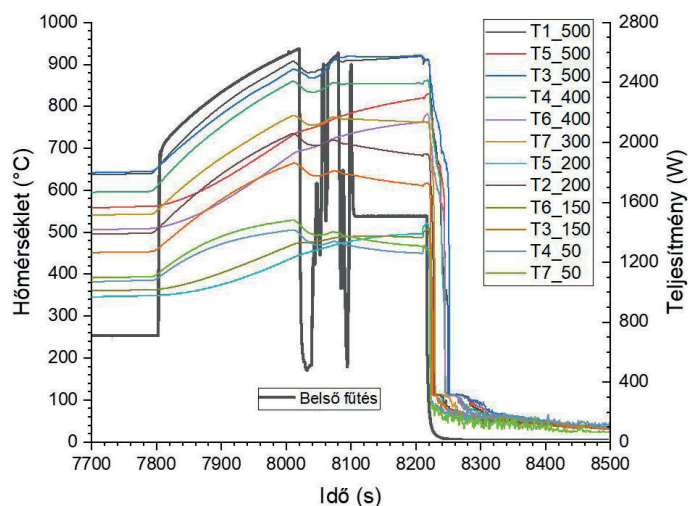
A mérőszakasz külső fűtése csökkenti a hővesztéseket. Az adatgyűjtő és vezérlő rendszer gyűjti és tárolja a mérési eredményeket a kísérletek során, valamint részt vesz a kísérleti paraméterek szabályozásában is.

3. A CODEX-SLIM kísérlet végrehajtása

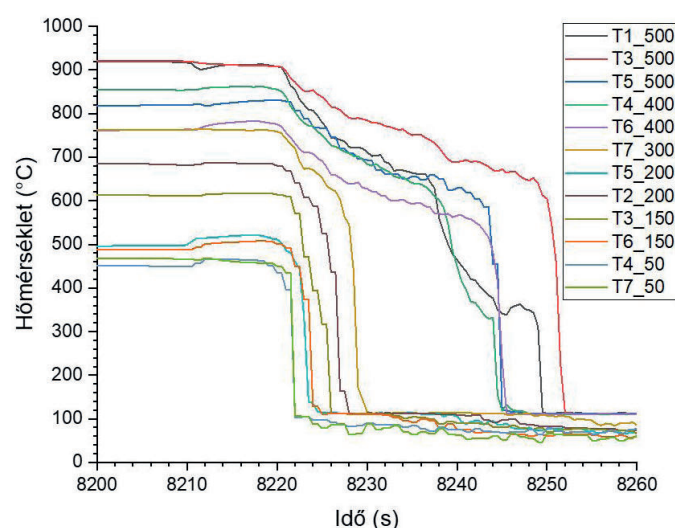
A CODEX-SLIM kísérlet célja az volt, hogy értékeljék a vékonyfalú burkolat hatását a fűtőelemek viselkedésére tervezési üzemzavar körülmények között. A jelenleg használatos, vastagfalú burkolatokkal korábban két olyan kísérletre is sor került, amelyekkel az erőmű primerköri csőtöréssel induló hűtőközegvesztéses üzemzavarát szimulálták – ez közvetlen összehasonlításokra is lehetőséget adott.

A kísérleti berendezésben nem valósítható meg pontosan az erőművi elemzésekben szereplő hőmérséklet- és nyomástörténet, ezért egyszerűsített forgatókönyvet kellett alkalmazni. Mind a hőmérséklet, mind a nyomás változását úgy adták meg, hogy azok lefedjék az elemzésekben szereplő tartományokat.

A köteg előzetes, technológiai felfűtését követő gyors felfűtési szakaszban 2000-2600 W elektromos teljesítményt adtak rá a kötegre. Ezt a teljesítményt addig alkalmazták, amíg a köteg legmagasabb hőmérsékletű pontja el nem érte a tervezett 900°C -ot. Ekkor kézi vezérléssel úgy változtatták a teljesítményt, hogy a köteg legmagasabb hőmérsékletű pontja 3 percig megtartsa ezt az értéket. A kötegen mért legmagasabb hőmérséklet $921,8^\circ\text{C}$ volt (3. ábra). A mérés utolsó szakaszában vízzel árasztották el a köteget (4. ábra), és ezzel egy időben a köteg fűtését és a külső elektromos fűtést lekapcsolták. Az elárasztás során a keletkező hidrogén aránya jelentősen megnőtt a kilépő gázban, ami jelezte a cirkónium-vízgőz reakciót.



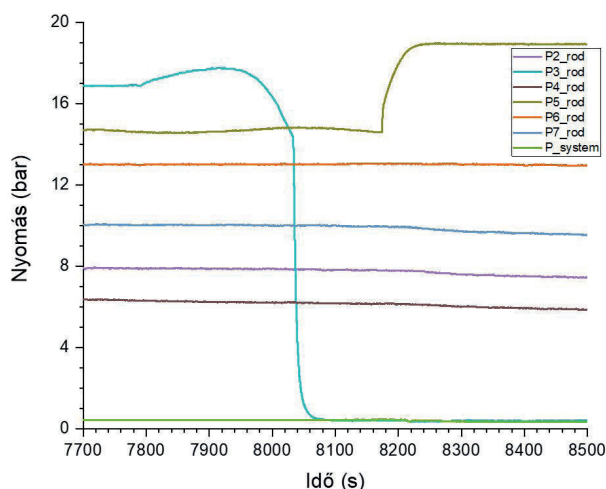
3. ábra: Hőmérsékletek és teljesítmény a tranziens során



4. ábra: A hőmérsékletek alakulása az elárasztás során

A kísérlet során a fűtőelemek belső nyomása a felmelegedés hatására (900°C körüli hőmérsékleten) észrevehetően megnőtt. A legmagasabb nyomást, 17,74 bar-t, a 3-as számú rúd érte el. Ilyen magas nyomás a fűtőelemben a biztonsági elemzések szerint nem várható egy LOCA (hűtőközeg elvesztésével járó) üzemzavar során. A kísérlet 8033. másodpercében a 3-as cső belső nyomása gyorsan lecsökkent a rendszernyomás értékére, ami arra utalt, hogy a burkolat felhasadt (5. ábra). A többi rúdon ennél alacsonyabb nyomások alakultak ki. Az 5-ös rúd nyomását manuálisan 8174 másodperckor megnövelték, de nyomáscsökkenést nem tapasztaltak, ugyanis annak maximális hőmérséklete $830,9^\circ\text{C}$ volt. A 3-as számú rudat leszámítva valamennyi rúd megőrizte épségét és nem hasadt fel a kísérlet során.

A keletkezett hidrogén mennyiségét a tömegspektrométer mérése alapján határozták meg. A teljes tranziens során keletkezett hidrogén tömege az elárasztás pillanatáig 0,674 g, a teljes elárasztás végéig pedig, még további 0,014 g hidrogén fejlődése volt detektálható. Tehát a tömegspektrométer mérése alapján összesen 0,688 g hidrogén gáz keletkezését regisztrálták a mérés során, ami 8448 cm^3 -nek felel meg (standard körülmények között).



5. ábra: A hőmérsékletek alakulása az elárasztás során

4. A köteg endoszkópos vizsgálata

A köteg lehűlését követően kiserelték azt a kísérleti hurokból, majd a köpeny eltávolítását követően a köteget vizuális megfigyelésnek vették alá. A felső fej leszere-lése után endoszkóppal képeket készítettek a köteg álla-potáról. A PCE Instruments által gyártott PCE-VE típusú berendezéshez csatlakozó 3,9 mm átmérőjű optikai szálát be lehetett vezetni felülről (6. ábra) a köteg belsejébe a rudak között, ahol azt a felső távtartó rács lehetővé tette.

Az összes rúd, a kazettafal és a távtartó rácsok is hiány-talanul, törésmentesen túléltek a kísérletet. Jól látható, hogy 500-550 mm magasságban felfúvódott és felhasadt a 3-as rúd (7. ábra). Továbbá jellemző, hogy a nagyobb magasságokban, ahol magasabb volt a hőmérséklet, fehér színű oxid szigetek alakultak ki.



6. ábra: Endoszkópos felvétel a köteg felső részéről

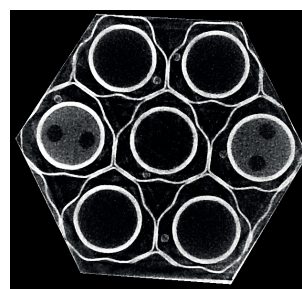


7. ábra: Endoszkópos felvétel a köteg belsejében, a felhasadt burkolatról

5. Számítógépes tomográfiai vizsgálatok

A számítógépes tomográfias (CT) felvételeket egy YXLON FF35 CT típusú készülékkel végezték a Miskolci Egyetemen. A 220 kV gyorsítófeszültséggel működő rönt-gencső elé önből készült szűrőt helyezve az alacsony energiájú, a fémeken jobban szóródó röntgenfotonokat kiszűrték, majd a detektor és a fókusz közé helyezve az átvilágítandó mintát közel hétszeres nagyítást értek el a detektoron, ami mintegy 10-20 µm-es felbontásnak felelt meg. A mintákat forgatva több ezer vetület készült, melyek alapján egy program összerakta a mintára jellemző 3D elnyelési térképet.

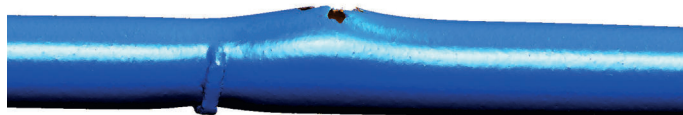
A CODEX-SLIM kötegben a csövek viszonylag kis deformációt szenvedtek (8. ábra), nem érték össze, így a CT mérésből származó adatsor viszonylag egyszerűen elválasztható volt. Az egyedi pálcákra szétbontott adat-sort a SolidWorks programmal pontfelhőként megnyitva az egyes pálcákra (a pontok számának redukálása után) hálózást (9. ábra), majd felületet (10. ábra) illesztettek. Ezután a köteg pontos geometriáját, a pálcák egymáshoz képesti elhelyezkedését könnyen rekonstruálni lehetett.



8. ábra: A CODEX-SLIM köteg egyik keresztmetszeti CT képe, melyen látható a távtartórács és a termoelemek, valamint két pálcában a fűtéshez használt volfrámszál és a kerámia tabletta



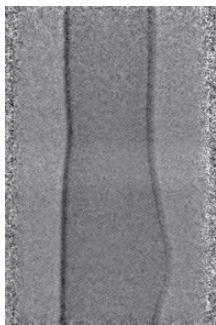
9. ábra: A CODEX-SLIM köteg felhasadt, 3. pálcájának adatpontjaira illesztett, simítás nélküli hálózás. A felhasadástól balra a termoelem hegesztett megfogása látható



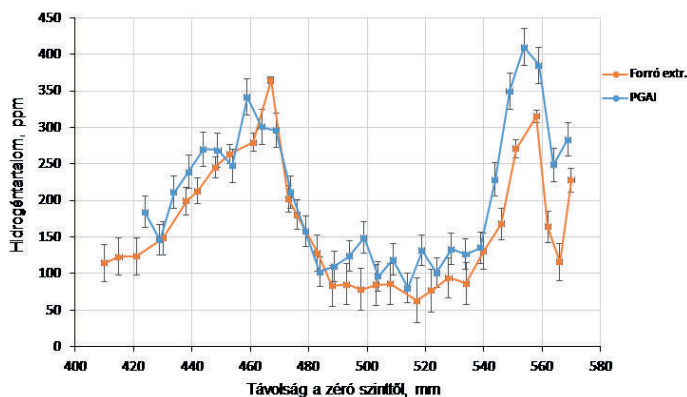
10. ábra: A CODEX-SLIM köteg felhasadt, 3. pálcájának adatpontjaira illesztett simított felület

6. Hidrogéntartalom mérés PGAI-NR módszerrel

A prompt-gamma aktivációs leképezés (PGAI) roncsolásmentes nukleáris analitikai módszer, amellyel a besugárzott mintatérfogat átlagos elemi- és izotóppösze-tétele állapítható meg. A mérés során a mintát lassú neut-ronokkal sugározták be és a keletkező gammasugárzás elemzése alapján következtettek annak összetételére.



11. ábra: A CODEX-SLIM köteg felfűvódott rúdjának neutronradiográfiai felvétele



12. ábra: A felhasadt pálcán mért axiális hidrogéneloszlása PGAI-NR és forró extrakciós módszerrel

Az elemanalízist megelőzően neutronradiográfiai (NR) technikát [3] alkalmazták a minta térbeli megjelenítéséhez (11. ábra) [4-6]. A méréseket az EK által üzemeltett NIPS-NORMA mérőhelyen végezték, ami a Budapesti Kutatóreaktor hidegneutron-forrásához kapcsolódó neutronvezető végén található.

A PGAI előnye, hogy a könnyű elemek közül a jelen vizsgálatban fontos hidrogén jó érzékenységgel mérhető az adott mátrixban, mivel a H és a Zr neutronbefogási hatáskeresztmetszetének aránya kedvező. A mérési eredmények jól mutatták, hogy a felhasadt burkolaton megjelent az irodalomból jól ismert gallérszerű profil, azaz a felhasadás (kb. 510 mm-nél) alatti és feletti H-dúsulás, amely 3-4-szeres mennyiségű hidrogén jelenlétére utal a felhasadásnál mért értékekhez képest (12. ábra). A fel nem hasadt burkolaton a H/Zr koncentráció alacsonyabb, a hidrogén eloszlása pedig egyenletes volt.

7. Hidrogéntartalom mérés forró extrakcióval

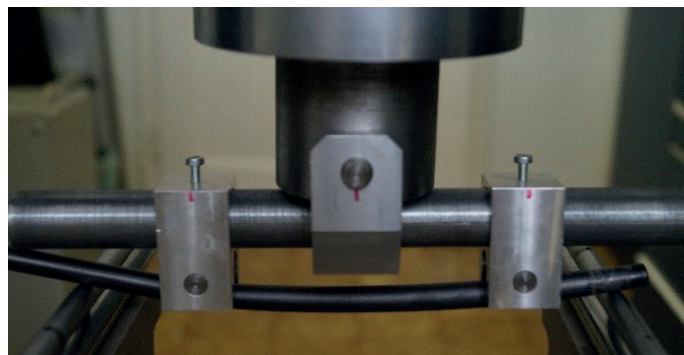
A burkolatokban elnyelt hidrogén mennyiségi meghatározását roncsolásos módszerrel is elvégezték, ELTRA® ELEMENTRAC OH-p típusú, forró extrakciós elven működő, oxigén-hidrogén elemanalizátor segítségével. A vizsgálandó burkolatmintákból származó darabkákat az elemanalizátorral összekapcsolt analitikai mérlegen 0,01 mg pontossággal mérték le. A hidrogéntartalom meghatározását a titán csoport magas olvadáspontú elemeinek vizsgálatára alkalmas applikációval végezték. A magas olvadáspont csökkentéséhez ön pasztillát használtak.

A PGAI-NR mérési eredményekkel összhangban (12. ábra), a 3. pálca hossza mentén a hidrogéntartalom dupla maximumot (a kb. 510 mm-nél bekövetkezett felhasadás alatti és feletti hidrogéndúsulást) mutatott és a maximumok megjelenési helye is közel azonos volt. Mivel a felfűvódás környékén volt a legmelegebb a pálca, így ott nem tudott jelentős mennyiségű hidrogén elnyelődni, ezért a szekunder hidridizáció inkább a pálca hidegebb részein okozott hidrogéntartalom-növekedést.

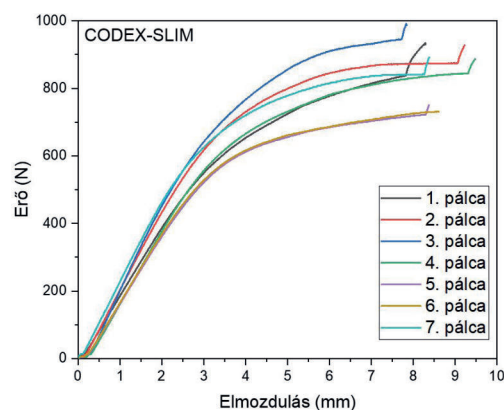
8. Négy pontos hajlító vizsgálatok

A CODEX-SLIM köteg fűtőelemeivel – a roncsolásmentes vizsgálatok után – került sor a négy pontos hajlítóvizsgálatokra. A vizsgálatok során mind a hét burkolat képlékeny alakváltozást mutatott, azaz nem ridegedett el. A terhelés hatására a csövek meggyűrűltek (13. ábra), majd amikor a terhelést megszüntették, részben kiegyenesedtek. Ez azt jelentette, hogy a képlékenységen túl jelentős rugalmasság is jellemezte a fűtőelemek állapotát a LOCA tranzienst követően.

Az erő-elmozdulás diagramok szerint a rugalmas alakváltozás kb. 600 N erőig volt megfigyelhető (14. ábra). A maximális erő 700-900 N tartományba esett. A legnagyobb erőt – az ábrán kékkel jelölt – 3. pálcánál mérték, amely felhasadt a belső nyomás hatására a kísérlet során. Ennek valószínűleg a kismértékű oxidáció miatti felkeményedés volt az oka. Egyik burkolat sem tört el a hajlítóvizsgálat során, rideg viselkedés nem volt megfigyelhető.



13. ábra: CODEX-SLIM burkolattal végzett négy pontos hajlítóvizsgálat



14. ábra: A CODEX-SLIM burkolatokkal végzett négy pontos hajlítóvizsgálatok során felvett erő-elmozdulás görbék

9. Összefoglalás

A CODEX-SLIM kísérletet elektromosan fűtött, hét rúd-ból álló, a Pakson működő VVER-440 reaktoroknak megfelelő geometriai elrendezésű köteggel hajtották végre. A vékonyfalú, szivacsos alapanyagból gyártott burkolatból készített köteg maximális hőmérséklete $921,8^{\circ}\text{C}$ -ot ért el. Az eredeti terveknek megfelelően három percig volt a burkolat hőmérséklete 900°C fölött vízgőz atmoszférában. A kísérletet hideg vizes elárasztás zárta le. A belső nyomással terhelt fűtőelemek közül egy hasadt fel $17,74$ bar nyomáson. A többi fűtőelem megőrizte épségét, azokban alacsonyabb volt a nyomás vagy a burkolat hőmérséklete. A kilépő gáz tömegspektrométeres elemzése $0,688$ g hidrogén gáz keletkezését jelezte, ami nagyon szerény oxidációt jelent.

A kísérlet után a köteggel több roncsolásmentes és roncsolásos vizsgálatra is sor került. A köteg vizuális és endoszkópos vizsgálata alapján azonosítható volt a felhasadt burkolat. A burkolatcsövek felületén nem alakult ki leváló oxidréteg. A távtartórácsok is épek maradtak. A CT vizsgálatok során előállított nagymennyiségű adat feldolgozása lehetővé tette a burkolatok geometriájának és falvastagság-eloszlásának részletes jellemzését. A PGAI-NR és a forró extrakciós mérések jelezték a hidrogén feldúsulását a felhasadt burkolaton, a felhasadás környezetében. A pálcák hidrogéntartalma minden esetben 500 ppm alatt maradt. A négy pontos hajlítóvizsgálatok szerint a burkolatok nem csak képlékenyek maradtak, de rugalmasságuk egy részét is megőrizték.

A Paksi Atomerőmű új üzemanyagának burkolatával végzett kísérlet szerint a fűtőelemek megőrzik épségüket a hűtőközegvesztéses tervezési üzemzavar során. A burkolat csak kismértékben oxidálódik és felhasadása csak nagyon magas belső nyomás esetén léphet fel. A CODEX-SLIM kísérlet igazolta, hogy az új gyártástechnológiával gyártott, a korábbinál vékonyabb falú cirkóniumburkolat ellenáll a feltételezett tervezési üzemzavar során fellépő terheléseknek és kedvezőbb oxidációs tulajdonságokkal

rendelkezik, mint a hagyományos technológiával gyártott fűtőelem-burkolat.

Köszönetnyilvánítás

A CODEX-SLIM kísérlet az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. támogatásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Nagy I., Farkas R., Vér N., Hózer Z., Szabó P., Szabó G., Kostka P., Lajtha G., Téchy Zs.: A CODEX-NITRO integrális, atomerőművi súlyos baleseti kísérlet, Nukleon 2019. december XII. évf. (2019) 222 https://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/12_2_222_NagyI_7.pdf (2023.09.01.)
- [2] Z. Hózer, I. Nagy, R. Farkas, N. Vér, M. Horváth, T. Novotny, E. Perez-Feró, M. Király, Z. Kis, B. Maróti, L. Szentmiklósi, P. Holecz, G. Auguszt, and G. Gémes, "Experimental Simulation of the Behavior of E110 Claddings under Accident Conditions Using Electrically Heated Bundles," in Zirconium in the Nuclear Industry: 19th International Symposium, ed. A. T. Motta and S. K. Yagnik (West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021), 813–832. <http://doi.org/10.1520/STP162220190010>
- [3] N. Chankow, "Neutron Radiography," in Nondestructive Testing Methods and New Applications, M. Omar, Ed. Rijeka: InTech, 2012.
- [4] T. Belgia et al., "First elemental imaging experiments on a combined PGAI and NT setup at the Budapest Research Reactor," J. Radioanal. Nucl. Chem., vol. 278, no. 3, pp. 751–754, (2008), <https://doi.org/10.1007/s10967-008-1605-7>
- [5] Z. Kis, L. Szentmiklósi, R. Schulze, and E. Abraham, "Prompt Gamma Activation Imaging (PGAI)," in Neutron Methods for Archaeology and Cultural Heritage, N. Kardjilov and G. Festa, Eds. Cham: Springer International Publishing, (2017), pp. 303–320.
- [6] L. Szentmiklósi, B. Maróti, Z. Kis, and Z. Kasztovszky, "Integration of neutron-based elemental analysis and imaging methods and applications to cultural heritage research," J. Archaeol. Sci. Reports, vol. 20, pp. 476–482, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.06.001>



ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA

Előfizetés

A 2024-es előfizetés

a 2023-as,

32.000 Ft + 5% áfa

áron elérhető.

Előfizetési szándékát a MAROVISZ-nál jelezze:

marovisz@marovisz.hu

Nagyméretű nyomástartó rendszerek Szerkezetintegritási kérdéseiről

On Structural Integrity Issues for Large Scale Pressure Systems

Fekete Tamás

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, FRL, Szerkezetintegritási Csoport, fekete.tamas@ek.hun-ren.hu

Kulcsszavak

szerkezetintegritás,
módszertan,
termomechanika,
törésmechanika nemlineáris
mezőelmélete

Absztrakt

A cikk dióhéjban áttekinti a nagyméretű nyomástartó rendszerek Szerkezetintegritási Számítási módszertanának a szabványokon alapuló hagyományos, és az azon túllépő új koncepcióját. Az új koncepció alapja a modern Termomechanikában gyökerező elmélet, a Törésmechanika Nemlineáris Mezőelmélete.

Módszertan,

structural integrity,
methodology,
thermomechanics,
nonlinear field theory of
fracture mechanics

Abstract

The paper gives a nutshell overview of the standards-based traditional and the new concept of Structural Integrity Calculations methodology for Large-Scale Pressure Systems. The new concept is based on the Nonlinear Field Theory of Fracture Mechanics, a theory originating in modern Thermomechanics.

1. Bevezetés

A cikkben vázlatosan áttekintjük a nagyméretű nyomástartó rendszerek Szerkezetintegritási Számítási módszertanának a hagyományos, több évtizeddel ezelőtt kidolgozott változatát, majd körvonalazunk egy új, a modern Termomechanika legújabb eredményeire alapozott koncepciót.

2. Nagyméretű nyomástartó rendszerek Tervezési Biztonsági Számításai

Ősi emberi tapasztalat, hogy a Természetben minden rendszer folyamatosan öregszik, előbb-utóbb előregszik. Az öregedés nemcsak a humán- és a biológiai-, hanem a szervesetlen rendszereknek is inherens jellemzője. Az öregedés magyarázza meg azt a mindennapos tapasztalatot, hogy bármely szilárd anyagból épített rendszer – eszköz, berendezés, infrastruktúra – rendeltetésszerűen csak korlátozott időtávon használható, bár ez az időtáv akár sok emberöltőre is kiterjedhet. A mérnöki alkotások öregedésére a 19. század középső harmadában – az első tudományos és technikai forradalom idején – figyeltek fel, azokon a rendszereken, amelyek nagy alapterhelésnek és különböző amplitúdójú tranziens terheléseknek voltak kitéve. Az akkoriban egyre jobban terjedő „vaspályákon” ugyanis az – egyébként statikus igénybevételre helyesen méretezett – alkatrészek sokszor, váratlanul, gyors töréssel tönkrementek, amikből nemegyszer súlyos balesetek származtak. Rankine az 1840-es évek elején foglalkozott vasúti tengelyek fáradási problémáival. Az 1850-es évek elején a francia Morin alkalmazta a „biztonságos élettartamra történő tervezés koncepciójának” korai változatát az akkori, lovak vontatta postakocsik tengelyei élettartamának becslésére. Wöhler 1850 és 1870 közötti tanulmányai alapozták meg a tudományos igényű, szisztematikus fárasztóvizsgálatok módszertanát. Eredményeit először 1870-ben tette közzé.

A 19. század harmadik negyedében indult el a villamosenergia iparszerű termelésére specializálódott energetika, és vált a 20. század közepére kulcsfontosságú iparággá.

A mai technikai civilizáció működtetésének alapjait a stabil és biztonságos villamosenergia termelés biztosítja. Az energiatermelés biztonságos működtetésének lehetőségét nagyban segítették a 20. század első évtizedeiben kidolgozott és azóta szisztematikus fejlesztett méretezési és tervezési szabványok, segédletek, amelyek közül mára néhányat gyakorlatilag az egész világon elfogadnak. Ilyenek pl. az amerikai ASME Code [1], a francia RCCM [2] vagy a német VDI Standards [3]. A szabványok közös szemléleti alapja az úgynevezett „biztonsági tervezési filozófia”, amelynek lényege, hogy a rendszer mindaddig üzemeltethető, amíg a szabványban definiált biztonsági kritériumokat teljesíti. A tervezési és az üzemelő létesítményeken szerzett tapasztalatok alapján a biztonsági kritériumokat folyamatosan fejlesztik.

A tervezési szabványok kezdetben csak a rendszer elemeinek statikus igénybevételre történő méretezését és a rendszer statikus terhelésekre történő ellenőrzését követték meg. A rendszer viselkedését követő ellenőrző számításokat nevezik Tervezési Biztonsági Számításoknak (TBSZ). Az öregedés jelenségének beépítése a TBSZ-okba a 20. század közepén kezdődött meg. Manapság a biztonsági tervezés filozófiája azt követeli meg, hogy egy kialakítás alatt álló rendszert, és annak komponenseit, úgy kell megtervezni, hogy a végső konstrukció az üzembehelyezéstől legalább a Tervezési Élettartam (TÉT) végéig hiba- és túlterheléstűrő legyen [4]. A hibátűrő képesség azt jelenti, hogy a rendszernek akkor is biztonságosnak kell lennie, ha a teherviselő keresztmetszetek repedésszerű hibákat tartalmaznak; ezért a TBSZ-ok a feladat törésmechanikai aspektusát is figyelembe veszik. A túlterhelés-tűrő képesség a rendszernek azon képessége, miszerint a rendkívül kis előfordulási valószínűséggel bekövetkező, extrém terhelésekkel járó üzemzavari tranzienseknek is ellenáll, azaz a szerkezeti integritását a gyors lefolyású, rendkívül nagy terhelésekkel járó üzemzavari tranziensek esetén is megőrzi.

A TBSZ-ok módszertana manapság főleg a fent említett tervezési szabványokra, illetve a nemzetközi jó gyakorlatra épül. A módszertan alapját négy fenomenológiai modell

képezi. (1) A hővezetés klasszikus modellje, amelyet Fourier a 19. század első negyedében alkotott meg. (2) A szilárdsági számítások, melynek alapja a kontinuummechanika linearizált alakváltozási elmélete, javarészt a 19. és 20. század fordulójának mérnöki kontinuummechanikájából származó, lineáris, homogén, izotrop és időfüggetlen konstitutív modellekkel. A leírás az anyagi nemlinearitásokat – az esetek túlnyomó többségében – rendkívül leegyszerűsített módon közelíti. (3) A törésmechanika klasszikus modelljei: a lineárisan rugalmas törésmechanika, illetve a klasszikus J -integrál koncepció. (4) Az öregedés modellje(i), amely(ek) teljesen empirikus alapú(ak). Az alapvető számítási összefüggések a következők:

1. A hőtani feladat:

$$\rho c_v \partial_\tau T(\mathbf{x}, \tau) + \nabla \cdot (\lambda \nabla T(\mathbf{x}, \tau)) = \dot{q}(\mathbf{x}, \tau)$$

a hővezetés Fourier-féle egyenlete,

$$\lambda \partial_n T(\mathbf{x}, \tau) \Big|_{\text{perem}} = -\alpha(\mathbf{x}, \tau) \left(T(\mathbf{x}, \tau) \Big|_{\text{perem}} - T(\mathbf{x}, \tau) \Big|_{\text{foly}} \right)$$

harmadfajú peremfeltétel a határfelületeken, (1)

$$\rho = \rho(T), \quad c_v = c_v(T), \quad \lambda = \lambda(T)$$

állapotegyenletek.

2. A kontinuum-mechanikai feladat:

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}, \tau) = \frac{1}{2}(\mathbf{u} \circ \nabla + \nabla \circ \mathbf{u})(\mathbf{x}, \tau)$$

a kinematikai egyenlet,

$$d\boldsymbol{\varepsilon} = d_E \boldsymbol{\varepsilon} + d_T \boldsymbol{\varepsilon} + d_{pl} \boldsymbol{\varepsilon}$$

az alakváltozási tenzor felbontása,

$$\rho \dot{\mathbf{v}}(\mathbf{x}, \tau) + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \tau) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \tau)$$

az impulzusmérleg,

$$\boldsymbol{\sigma}^T(\mathbf{x}, \tau) = \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \tau)$$

az impulzusnyomaték mérlege,

$$\dot{W}(\mathbf{x}, \tau) = \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \tau) : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}, \tau)$$

a mechanikai teljesítmény mérlege,

$$d_E \boldsymbol{\varepsilon} = F(\boldsymbol{\sigma}_E, T), \quad d_T \boldsymbol{\varepsilon} = F(T), \quad d_{pl} \boldsymbol{\varepsilon} = F(\boldsymbol{\sigma}_{pl}, T)$$

a konstitutív egyenletek.

3. A törésmechanikai probléma, amely a repedések élére ható hajtóerő meghatározását és a repedés csúcs stabilitásának a klasszikus törésmechanika módszereivel történő vizsgálatát foglalja magába:

$$J_I = \int_{\Gamma} (W_E \mathbf{I} - \boldsymbol{\varepsilon}^T \cdot \boldsymbol{\sigma}) N dA \quad \text{a repedés élén fellépő hajtóerő,} \quad (3)$$

a stabilitási kritérium:

ha $J_I - J_{Ic} \leq 0$, a repedés éle stabil,

ha $J_I - J_{Ic} > 0$, a repedés éle instabil.

4. Az öregedési probléma, amely a szerkezeti anyagok termikus, mechanikai és törésmechanikai jellemzőinek az öregedés során mutatott változásait írja le:

Az öregedés leírása teljesen empirikus összefüggésekre támaszkodik. A megfelelő öregítési kísérletek eredményeiből nyert összefüggésekkel határozható meg a szerkezeti anyagok öregedési profilja.

A fenti egyenletekben $\mathbf{x}$ a térbeli-, τ az időkoordinátát, ∂_τ vagy $\dot{}$ az időderiváltat, ∇ a térbeli gradienst, T a hőmérsékletet, $\dot{q}$ a hőforrás teljesítményét, ρ a sűrűséget, c_v a hőkapacitást, λ a hővezetési tényezőt, ∂_n a lokális gradiens operátor külső normálisát jelenti egy határfelület egy pontján; α a hőátadási tényező, $T \Big|_{\text{perem}}$ a szilárd test, $T \Big|_{\text{foly}}$ a technológiai közeg hőmérséklete a szilárd-folyadék határfelületen. d -vel egy mennyiség növekményét, $\mathbf{u}$ -val

az elmozdulást, ε -nal az alakváltozási, σ -val a feszültség tenzorát jelöljük. $\dot{\mathbf{v}}$ a gyorsulás, $\mathbf{f}$ a külső erők sűrűsége, $\dot{W}$ a mechanikai teljesítmény sűrűsége, W_E a tárolt mechanikai energia rugalmas komponense. $\cdot$ két vektor, $:$ két tenzor belső szorzatát reprezentálja.

A számításokban felhasznált anyagjellemzők a megfelelő mérési szabványok – lásd pl. ISO 6892-1 [5], ISO 6892-2 [6], ISO 6892-3 [7], ASTM E8/E8M [8], ISO 12135 [9], illetve ASTM E399 [10], ASTM E1820 [11] és ASTM E1921 [12] – előírásai szerint elvégzett és kiértékelt anyagvizsgálatok eredményein alapulnak.

3. Nagyméretű nyomástartó rendszerek „klasszikus” Szerkezetintegritási Számításai

A nyomástartó rendszer Szerkezetintegritási Számításai (SZISZ) olyan biztonsági számítások, amelyek az üzemelő rendszer egyedi sajátosságait is figyelembe veszik. Céljuk a nyomástartó rendszer Műszakilag Megengedhető Élettartamának (MMÉT) az előrejelzése. Értelmszerűen akkor végzik el azokat, amint a rendszer szerkezeti anyagainak öregedési profiljai – a tervek szerinti öregítési program anyagvizsgálatainak eredményei alapján – rendelkezésre állnak [4]. A MMÉT meghatározása olyan, az üzemeltetési időre ($\tilde{\tau}$) vonatkozó paramétervizsgálat,

amely az öregedési profilokon, valamint a különböző ($\tilde{\tau}_i$) időpontokig érvényes üzemeltetési forgatókönyveken alapul. Egy ($\tilde{\tau}_i$) időpontig érvényes üzemeltetési forgatókönyv a már megvalósult üzemmeneteket és a jövőben feltételezett üzemeltetési menetrendet tartalmazza. Ezen adatok alapján minden ($\tilde{\tau}_i$)-re elvégeznek egy öregedés + a rendkívüli túlterhelésekkel járó események vizsgálatából álló számítási csomagot. Az öregedési számítások jövőre vonatkozó része mindazokat a várható scénáriókat tartalmazza, amelyeket a tervező a normál üzemeltetés részének tekint. A túlterhelési eseményekre végzett vizsgálatok ez esetben is a feltételezett – rendkívül kis előfordulási valószínűséggel bekövetkező –, extrém terhelésekkel járó üzemzavari transziensek elemzését tartalmazzák. A számítások eredményei alapján a MMÉT az üzemidő azon ($\tilde{\tau}_{MMÉT}$) értéke, amelynél az öregedés- és túlterhelésvizsgálatok eredményei szerint a rendszer még éppen teljesíti a biztonsági kritériumokat. A SZISZ-ok MMÉT-ra vonatkozó prognózisait akkor tekintik elfogadhatónak, ha: (1) a számítás módszertana megfelel a nemzetközi jó gyakorlatnak; (2) a szerkezeti anyagok öregedési profiljainak érvényességi tartománya legalább azt az üzemeltetési időt lefedi, ameddig a rendszert üzemeltetni kívánják.

A 2000-es évek első évtizedében zajlott le az arra alkalmas atomerőművi blokkok Üzemidő-hosszabbítási (ÜH) projektjeinek első hulláma, amelyet ma az Üzemidő-hosszabbítás Első Fázisának (ÜHEF) neveznek.

A legtöbb létesítmény $\ddot{U}H$ -át az tette lehetővé, hogy a biztonság szempontjából legfontosabb nyomástartó rendszerek szerkezeti anyagainak öregedési profiljai kedvezőbbek voltak, mint azt a $TBSZ$ -okban feltételezték, és érvényességi tartományuk lényegesen túlnyúlt azon az időtávon, amelyet a további üzemeltetéssel megcélzottak. Az $\ddot{U}H$ projektek sikeressége – azaz az $\ddot{U}HEF$ megvalósíthatósága – döntően a $SZISZ$ -ok eredményeitől függött; a $SZISZ$ -ok módszertana a $TBSZ$ -ok módszertanára és a nemzetközi jó gyakorlatból leszárt ajánlásokra épült. A számításokban felhasznált anyagjellemzők és öregedési profilok a felületes programok keretében, az említett mérési szabványok [5-12] előírásai szerint elvégzett és kiértékelt anyagvizsgálatok eredményeiből származtak.

4. A Szerkezetintegritási Számítások új módszertana

4.1 Általános megfontolások

Napjainkban az $\ddot{U}HEF$ időtartományában üzemelő atomerőművi blokkok eddigi üzemeltetési tapasztalatai és a felülvizsgálati programok eredményei birtokában reálisnak tűnik az a hipotézis, hogy ezek a létesítmények az $\ddot{U}HEF$ leteltét követő időszakban is alkalmasak lesznek a biztonságos üzemeltetésre. Az $\ddot{U}HEF$ -át követő üzemeltetési időszakot az $\ddot{U}$ zemidő- $\ddot{h}$ osszabbítás Második Fázisának ($\ddot{U}HMF$) nevezik – ennek alternatívájaként használják a További $\ddot{U}$ zemidő- $\ddot{h}$ osszabbítás ($T\ddot{U}H$) megjelölést is –. Egy blokk $\ddot{U}HMF$ -ra való alkalmasságát vagy éppen alkalmatlanságát a mai helyzetre és a feltételezett jövőre vonatkozó $SZISZ$ -ok eredményei fogják eldönteni. A $T\ddot{U}H$ megvalósítását megalapozó $SZISZ$ projektek alapjainak kimunkálása komoly kihívást jelent a kutatók és a fejlesztők számára.

A kihívások egyik fő oka a kísérleti adatokhoz rendelkezésre álló információforrások – a megfelelően öregített próbatestek – számának jelentős csökkenése. Kiegészítő, rendszer-specifikus öregítési programokat végrehajtani ma – megfelelő mennyiségű minta hiányában – gyakorlatilag lehetetlen. Lehetőség van viszont az egyszer már vizsgált próbadarabok megfelelő maradákaiból olyan mintákat készíteni, amelyeken új mérések végezhetőek. Ezek a próbatestek szükségszerűen lényegesen kisebb méretűek lesznek, mint amelyekre az eddig említett mérési szabványok [5-12] vonatkoznak. Az Információ Technológia (IT) mai lehetőségeit is számbavéve kijelenthetjük, hogy a miniatürizált próbatesteken elvégzett vizsgálatokat célszerű olyan új megfigyelési és kiértékelési módszerekkel végrehajtani, amelyek lényegesen több információt gyűjtenek, dolgoznak fel és tesznek elérhetővé a $SZISZ$ -ok számára, mint amennyi a ma hatályos anyagvizsgálati szabványok követelményeit éppen kielégítő mérésekből leszármaztatható. Ily módon a mérési eredmények megbízhatósága számottevően növelhető.

A kihívások további fontos oka, hogy a megfelelő létesítmények $\ddot{U}H$ -át megalapozó projektek befejezése óta eltelt időszakban a $SZISZ$ -ok eredményeinek pontosságával és megbízhatóságával szembeni elvárások folyamatosan emelkedtek és folyamatosan tovább emelkednek.

Az újabb elvárásoknak az alapvetően tervezési szabványokból kiinduló, a $TBSZ$ -ok módszertanából átvett metódikát megvalósító $SZISZ$ -ok egyre kevésbé felelnek meg.

Ezért néhány évvel ezelőtt az Energiatudományi Kutatóközpontban (EK) olyan kutatást indítottunk, amelynek célja a $SZISZ$ -ok módszertanának olyan korszerűsítése, amely figyelembe veszi a tervezési szabványokból kiinduló $TBSZ$ -ok alapjainak kidolgozása óta eltelt ≈ 100 év tudományos eredményeit is. A fejlesztés a következő két megfontolásból indult ki:

1. a metodológiát célszerű olyan alapokra építeni, amely megfelel a mai kor tudományos szemléletének;
2. a létrehozott modellnek a felhasználók számára könnyen elsajátíthatónak, a numerikus algoritmusok számára könnyen implementálhatónak, a mérnöki alkalmazásokban pedig erőforrás-hatékonynak kell lennie.

4.2 A módszertan alapjairól

Az élet minden problémájának megoldása valamilyen hipotézisen vagy hipotézisek rendszerén alapul. A $SZISZ$ -ok új módszertanának alapját képező, legfontosabb hipotézis az *irreverzibilitási hipotézis*, mely szerint a körülöttünk lévő világban az irreverzibilitás, illetve a disszipáció elkerülhetetlen [13]. A hipotézis plauzibilis voltát támasztják alá Torromé azon elméleti vizsgálatainak eredményei [14], amely szerint a dinamikai rendszerek általános viselkedési formája az *irreverzibilis viselkedés*. Ez azt jelenti, hogy a dinamikai rendszerek sokkal nagyobb valószínűséggel szeretnek irreverzibilis módon viselkedni, mint reverzibilis állapotban megmaradni. A világ nagyon nagy valószínűséggel általánosan irreverzibilis viselkedése okán a módszertan a modern Nemegyensúlyi Kontinuum Termodinamikára épül. Ezen választás mögött három megfontolás áll: (1) elismerjük, hogy az idő kiemelkedő szerepet tölt be a természetben; (2) a leírni kívánt rendszerek nemegyensúlyi, ezért lényegileg időfüggő és időfejlődést mutató dinamikai rendszerek; (3) az időfüggés konzekvens figyelembevétel teszi lehetővé a leírás számára, hogy az – a választott közelítés megengedte mértékben – egyensúlytól távolabbi folyamatokra is érvényes legyen. Ez szemben áll a mai szabványokon alapuló módszertanok alapvetően a statikai egyensúlyra, illetve a kvázistatikus folyamatok fogalmára épített felfogásával. A konzekvens és konzisztens, időfüggő modern termodinamikai leírás nyitja meg az utat arra felé, hogy a vizsgált fizikai rendszereket és azok időfejlődését mindazon szemléletbeli kötöttségek nélkül vizsgálhassuk, amelyeket ma a szabványos módszertanok tartalmaznak.

Az elméleti keretrendszer egyfázisú, szilárd kontinuum hővezetését, mechanikai és törésmechanikai viselkedését és öregedését egységes termodinamikai keretben írja le [15-19]. Chen és Mai [15] nyomán az elmélet neve „*A Törésmechanika Nemlineáris Mezőelmélete*”. A Törésmechanika Nemlineáris Mezőelmélete olyan, a modern Termodinamika keretein belül kidolgozott törésmechanikai elmélet, amely tetszőleges disszipatív anyagmodell esetén, több csatolt fizikai mező kölcsönhatásának figyelembevételére esetén is érvényes. Kinematikája a

klasszikus Boltzmann-féle kontinuum nagy elmozdulások és nagy alakváltozások leírására alkalmas közelítése. A leírásba bevont folyamatok mindegyike disszipatív, amelyek integráltak és összefonódva, holisztikus rendszerben működnek. Ugyanis az egyes jelenségkörökre önállóan végzett diszciplináris vizsgálatok önmagukban csak rész-információkat szolgáltatnak a rendszerről, és ez az ismeretanyag kevés ahhoz, hogy a rendszer viselkedését hosszú időtávon is ellentmondásmentesen leírja. A rendszer hosszú időtávú időfejlődésének konzisztens leírása akkor képzelhető el, ha a vizsgálatok a releváns folyamatok teljes rendszerére kiterjednek, figyelembe véve az azok között fellépő csatolásokat is. A csatolásokat a Termodinamika II. főtétele az entrópiamérlegen keresztül vezérli; azok erőssége attól függ, hogy az entrópiaprodukciónak sebessége hogyan osztja újra az egyes folyamatok között a disszipáló energiát. A leírásban az energetikai mellett az entrópiikus folyamatok is megjelennek, azaz az új módszertan a hagyományos energetikai szempontú közelítés helyett kombinált, 'Energia + Entrópia' alapú leírásra épül. Az entrópiamérlegen keresztül követhető, hogy a disszipatív folyamatok hol, meddig és milyen szerepet játszanak a rendszer stabil evolúciójának fenntartásában.

4.3 A módszertan alapvető számítási összefüggései

Minden fizikai elmélet alapját a mozgásegyenletek képezik, amelyeket a mezőegyenletek az anyagi rendszeren belüli kölcsönhatások leírásával egészítenek ki. Egy rendszer viselkedését a mozgásegyenletek és a mezőegyenletek rendszere írja le. A mozgásegyenletek az anyagi rendszernek az őt körülvevő térben végzett mozgását jellemzik. Ha a mozgásegyenleteket a külső térhez rögzített koordináta-rendszerben szemléljük, akkor a leírást Euler-féle leírásnak, a koordináta-rendszert pedig Euler-féle koordináta-rendszernek nevezzük. Ha a mozgást az anyagi rendszerrel együtt mozgó rendszerben vizsgáljuk, akkor a leírást Lagrange-nak, a koordináta-rendszert Lagrange koordináta-rendszernek nevezzük.

Napjainkban a kontinuummechanika modern geometriai irányzatában az anyagi testet olyan sokaságnak tekintik, amelynek saját, belső geometriája van. Ezt a leírásmódot ki lehet egészíteni úgy, hogy az anyagi testen saját, belső tér-időt vezetünk be. A testen definiált tér-idő koordináta-rendszer térbeli része a kontinuummechanika anyagi vagy referencia koordináta-rendszere, időbeli része a véges időtartományon létező test 'életkorát' leíró 'belső' idő. Az anyagi pontokat (P) az anyagi koordináta-rendszerben elfoglalt helyzetük (X) és a belső idő ($\hat{t}$) alkotta $(X, \hat{t})$ párral jellemezzük. Ezzel a koordinátázással válnak leírhatóvá az öregedési folyamatok. Az elsődleges koordináta-rendszer a Lagrange koordináta-rendszer. Egy öregedő test P pontjának a ($\hat{t}$) belső időhöz tartozó külső τ időpontban zajló pillanatnyi mozgását Euler-koordináta-rendszerben a következőképpen írjuk fel:

$$x(\tau, \hat{t}) = \chi(X, \tau, \hat{t}) \quad , \text{ ahol } \hat{t} = \int_{\tau_0}^{\tau} d\tau \quad (4)$$

ahol P helyét a Lagrange koordináta-rendszerben X , míg

Euler-koordináta-rendszerben x reprezentálja. A mozgásegyenletek ezen formája hasonlít a pontmechanikában használt változathoz. A kinematikai mező legegyszerűbb alakjára úgy jutunk, hogy megvizsgáljuk, miként változnak a mozgásegyenletek, ha a P körüli reprezentatív térfogatelemen (RVE) elhelyezkedő P' pont pillanatnyi mozgását is figyelemmel kísérjük. A $P \rightarrow P', X \rightarrow X' = X + dX$ transzformáció hatására P' mozgása – a mozgásfüggvény P körüli Taylor sorfejtésének legegyszerűbb, lokálisan lineáris tagjánál megállva – Euler koordináta-rendszerben a következő alakot veszi fel:

$$x'(\tau, \hat{t}) = \chi(X, \tau, \hat{t}) + \nabla_X \chi(X, \tau, \hat{t}) dX + O(dX \otimes dX) \quad (5)$$

ahol x' a P' pozíciója a környező térben, $\nabla_X \chi((X, \hat{t}), \tau)$ a mozgásfüggvény X körüli lokális Taylor sorfejtésének lineáris tagja; a másod- és a magasabbrendű tagokat $O(dX \otimes dX)$ -ben rejtjük el. $\nabla_X \chi((X, \hat{t}), \tau)$ -et a mozgásfüggvény gradiensének nevezzük, és a továbbiakban F -el jelöljük. A gradienst Euler-koordinátákban ∇ , míg Lagrange koordinátákban ∇_X jelöli. A P pontban értelmezett elmozdulást:

$$u(\tau, \hat{t}) = x(\tau, \hat{t}) - X(\tau, \hat{t}) \quad (6)$$

definiálja. u P -nek az Euler és a Lagrange koordinátákban értelmezett pillanatnyi pozícióit kapcsolja össze. A jobb Cauchy-Green tenzort, C -t $C = F^T F$, a Green-Lagrange nyúlástenzort $\mathcal{E} = \frac{1}{2}(C - I)$ definiálja. Ha a primer változó u , akkor F helyett a $H \doteq \nabla_X u = u \circ \nabla_X$ elmozdulás-gradiensre térünk át. H -t és F -et a $H = F - I$ egyenlet köti össze. Ekkor a Green-Lagrange deformációtenzor alakja:

$$\mathcal{E}(\tau, \hat{t}) = \frac{1}{2}(H + H^T + H \cdot H^T)(\tau, \hat{t}) = \tilde{\mathcal{E}}^{lin} + \tilde{\mathcal{E}}^{nonlin} \quad (7)$$

ahol $\tilde{\mathcal{E}}^{lin} = 1/2 \cdot (H + H^T)$ és $\tilde{\mathcal{E}}^{nonlin} = 1/2 \cdot (H \cdot H^T)$. A (7) összefüggés a nagy alakváltozások leírására alkalmas, geometriailag nemlineáris – az elmozdulásokban másodrendű tagokat tartalmazó – Boltzmann-féle kontinuum modell. Ha a leírás a Green-Lagrange-tenzor $\tilde{\mathcal{E}}^{lin}$ részére szorítkozik, akkor az alakváltozás linearizált elméletéről beszélünk. A másodrendű kinematikai elmélet nyitja meg az utat a geometriai nemlinearitások számításokba történő beépítése előtt, és a megfelelő anyagi nemlinearitásokkal együtt lehetővé teszi az anyag viselkedésének pontosabb leírását akkor, amikor a helyi alakváltozások tudvalevően nagyok, pl. egy repedés frontja körül. A test állapotának időben történő leírásához a kinematikai modellt ki kell egészíteni a test kölcsönhatásainak dinamikáját leíró mezőegyenletek rendszerével, amely az általános mérleg-egyenletekből, továbbá a konstitutív egyenletek rendszeréből áll. Az általános mérleg-egyenletek a következők [15]:

A tömegmérleg:

$$d_t \int_{V_i} \rho dV = 0 \quad (8)$$

Az impulzus és az impulzusnyomaték mérlege:

$$\begin{aligned} d_t \int_{V_i} \rho v dV &= \int_{\partial V_i} \sigma \cdot n dA + \int_{V_i} \rho \hat{f}_{ext} dV \\ d_t \int_{V_i} r \times \rho v dV &= \int_{\partial V_i} (r \times (\sigma \cdot n)) dA + \int_{V_i} (r \times \rho \hat{f}_{ext}) dV \end{aligned} \quad (9)$$

Az energia és az entrópia mérlege:

$$\begin{aligned} d_t \int_{V_t} \rho (\hat{E}_{Kin} + \hat{E}_H + \hat{E}_{Th}) dV &= - \int_{V_t} (\nabla_X \mathbf{j}_q) dV + \int_{V_t} (\nabla_X \boldsymbol{\sigma} + \rho \hat{\mathbf{f}}_{ext}) \cdot \mathbf{v} dV + \int_{V_t} (\boldsymbol{\sigma} : \mathbf{v} \nabla_X) dV, \\ \int_{V_t} \rho T (d_t \hat{s}) dV &= - \int_{\partial V_t} (\mathbf{j}_q - T \mathbf{j}_s) \cdot \mathbf{n} dA - \int_{V_t} (\mathbf{j}_s \cdot \nabla_X T) dV - \int_{V_t} (\rho \hat{s} d_t T) dV + \\ &+ \int_{V_t} \rho \dot{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{v} dV + \frac{1}{2} \int_{V_t} j^{-1} \boldsymbol{\Sigma}^t : d_t C dV - d_t \int_{V_t} \rho (\hat{E}_{Kin} + \hat{E}_H) dV \geq 0, \end{aligned} \quad (10)$$

ahol d_t az időderivált, ρ a sűrűség, $\mathbf{v}$ a sebesség, $\dot{\mathbf{v}}$ a gyorsulás, $\boldsymbol{\sigma}$ a Cauchy-féle feszültségi tenzor, $\mathbf{n}$ a lokális gradiens operátor külső normálisa a határfelület egy pontján, $\hat{\mathbf{f}}$ a külső erők sűrűsége, T a lokális hőmérséklet, $\hat{s}$ a lokális entrópia-sűrűség, $\mathbf{j}_q$ a lokális hőáram, $\mathbf{j}_s$ a lokális entrópiaáram. A kinetikai $\hat{E}_{Kin}$, a Helmholtz szabadenergia $\hat{E}_H$ és a hőenergia $\hat{E}_{Th}$ sűrűségeit a következő összefüggések definiálják:

$$\begin{aligned} \hat{E}_{Kin} &= \hat{K}(\mathbf{v}; \alpha_i^s (i=1 \dots a), \tilde{\alpha}_j^v (j=1 \dots b), \hat{\alpha}_k^t (k=1 \dots c), A_l (l=1 \dots d), X), \\ \hat{E}_H &= \hat{\Psi}(C, T, \nabla_X T, \alpha_i^s (i=1 \dots a), \tilde{\alpha}_j^v (j=1 \dots b), \hat{\alpha}_k^t (k=1 \dots c), A_l (l=1 \dots d), X), \\ \hat{E}_{Th} &= T \cdot \hat{s}, \end{aligned} \quad (11)$$

ahol a testben zajló – belső szerkezeti átrendeződéssel járó – disszipatív térfogati folyamatokat a következő termodinamikai belső változók fejezik ki: (1) α_i^s ($i=1 \dots a$) a skaláris, (2) $\tilde{\alpha}_j^v$ ($j=1 \dots b$) a vektori, (3) $\hat{\alpha}_k^t$ ($k=1 \dots c$) a tenzori rendű belső változókkal leírható részt. A repedések éle körüli felületi disszipációt az A_l ($l=1 \dots d$) belső változók reprezentálják. A konstitutív egyenletek a következők:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Sigma}^t &= 2\rho_0 \partial_c \hat{\Psi} && \text{a második Piola-Kirchhoff feszültségtenzor,} \\ \hat{s} &= \partial_T \hat{\Psi} && \text{az entrópia sűrűsége,} \\ \tilde{\mathbf{g}}_i^s &= -\rho_0 \partial_{\alpha_i^s} \hat{\Psi} && \text{az } \alpha_i^s \text{ belső változóhoz konjugált skalár termodinamikai erő,} \\ \tilde{\mathbf{g}}_j^v &= -\rho_0 \partial_{\tilde{\alpha}_j^v} \hat{\Psi} && \text{az } \tilde{\alpha}_j^v \text{ belső változóhoz konjugált vektori rendű termodinamikai erő,} \\ \tilde{\mathbf{g}}_k^t &= -\rho_0 \partial_{\hat{\alpha}_k^t} \hat{\Psi} && \text{az } \hat{\alpha}_k^t \text{ belső változóhoz konjugált tenzori rendű termodinamikai erő,} \\ \tilde{G}_l &= -\partial_{A_l} \int_{V_t} \rho (\hat{K} + \hat{\Psi}) dV && \text{az } l\text{-edik makroszkópikus repedéshez konjugált skalár termodinamikai erő.} \end{aligned} \quad (12)$$

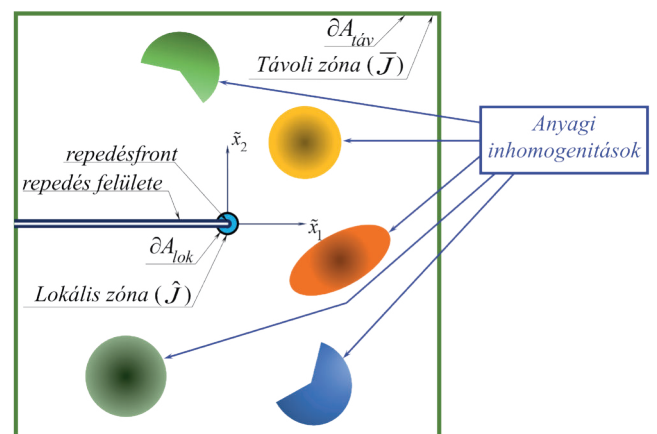
A szerkezeti anyag törésmechanikai viselkedését a lokális $\hat{J}$ és a távoli $\bar{J}$ tagokból álló általánosított J -integrál írja le, a következők szerint:

$$\begin{aligned} \bar{J}|_{\bar{A}}(\dots, \tau, \hat{\tau}) &\doteq \frac{1}{\bar{A}} \int_{\bar{A}} (\rho (\hat{K} + \hat{\Psi}) \cdot V_c + \boldsymbol{\sigma}^t : \mathbf{v}) n d\bar{A}, \\ \hat{J}(\dots, \tau, \hat{\tau}) &= \lim_{\bar{A} \rightarrow 0} \bar{J}|_{\bar{A}}(\dots, \tau, \hat{\tau}) = \tilde{G}(\dots, \tau, \hat{\tau}), \\ \hat{J}(\dots, \tau, \hat{\tau}) &= \bar{J}|_{\bar{A}}(\dots, \tau, \hat{\tau}) - \frac{1}{\bar{A}} \left[\int_{\bar{V}} \partial_t (\rho (\hat{K} + \hat{\Psi})) d\bar{V} - \right. \\ &- \int_{\bar{V}} \rho \hat{\mathbf{f}}_{ext} \cdot \mathbf{v} d\bar{V} + \int_{\bar{V}} \rho \hat{s} \dot{T} d\bar{V} + \sum_i \int_{\bar{V}} (j^{-1} \tilde{\mathbf{g}}_i^s \dot{\alpha}_i^s) d\bar{V} + \\ &+ \left. \sum_j \int_{\bar{V}} (j^{-1} \tilde{\mathbf{g}}_j^v \cdot \dot{\tilde{\alpha}}_j^v) d\bar{V} + \sum_k \int_{\bar{V}} (j^{-1} \tilde{\mathbf{g}}_k^t \circ \dot{\hat{\alpha}}_k^t) d\bar{V} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

A (13) összefüggésben felül definiált $\bar{J}$ nem útfüggetlen, mert a repedés körüli *távoli zónában* anyagi inhomogenitások vannak jelen – ld. az 1. ábrát –; ugyanakkor a lokális $\hat{J}$, mint *limit*, egyértelműen meghatározott, amint ez (13) alsó összefüggéséből jól látszik.

Az általánosított J -integrál (13)-ban bemutatott definíciójából látszik, hogy egyesíti a törésmechanika klasszikus globális és lokális szemléletű (local approach) leírásmódjait; akár több fizikai mező – termikus, mechanikai stb. – együttes terhelésének kitett, disszipatív vagy konzervatív, homogén vagy inhomogén anyagokban terjedő repedések viselkedésének leírására alkalmas. Magába foglalja a törési energia-felszabadulási sebesség kritériumát, a dinamikus energia-felszabadulási sebesség kritériumát, a hagyományos J -integrál módszert, a C^* -integrál módszert, a konfigurációs erők módszerét, hogy csak néhányat említsünk. A törésmechanikai leírás egyik legfőbb újdonsága az, hogy megnyitotta az utat a terhelési előzményektől függő térfogati disszipáció törésmechanikai leírásba történő beépítése, azaz az öregedési jelenségek és a törésmechanika egységes tárgyalása előtt.

Az általánosított J -integrál útfüggő volta nyilvánvalóan magával vonja a meghatározásához szükséges elméleti és numerikus apparátus komplexebbé válását, azonban utat nyit a repedések stabilitási viszonyainak a modern stabilitáselmélet szellemében történő tanulmányozásához [20-22]; erre van nagy szükség a Meleg-Előfeszítés (Warm-PreStress, WPS) jelenségének vizsgálatai során is [23].



1. ábra: A lokális $\hat{J}$ és a távoli $\bar{J}$ tagokból álló, általánosított J -integrál

4.4 Az új módszertan és a kísérletek, mérések viszonya

A SZISZ-ok *klasszikus* – a TBSZ-ok módszertanára épített –, és a modern Termomechanikára alapozott *új* elméleti keretrendszerét összevetve elmondható, hogy az új keretrendszer a régiek messzemenő általánosítása. Az általánosításnak a kísérleti háttérre, valamint a kísérletek eredményeinek értelmezésére vonatkozó legfontosabb következménye az, hogy a számítások megvalósításához szükséges anyagvizsgálatok megfigyelési és kiértékelési módszereit illeszteni kell a módszertanhoz. Az alapul választott *elméleti apparátus* határozza meg, hogy a vizsgálatok során mely jelenségek relevánsak, a felvetődött problémák megoldásához milyen anyagvizsgálatokra van szükség, azokat hogyan kell értelmezni és az eredményeket milyen módszerekkel kell kiértékelni. A *mérések* arra válaszolnak, hogy az adott körülmények között a szerkezeti anyagok konkrétan hogyan viselkednek. Ez azt jelenti, hogy a SZISZ-ok végrehajtását támogató anyagvizsgálatok során az *elmélet* és a *mérések* nem szeparálhatók egymástól. Az elmélet és a gyakorlati vizsgálatok eredményei *csak együtt* szolgáltatnak annyi információt a rendszerről, hogy azokra prediktív erejű számításokat lehessen építeni. Az új elméleti apparátus megteremti annak lehetőségét, hogy a mérések eredményeit a mai kor követelményeinek megfelelő modellezési eljárásokkal – például a *Digitális Pár* koncepció segítségével – értékeljük ki. Ehhez mindekelőtt fel kell építeni egy, az új koncepcióra épülő mérési és mérés-kiértékelési módszertant.

5. Összefoglalás

A cikkben a nagyméretű nyomástartó rendszerek *Szerkezetintegritási Számítási* módszertanának hagyományos és új koncepcióját tekintettük át dióhéjban. Tekintettel a téma jelentőségére, a lap későbbi számában a kérdéskör alapjait és részleteit is kifejtjük.

Irodalomjegyzék

- [1] ASME 2023, Boiler and Pressure Vessel Code Complete Set. ASME New York (2023)
- [2] RCCM 2022, Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands, AFCEN Courbevoie (2022)
- [3] VDI, VDI Standards, Beuth Berlin (2023)
- [4] Fekete T., Towards a Generalized Methodology for Structural Integrity Calculations of Large-Scale Pressure Vessels, Procedia Structural Integrity 17 (2019) 464–471.
- [5] ISO 6892-1, Metallic materials – Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature, ISO Geneva (2019)
- [6] ISO 6892-2, Metallic materials – Tensile testing: Part 2: Method of test at elevated temperature, ISO Geneva (2018)
- [7] ISO 6892-3, Metallic materials – Tensile testing: Part 3: Method of test at low temperature, ISO Geneva (2015)
- [8] ASTM E8/E8M-22, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International West Conshohocken (2022)
- [9] ISO 12135, Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness, ISO Geneva (2021)
- [10] ASTM E 399-22, Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM International West Conshohocken (2022)
- [11] ASTM E 1820-23, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM International West Conshohocken (2023)
- [12] ASTM E 1921-22, Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T₀, for Ferritic Steels in the Transition Range, ASTM International West Conshohocken (2022)
- [13] Fekete T., The Fundaments of Structural Integrity of Large-Scale Pressure Systems, Procedia Structural Integrity 37 (2022) 779–787.
- [14] R.G. Torromé, General theory of non-reversible local dynamics, International Journal of Geometric Methods in Modern Physics 18 7 (2021) 2150111.
- [15] X.H. Chen, Y.W. Mai, Fracture Mechanics of Electromagnetic Materials. Nonlinear Field Theory and Applications. Imperial College Press London (2013)
- [16] Maugin, G.A.: Configurational Forces. Thermomechanics, Physics, Mathematics and Numerics. CRC Series: Modern Mechanics and Mathematics, CRC Press Taylor&Francis Group Boca Raton London New York (2010)
- [17] D. Zimmermann, Material Forces in Finite Inelasticity and Structural Dynamics: Topology Optimization, Mesh Refinement and Fracture, Bericht Nr. I-21 Institut für Mechanik Stuttgart (2008)
- [18] P. Steinmann, Spatial and Material Forces in Nonlinear Continuum Mechanics. A Dissipation-Consistent Approach. In: Solid Mechanics and its Applications 272, Springer Nature Cham (2022)
- [19] A. Morro, C. Giorgi, Mathematical Modelling of Continuum Physics. Modeling and Simulation in Science, Engineering and Technology. Birkhäuser Cham (2023)
- [20] V.I. Arnold, Catastrophe Theory, Springer Berlin Heidelberg New York Tokyo (1984)
- [21] R. Gilmore, Catastrophe Theory for Scientists and Engineers, Dover Publications New York (1993)
- [22] R. Gilmore, Catastrophe Theory. In digital Encyclopedia of Applied Physics, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2007)
- [23] Fekete T., The Prospect of Modern Thermomechanics in Structural Integrity Calculations of Large-Scale Pressure Vessels, Continuum Mechanics and Thermodynamics 30 (2018) 1267–1322.

Anyagvizsgálatok és kiértékelésük innovatív módszertana

Innovative Methodology for Material Tests and their Evaluation

Fekete Tamás

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, főtanácsos, fekete.tamas@ek.hun-ren.hu

Kulcsszavak

roncsolásos anyagvizsgálatok,
kiértékelés,
szimuláció,
digitális pár

Absztrakt

A nagyméretű nyomástartó rendszerek Szerkezetintegritási Számításainak célja a főként az energetikai iparban és a nehéziparban üzemelő technológiai rendszerek biztonságos működtetési határainak elvárt pontosságú előrejelzése. A modern kontinuum termomechanika ígéretes elméleti alapként tűnik a Szerkezetintegritási Számítások modern módszertana számára, ám az elméletben rejlő potenciált az ipari alkalmazásokban még nehéz kihasználni. Ennek az az egyik fő oka, hogy az elméletben használt konstitutív modellek paramétereit csak nagy bizonytalansággal tudják meghatározni, amennyiben azokat az anyagvizsgálati mérések eredményeiből a hagyományos – a megfelelő anyagvizsgálati szabványokban fellelhető – kiértékelési módszerekkel származtatják le, különösen, ha az alakváltozások nagyobbak. Ezért olyan kutatást kezdeményeztünk, amelynek célja a Szerkezetintegritási Számítások fejlesztés alatt álló modern módszertana követelményeit kielégítő anyagvizsgálati és kiértékelési eljárás kidolgozása. A tanulmányban a roncsolásos anyagvizsgálatok és kiértékelésük általánosított módszertanának alapjait ismertetjük.

Keywords

material testing,
evaluation,
simulation,
digital twin

Abstract

The purpose of Structural Integrity Calculations for Large-Scale Pressure Systems is to predict the safety limits of technological equipment, operating mainly in the energy and heavy chemical industries, within the expected accuracy. Modern Continuum Thermomechanics appears to be a promising theoretical framework for a modern methodology of Structural Integrity Calculations, but its potential is still difficult to realize in industrial applications. One key reason for this is that constitutive model parameters used in theory can be estimated with high uncertainty, if they are derived from material tests using conventional evaluation methods available in the relevant material testing standards, especially when deformations are higher. Research has therefore been initiated to develop a material testing and evaluation procedure that meets the requirements of the Structural Integrity Calculations methodology under development. In this paper, the basics of a generalized and innovative methodology for destructive material testing and evaluation are presented.

1. Bevezetés

Ezen lapszám előző tanulmányában [1] nagyméretű nyomástartó rendszerek *Szerkezetintegritási Számítási módszertanának* időszerű kérdéseivel foglalkoztunk. Nagyméretű nyomástartó rendszerek működnek mindegyikük a villamosenergia iparban, a nehéziparban, részét képezik a kulcsfontosságú energiaellátó rendszereknek, hogy csak néhány példát említsünk. A nagyméretű nyomástartó rendszereket már hosszú évtizedek óta korlátozott élettartamra tervezik. Azt az élettartamot, amelyet a rendszer – a tervező szándéka szerint – „a várható üzemi körülmények között elér” [2], nevezik *tervezési élettartamnak*, és értékét, a várható üzemi körülményekkel együtt, a tervezési specifikáció rögzíti. A tervek kidolgozása folyamán a konstruktőrök tervezési biztonsági számításokkal becsülik meg a megvalósítandó rendszer *várható élettartamát*. Amennyiben a *Tervezési Biztonsági Számítások* igazolják, hogy a rendszer *várható élettartama* hosszabb, mint a *tervezési élettartam*, akkor a rendszert az üzembehelyezéstől a tervezési élettartam végéig biztonságosan üzemeltethetőnek ítélik. Az üzemeltetés idején *Szerkezetintegritási Számításokkal* tesznek előrejelzéseket a nyomástartó rendszer *műszakilag megengedhető üzemidejére*, azaz, hogy mennyi a rendszer *várható élettartama* a megvalósult terheléstörténet és a prognosztizált várható üzemi körülmények adatai alapján. A *Tervezési Biztonsági Számításokat* az adott iparág nemzetközileg vagy helyileg elfogadott tervezési szabványainak és ajánlásainak betartásával készítik el – pl. atomerőművek esetén az ASME [3], az RCCM [4], a KTA [5], a VDI [6], a PNAE [7] vagy az RD EO [8] –. A *Szerkezetintegritási Számítások* során figyelembe veszik a rendszerek egyedi gyártásából és üzemeltetési körülményeiből eredő különbségeket – azaz a szerkezeti anyagaik rendszerspecifikus

termomechanikai és öregedési jellemzőit –, valamint a kifejezetten az üzemelő rendszerek biztonsági elemzéseikhez kidolgozott ajánlásokat, mint pl. az IAEA PTS Guideline [9], a nemzetközi jó gyakorlatot összefoglaló IAEA TECDOC-1627 [10] vagy a VERLIFE útmutató [11], azonban azt kell megállapítanunk, hogy módszertani szempontból ma a *Szerkezetintegritási Számítások* inkább tekinthetők az adott rendszer egyedi jellemzőihez szabott *Tervezési Biztonsági Számításoknak*, mint a rendszerben zajló fizikai folyamatok mélyebb megértésén alapuló, a szabványok követelményein túlmutató elemzéseknek. Mindezek mellett a nukleáris iparban a klasszikus, túlnyomórészt szabványokon alapuló *Szerkezetintegritási Számításokkal* is meg lehetett alapozni a megfelelő atomerőművi blokkok tervezési élettartamon túli üzemeltetésének első szakaszát. Ezt nagyban segítette, hogy a legfontosabb berendezések anyagvizsgálati programjai során végzett öregítési programok eredményei azt mutatták, hogy a berendezéseknek az üzemidőhosszabbítás során várható öregedése még nem fogja elérni a szerkezeti anyagok öregítési programokban elért öregedési állapotát.

Manapság napirendre került az atomerőművi blokkok tervezési élettartamon túli üzemeltetési ideje további meghosszabbításának kérdése. Ebben az esetben már felmerülhetnek olyan kérdések, hogy tartalmaznak-e az eddig végrehajtott anyagvizsgálati programok annyi és olyan minőségű információt, amennyi alapján a hagyományos módszertanra épített *Szerkezetintegritási Számítások* eredményei ugyanolyan érvényesnek lesznek tekinthetők, mint eddig. A válasz ma még nem teljesen kiforrott, ugyanis a megcélzott üzemeltetési időn túlmutató időszakra is érvényes öregítési állapotokra sokkal kevesebb információ áll rendelkezésünkre, mint az ezt megelőző időszakban jellemző állapotokra. Ugyanakkor ismert, hogy a *Szerkezetintegritási Számítások* nemzetközi jó

gyakorlaton alapuló, korszerűnek mondott módszertana a szerkezeti anyagok viselkedését rendkívül egyszerű módon, a teherviselő kapacitásukat nagyon konzervatíván megítélő konstitutív modelleken alapul. Mindez azt jelenti, hogy időszerű lehet a *Szerkezetintegritási Számítások* módszertanát újragondolni.

Ezért kezdeményeztünk évekkel ezelőtt olyan kutatásokat az Energiatudományi Kutatóközpontban (EK), melyeknek célkitűzése a *Szerkezetintegritási Számítások* módszertanának korszerű alapokra helyezése, és ez alapján egy új *Szerkezetintegritási Számítási Módszertan* kifejlesztése. [1]-ben áttekintettük a problémakört és az új módszertan elméleti alapját. Az elméleti modell alapja a *Törésmechanika Nemlineáris Mezőelmélete*, egy, a modern kontinuum termodinamikában mélyen gyökerező törésmechanikai elmélet, amelyre célkitűzéseink szerint a jövőben a Szerkezetintegritási Számítási módszerek építhetők. Az elméleti modell sokkal átfogóbb, ezért komplexebb, mint azok a diszciplináris alapon fejlesztett klasszikus modellek, amelyekre a mérnöki gyakorlatban széleskörűen elterjedt számítási eljárások épülnek: egyfelől egyszerre több, egymással csatolt fizikai folyamatot követ, másfelől erős nemlinearitásokat is tartalmaz. Az elmélet alapján felépített új modellek validálása, majd a gyakorlati feladatok megoldására történő adaptálása ezért további kérdéseket vet fel, melyek megválaszolásához feltétlenül fontos átgondolni, hogy a vázolt elmélet termodinamikai elmélet, ezért a szerkezeti anyagok modellje sem szorítkozhat a pusztán mechanikai viselkedés leírására. Következésképpen a szükséges anyagtudományi mérések során a próbatestek termodinamikai válaszát kell megfigyelni. Az anyagvizsgálatok és kiértékelésük termodinamikai szellemben történő újragondolása ma még megoldásra váró feladat [12]. Ugyanakkor az elmélet termodinamikai megalapozásától függetlenül is nyilvánvaló, hogy ahhoz olyan mérési és mérési-kiértékelési metodológiák szükségesek, amelyek a hagyományos anyagvizsgálati eljárások esetén is megteremtik a kísérletek és az elmélet között a szükséges összhangot. A termodinamikai szemléletnek az anyagtudományi mérések módszertanába történő integrálása mindenekelőtt azt jelenti, hogy a mérések során egy próbatest viselkedéséről lényegesen több és jobb minőségű információt kell gyűjteni, mint amit a szakítóvizsgálatokra, pl. az ISO 6892-1 [13], ISO 6892-2 [14], ISO 6892-3 [15] és az ASTM E8/E8M-22 [16], vagy a törésmechanikai jellemzők mérésére vonatkozó ISO 12135 [17], ASTM E 399-22 [18], ASTM E 1820-23 [19] illetve az ASTM E 1921-22 [20] vizsgálati szabványok jelenleg előírják, beleértve azt a szempontot is, hogy ha az elméleti leírás egyszerre több fizikai mezőt is bevon a leírásba, akkor az anyag vizsgálata során a leírásba bevont mezők közül lehetőleg az összeset, vagy ha ez megvalósíthatatlan, akkor minél több megfigyelhető mezőt meg is kell figyelni. A megfigyelések során rögzített adatokat az elméleti modell követelményeinek megfelelően kell kiértékelni [21].

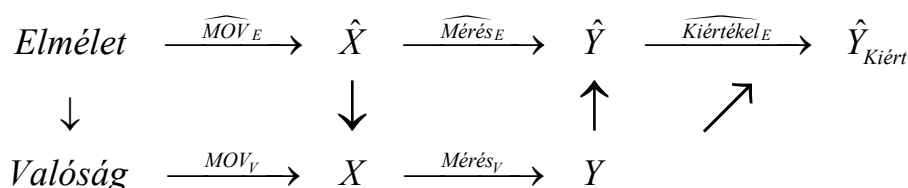
Tanulmányunk szerkezete a következő: a következő pontban dióhéjban ismertetjük az anyagtudományi mérések és kiértékelésük metrológiai alapú modelljét, ezt követően az anyagtudományi mérések és kiértékelésük fizikai alapú konceptuális modelljének alapjait mutatjuk be, a modellben kulcsszerepet játszó *Digitális Pár* koncepcióval együtt. A dolgozatot az összefoglalás és az irodalomjegyzék zárja.

2. Anyagtudományi mérések és kiértékelésük metrológiai alapú modellje

Absztrakt szinten, mintegy „madártávlatból” szemlélve a mérések kérdéskörét, egy mérésnek az a célja, hogy egy vizsgálatra kijelölt objektumról – a felvetett probléma megoldása szempontjából – releváns információt nyerjünk. A klasszikus méréselmélet a mérést olyan műveletnek fogja föl, amely az összes mérési eredményt tartalmazó halmazból kiválasztja az éppen aktuális értékeket [22]. Ha X a vizsgált objektum lehetséges állapotainak tere, Y az aktuális mérési eredmények tere, akkor a mérés (Mérés) egy $(X \xrightarrow{\text{Mérés}} Y)$ alakú leképezés. A (Mérés) leképezést a mérés absztrakt modelljének [23] nevezik, amelyben a mérés folyamatát klasszikus metrológiai alapállásból szemléljük és olyan input-output problémának tekintik, amelyben a folyamatot fekete doboznak vélik. Ezért ezt a modellt a mérés *fekete doboz* modelljének [24] nevezik. A modellel szemben felvethető, hogy nem kellően informatív. A következő szempontokra nem fordít ugyanis kellő figyelmet:

1. a mérések során speciális, a tanulmányozott objektum és a mérőeszköz közötti kölcsönhatás(ok) indukálta folyamatok zajlanak; ezek a folyamatok határozzák meg, hogy a mérés során mit, hogyan figyelnek meg;
2. a méréseket mindig elő kell készíteni;
3. a megfigyelések eredményei nem azonosak a mérések eredményeivel.

A szakirodalomból (is) ismert [25], hogy a vizsgálat(ok)nak alávetett mérési objektumok és módszerek típusait az a fizikai elmélet határozza meg, amelyben a vizsgálatra vonatkozó kérdést megfogalmazták; a mérést leíró fizikai modellt az elmélet keretében dolgozzák ki. A vizsgálatok elsődleges eredményeit ugyancsak az elmélet keretein belül értelmezik, majd az elmélet eszközeivel származtatják le az indirekt úton – csak számítással – meghatározható fizikai mennyiségeket. A mérés 1-3. szempontot is figyelembe vevő, az elméleti és a kísérleti aspektusát egyaránt szemléltető absztrakt modelljét (amit konceptuális modellnek vagy konceptuális sémának is nevezünk) az alábbi diagramon mutatjuk be (1. ábra).



1. ábra: Fizikai elmélet és a kísérlet konceptuális sémája

A diagramon *Elmélet* jelöli az elméleti fizikai keretrendszert, amely a *Valóság*-ban, azaz a külső világban zajló folyamatokat értelmezi, és amelyben a *Valóság*-ra vonatkozó kérdéseket felvethetjük és a válaszokat értelmezzük [24]. Az *Elmélet* és a *Valóság* közé „húzott” nyíl (*Elmélet* → *Valóság*) azt fejezi ki, hogy az elmélet határozza meg, milyen típusú *vizsgálatokra* van szükség a felvetett kérdések megválaszolásához, illetve a felvetődő problémák megoldásához. Az MOV_L -el jelölt nyílak ($L=E, V$) azt jelentik, hogy az adott típusú méréshez a megfelelően előkészített *Mérési Objektumot* (*MO*) kell *Választani* (innen az *MOV* rövidítés). Az *Elmélet*-ben MOV_E azt szimbolizálja, hogy a kiválasztott típusú mérési objektum elméleti modelljét meg kell alkotni; a *Valóság*-ban MOV_V azt jelenti, hogy az objektumot a mérésre elő kell készíteni. $\hat{X}$ és X a vizsgált objektum lehetséges állapotait, $\hat{Y}$ az aktuális mérési eredményeinek halmazát írja le az *Elmélet*-ben, Y pedig a *Valóság*-ban. Az $\hat{X} \longrightarrow X$ nyíl azt fejezi ki, hogy az elmélet megszorításokat tartalmaz az értelmezhető állapotok terére, azaz megszabja, hogy *Valóság*-ban a megfigyeléseket milyen körülmények között kell végrehajtani. A mérés folyamatát a *Valóság*-ban $Mérés_V$ írja le, míg az *Elmélet* rétegben $Mérés_E$. Az $\hat{Y} \longrightarrow Y$ nyíl azt az átalakítást jelöli, melynek során a mérés primer eredményeit az elméletben megkívánt alakba transzformálják. Az *Elmélet*-ben a $Kiértékel_E: \hat{Y} \longrightarrow \hat{Y}_{Kiért}$ leképezés az indirekt úton meghatározható fizikai mennyiségek kiértékelésének folyamatát írja le. A diagram kifejezi az alábbi állításokat: (1) a mérést elméleti és gyakorlati előkészítő munkák előzik meg; (2) a mérés folyamatát elméleti modellen követjük; (3) az indirekt módszerekkel meghatározható fizikai mennyiségeket az elmélet segítségével határozzák meg.

Az általános megfontolások után az anyagvizsgálatokra térve: a vonatkozó szabványok – pl. az ISO 6892-1 [13], ISO 6892-2 [14], ISO 6892-3 [15] és az ASTM E8/E8M-22 [16], vagy a törésmechanikai jellemzők mérésére vonatkozó ISO 12135 [17], ASTM E 399-22 [18], ASTM E 1820-23 [19] illetve az ASTM E 1921-22 [20] – alapján elég világosan kirajzolódik, hogy azok a mérésekről és a kiértékelési eljárásokról igen egyszerű képet festenek. A próbatest modellje legtöbbször egy, vagy legfeljebb néhány elemből álló, nagyon egyszerű, diszkrét geometriai objektum, amely a névleges fő méreteivel pontosan jellemezhető. Amennyiben egy próbatest geometriai méretei a mérés előtt a rá vonatkozó szabvány előírásai szerinti méret-tűrés mezőn belül vannak, akkor a végrehajtandó mérés ebből a szempontból kielégíti a követelményeket. Ha a – megfelelő eszközön végrehajtott – vizsgálat sikeresnek tekinthető, akkor a mérés során megfigyelt és rögzített mennyiségek alapján a mérés értékelhető. A mérés kiértékelését a szabvány adta modellen, az ott rögzített szabályokat követve végzik.

A mérésekről és kiértékelési eljárásairól elének tárt meglehetősen egyszerű kép a szabványok megalkotása korának „tudományos-mérnöki világképében” természetesebbek voltak, ám a szövegek az ezeket megindokoló megfontolásokat nem tartalmazzák. Ezen oknál fogva

az indoklásokra rejtett (hallgatólagos vagy tacit – a latin *tacitus* = csendes, észrevétlen, hallgatag melléknévből) tudásként gondolhatunk. Mára a „tudományos-mérnöki világkép” jelentősen megváltozott, és az évtizedekkel ezelőtti rejtett tudás sokak számára nem magától értetődő, talán ismeretlen. Ezért a szabványoknak a mérésekről alkotott – mai szemmel nézve túlzottan egyszerűsítőnek tűnő – felfogásához az alábbi megfontolásokat ajánljuk a tisztelt olvasó figyelmébe: (1) a szabványok kidolgozása idején a tudományos és a mérnöki szakmai közösségek számítási kapacitásai olyan korlátozottak voltak, hogy az egy, vagy legfeljebb néhány pontból vagy egyszerű elemből álló modellek dinamikai vagy peremérték problémáinak megoldása is jelentős emberi erőforrást és hosszú időt vett igénybe; (2) a tűrésmezőre vonatkozó követelmények azokon a megfigyeléseken alapultak, hogy amennyiben a próbatestek geometriájának a névleges méretektől megfigyelt eltérései a szabvány megengedte bizonytalansági sávon belül vannak, akkor a mérés során, egy bizonyos kritikus terhelési határig, a próbatestek reakcióinak eltérései is korlátozott bizonytalansági sávon belül maradnak; (3) a mérések – ilyen egyszerű modellek segítségével kiértékelt – eredményeit felhasználó méretezési és biztonsági számítások alapján megvalósított mérnöki alkotások az esetek túlnyomó többségében használhatónak bizonyultak. Még az atomerőművek – Bevezetésben említett – tervezési élettartamon túli üzemeltetése első szakaszának biztonságos megvalósíthatóságát igazoló *Szerkezetintegritási Számításokat* is az említett anyagvizsgálati szabványok szerint végrehajtott vizsgálatok támogatták.

Napjainkra azonban a helyzet némileg megváltozott. Az atomenergetikában intenzív kutatások folynak az arra alkalmasnak látszó erőművi blokkok tervezési élettartamon túli üzemeltetése második szakaszának megvalósítása feltételeinek igazolására. Mára a szerkezeti anyagok lényegesen jobban megöregedtek, mint az előző üzemidő-hosszabbítási programok idején voltak, és a szerkezeti anyagok öregedési trendjeinek távolabbi jövőre vonatkozó értékeit kevesebb rendelkezésre álló anyagmintából kell meghatározni. Ezért az anyagvizsgálatokhoz egyre kisebb méretű próbatesteket fognak használni; a vizsgálati technológia egyre nagyobb teret hódít a nukleáris ipari és a fúziós kutatásokban [26]. A miniatürizált próbatesteken végzett mérések olyan problémákat is felszínre hoznak, amelyek eddig nem igényeltek különös figyelmet és megfontolásokat, pl. hogy sokkal érzékenyebbé válnak a gyártási mérettűrésekre, illetve általánosabban, a próbatest tényleges alakjára, mint a [13-20] vizsgálati szabványok előírásainak megfelelő méretű próbatestek. Ezek a kérdések felvetik a mai szabványokon túli módszerek fejlesztésének és használatbavételének kérdését. A cikk hátralevő részében az anyagtudományi mérések végrehajtására és kiértékelésére fejlesztett olyan módszertan alapjait mutatjuk be, ami túlmutat a jelenlegi szabványokban alkalmazott módszertan keretein, ám azokat speciális esetként tartalmazza.

3. Anyagtudományi mérések és kiértékelésük fizikai alapú modellje

3.1 Általános megfontolások

Amint említettük, a *Szerkezetintegritási Számítások* új módszertana a modern *Termomechanikára* épül [1]. Ennek következtében a vizsgált rendszerek termomechanikai állapotának változásait sokkal finomabban, részletgazdagabban lehet követni az elméleti számításokkal, mint a klasszikus mérnöki modellekkel, mert megnyílt a lehetőség az egyszerre több, egymással csatolt fizikai folyamatot leíró, multifizikai modellek kidolgozására, valamint a testben rövidebb hosszskálaon zajló folyamatok makroszkopikus hatásainak fenomenológiai modellezésére. A részletgazdag elméleti modell nagy mennyiségű információt képes szolgáltatni a rendszer viselkedéséről. Ahhoz, hogy a nagy mennyiségű információ jó minőségű is legyen, az elméleti modell működtetéséhez a szükséges mennyiségű és minőségű információt anyagvizsgálatokkal meg kell szerezni, amelyeket aztán az elméleti modell igényeinek megfelelő formában kell kiértékelni, vagy a kiértékelés eredményeit kell az elméleti modell igényeinek megfelelő formába transzformálni. Ezért a koncepcióban a méréstől elválaszthatatlannak tekintjük az információ megszerzését, feldolgozását és transzformációját. Az ötlet tulajdonképpen nem teljesen új, mert az utóbbi évtizedekben a tudományos vagy mérnöki problémák megoldása során egyre fontosabb szempont, hogy egy adott rendszerről, milyen mennyiségű és minőségű információból kiindulva, milyen mennyiségű és minőségű információt vagyunk képesek valamilyen, elméleti és/vagy kísérleti, módszerrel előállítani.

Ma már furcsának tűnik, hogy a fizikában az információ és az információ áramlásának problémakörével a 20. század közepéig igen kevesen foglalkoztak. Ennek egyik, nem elhanyagolható oka az lehet, hogy az elméleti fizika addig túlnyomórészt zárt rendszerek tanulmányozásával foglalkozott. Az elméleti fizika és az információ-elmélet általános, egységes keretbe foglalásához az atomfizikus Szilárd Leó [27], Gábor Dénes – a „holográfia atyja” [28] – és Léon Brillouin [29] olyan alapvető munkákkal járultak hozzá, amelyek alapját képezik mai kutatásoknak is. Brillouin vezette be az információelméletet a fizikába, és mutatta ki, hogy az információ és az entrópia szorosan összefüggő fogalmak, mintegy „irányt szabva” ezzel a termodinamika információelméleti irányzatának is.

Az információelméleti szempont bevezetése a mérések elméletébe az utóbbi egy-két évtizedben kezdődött meg – ld. pl. [30-32] –. A méréselmélet tudományos és mérnöki diszciplínának átívelő elméletének mai állásáról ad igen jó áttekintést L. Mari, M. Wilson és A. Maul monográfiája [24]. A mérések elméleti alapjainak kutatása napjainkban azért is különösen időszerű, mert a mai intelligens rendszerek viselkedése mérések garmadáján, az azokból származó információk feldolgozásán, továbbá a vezérlőrendszer ezen információkon alapuló utasításait végrehajtó beavatkozórendszer működésén múlik. Így a mérések elmélete szorosan összefonódik a vezérlések

és szabályozások általános elméletével, a *Kibernetikával*, amely nélkül a mai *KiberFizikai Rendszerek (KFR)* nem léteznének.

A *Kibernetikát*, mint önálló tudományos területet Norbert Wiener 1948-ban kiadott *„Cybernetics: or control and communication in the animal and the machine”* című könyvében alapozta meg [33]. Mint minden tudományos kutatási területnek, a Kibernetikának is vannak az ókori görög nagy filozófusokra visszavezethető előzményei. A kibernetika szó az ógörög *ἁρετης κυβερνητικης* kifejezésből származik, amellyel a hajók *gyakorlott, magas éthoszú, felelősségteljes, jó kormányosait* jellemezték, kifejezve, hogy olyan, gyakorlott emberekről van szó, akik mesterségüket művészi fokon gyakorolják; a kifejezést metaforaként a városok, államok vezetőire is átvitték, és velük szemben, mint követelményt értelmezték [34]. A kifejezés Platónnál és Arisztotelésznél is több helyütt felbukkan; Arisztotelész inkább a *ῥυβερνητικη τέχνη* kifejezést használta előszeretettel, hangsúlyozva, hogy a *ῥέχνη* nem pusztá tudást vagy készséget, hanem teleológiai, célorientált tevékenységet jelent [34]. Az újkori, természettudósok által publikált irodalomban Ampèrenek 1834-ben írt – *„Essai sur la philosophie des sciences; Exposition analytique d'une classification naturelle de toutes les connaissances humaines”* című – esszéjének [35] politikáról szóló fejezetében, a kormányzásról írt szócikk címében bukkan fel a *‘cybernetique’* kifejezés. A szó etimológiáját így foglalja össze: a kibernetika *„a kormányzás, az irányítás egészen általános értelemben vett művészete/tudománya”* – ld. [35] 141. –. Bár erre írásos utalással/bizonyítékkal nem rendelkezünk, az a tény, hogy Ampère ugyanabban a kontextusban, szinte pontosan abban az értelmezésben használja a *‘cybernetique’* kifejezést, mint Platon vagy Arisztotelész, megengedi annak legalább a feltételezését, hogy valamilyen forrásból ismerte a nagy görög gondolkodók műveit.

Az 1950-es évektől kezdve az angolszász dominanciájú nyugati fejlesztési irányzatban a Kibernetikától fokozatosan önállósodott az *Információ-Tudomány* és az *Információ-Technológia (IT)*, amely megteremtette a mai nagysebességű informatikai rendszerek alapjait. Ugyanakkor az orosz (a 20. század közepén szovjet) iskola értelmezése szerint a Kibernetika – mint tudomány – tárgya mindenféle olyan rendszer, amely irányítási célokra történő felhasználás céljából képes információt fogadni, tárolni és feldolgozni (beleértve az információ transzformációját is) [36].

Az orosz Kibernetikai Iskola képviselője, Alexander Fradkov dolgozta ki a Kibernetika és a Fizika alapelveinek egyesítéséből lezármaztatott Kibernetikai Fizikát. A Kibernetikai Fizika első, átfogó jellegű ismertetése [37]-ben és [38]-ban található. Fradkov azt mondta ki, hogy az irányítás és a kommunikáció nemcsak az élővilág és az ember alkotta mérnöki szerkezetek jellegzetessége, hanem – a kibernetika kifejezést az eredeti görög *ῥυβερνητικη* szó etimológiája, azaz *vezetés, irányítás, kormányzás*, szerint értelmezve – a természeti folyamatok irányításának, kormányzásának nagyon általános elve. A Kibernetikai Fizika (Cybernetical Physics) megnevezést, és a tudományág meghatározását [39]-ben és [40]-ben

használta, mint a fizika és a kibernetika határterületén kiépülő, olyan interdiszciplináris tudományágat, amelynek célkitűzése tetszőleges fizikai rendszer lineáris, nemlineáris, optimális és adaptív irányítása, a paraméterek azonosítására, szűrésére és becslésére, továbbá a rendszerek optimalizálására vonatkozó feladatok megoldása; [41]-ben válogatott példákon mutatja be, hogy az irányítási, vezérlési és a stabilitási kérdések a Fizika minden ágában felvetődnek, ha a kérdést úgy teszük fel. A kérdés feltevésének módját a megfelelő elméleti rendszermodell tartalmazza. A Kibernetikai Fizikában a rendszermodelleket úgy építik fel, hogy azok a vezérlési és irányítási célú csatolásokat is tartalmazzák. A kibernetikai elvek, módszerek és a modern termodinamika kapcsolata különösen fontos, hiszen a termodinamika és az információelmélet kapcsolata évtizedek óta ismert – ld. pl. [29] és [42] –. A Kibernetikai Fizika alapelveinek és módszereinek az egyensúlytól távoli rendszerek termodinamikájában történő alkalmazásáról részletes ismertetés található [43]-ban.

A Kibernetikai Fizikára vonatkozó eddigi fejtegetések célja az volt, hogy bemutassuk azt a háttér-elméletet, amely a fizikai rendszerek – ezen belül kiemelten a termodinamikai rendszerek – viselkedésének olyan leírását teszi lehetővé, amelybe a rendszer irányításának, vezérlésének leírása is beletartozik. Korábban már bemutattuk [1], hogy a *Szerkezetintegritási Számítások* új módszertana a modern *Termomechanikára* épül, amely a számításokkal leírni kívánt rendszereket nemegyensúlyi termodinamikai rendszernek tekinti. Az elmélet meghatározza a számításokhoz szükséges anyagtörvényeket, amelyeknek paramétereit az elmélet igényeinek megfelelően felépített és végrehajtott anyagvizsgálati eljárásokkal kell meghatározni. Ez azt jelenti, hogy az anyagvizsgálatokat a modern termodinamika keretein belül kell értelmezni, megtervezni, végrehajtani és kiértékelni, ami ma még aktuális kutatási kérdések megválaszolását igényli [12]. A témakör részletesebb kifejtése nélkül is nagyon könnyen belátható, hogy a modern termodinamika szellemében felépített és elvégzett mérések megalapozásának igényei túllépnek a mai, fent említett anyagvizsgálati szabványok [13-20] – szerint elvégzett és kiértékelte mérések adta kereteken. A modern termodinamika elvei és formalizmusa alapján felépített számítási keretrendszer ugyanis még abban az esetben is sokkal több információt igényel egy anyagvizsgálati méréstől, ha azt alapjaiban egy ma érvényes anyagvizsgálati szabvány szabályai szerint építették föl. Az ilyen és hasonló problémák megoldása során nyújt felbecsülhetetlen értékű segítséget, ha megfelelő háttér-elmélet áll rendelkezésünkre az általánosított probléma értelmezéséhez és megoldásához. Egy ilyen keret-elmélet a Kibernetikai Fizika, bár ezt az elméletet az angolszász világban manapság kevesen ismerik.

3.2 A Digitális Pár koncepció és az ahhoz vezető út

A Kiberfizikai rendszer

A *Kiberfizikai Rendszer (KFR)* ma széles körben használt fogalmát és értelmezését Helen Gill, a *US NSF* munkatársa vezette be 2006-ban. *KFR*-en olyan (mérnöki)

rendszereket ért, amelyek fizikai és számítás-intenzív tevékenységre alkalmas informatikai komponensek szorosán csatolt, szinergisztikus együttműködésén alapulnak [44]. Bár a *KFR*-ek alkalmazási területe 2006 óta rohamosan növekszik, definíciója lényegét tekintve nem változott [44]; ezt a definíciót széles körben átvette a mérnöki tudományos szakirodalom – pl. [45], [46] –. Nagyrészt erre a definícióra alapozva dolgozták ki az utóbbi évtizedben az intelligens üzemek (*Smart Factories*) [47], a *Kiberfizikai Gyártó Rendszerek (KFGYR, angolul: Cyber-Physical Production System, CPPS)* [48] és az *Ipar 4.0* [47] koncepció- és kutatási terveit. A *KFR* koncepcuális modellt használják többek között az intelligens energiarendszerek (*Smart Grids*), az intelligens városok (*Smart Cities*), az önvezető autók és az egészségügyi rendszerek fejlesztését tárgyaló stratégiai dokumentumokban [45] és [46]. A *KFR*-ek legfontosabb jellemzői a következők:

1. valósághű modelleken végrehajtott, számításintenzív szimulációkat használnak
 - a. azok tervezése során, valamint
 - b. a megépített és üzemelő rendszerek működésének előrejelzésére;
2. szabályozott, intelligens műszaki rendszerek [49];
3. vezérlésükben és szabályozásukban *IT* rendszereket alkalmaznak.

A *KFR* koncepció újszerűségét másfél évtizede nem az jelentette, hogy teljesen új építőkövekből alkották meg, hanem hogy ezeket az – egyébként már ismert, és a mérnöki tudományok diszciplínáiban használt – elemeket egységes rendszerbe szervezték. Találószerűen megállapítható [67], miszerint a *KFR* modell, illetve a modell alapján kifejlesztett *Ipar 4.0* alapjában véve „*Alter Wein in neuen Schläuchen*”, azaz „*új tömlőbe töltött régi bor*”. A *KFR* „*új tömlőjét*” a nagy műveleti- és adatátviteli sebességekre, továbbá korábban elképzelhetetlen mennyiségű adat/információ gyűjtésére, továbbítására, feldolgozására és tárolására képes *IT* technológiák és infrastruktúrák (felhők, *IoT* stb.) gyors terjedése biztosítja.

Amiért a *KFR* modellt a különböző szakterületeken ténykedő kutatók, fejlesztő, tervező és technológus mérnökök mégis inkább „*új tömlőbe töltött új bornak*” tekinthetik, abban áll, hogy a számítás-intenzív feladatok megoldására alkalmas informatikai eszközök és technológiák nagy tömegben, elérhető áron történő széleskörű elterjedése lehetővé tette, hogy a komplex rendszerek fejlesztése, tervezése és üzemeltetése során, azok működésének ellenőrzésére és előrejelzésére, valósághű – azaz részletgazdag, nagy szabadságfokú – modelleken, erőforrás-igényes szimulációkat lehessen alkalmazni. Egy fejlesztés vagy tervezés alatt álló rendszer esetén a feltételezett használat/üzemeltetése során várható viselkedését elemzik, míg egy működő rendszer esetén a szimuláció a rendszer tényleges üzemeltetéséből származó hatások vizsgálatára, valamint a további üzemeltetés során várható hatások következményeinek előrejelzésére szolgál. A mérnöki rendszerek viselkedésének szimulációi csak akkor lehetnek kellően megbízhatók, ha:

- az alkalmazott modellek olyan fizikai háttér-elméleten

alapulnak, amely a megértés mai szintjén áll, és abból kiindulva, azok a feladat céljának megfelelő, szükséges mértékben ellentmondásmentesen írják le az adott – tervezés, vagy éppen felülvizsgálat alatt álló – mérnöki rendszerben zajló fizikai folyamatokat;

- a számításokhoz rendelkezésre áll minden olyan adat, ami a számítások előírt pontossági követelményeknek megfelelő végrehajtásához, továbbá azok felülvizsgálatához szükséges és/vagy elégséges.

Többek között ezek a követelmények vezettek el a fizikai rendszer *Digitális Párja (DP)* fogalmának megjelenéséhez (az angol szakirodalomban a digitális párt '*Digital Twin*'-nek nevezik, ami tükörfordításban *digitális ikerpárt* jelent; azonban véleményünk szerint a valós rendszer és annak *DP*-ja között információtartalom szempontjából nincsen akkora hasonlóság, ami az iker megjelölést indokolná). Egy *mérnöki rendszer DP*-ja mindazon ismeretek (elméleti tudás, mérnöki tapasztalat, leíró modellek, valamint a modellek elemzésekhez szükséges paraméterei és egyéb adatai, a mérnöki rendszer környezetének modelljei, és minden egyéb szükséges kiegészítő információ stb.) rendszere a 'digitális térben', amely ahhoz szükséges, hogy:

- a fizikai rendszer mindenkor aktuális állapotáról kellően megbízható tudással rendelkezünk, továbbá;
- annak rövidebb, illetve hosszabb időtávon várható jövőbeli viselkedésére prediktív erejű előrejelzéseket tehessünk.

Tao, Zhang és Nee [50] szerint a mérnöki rendszerek fejlesztése, tervezése és üzemeltetése során a *DP* koncepció alkalmazása egy gyakorlatorientált megközelítés, melynek az a célja, hogy a *KFR* modell alapján konstruált rendszerek viselkedését minél rövidebb idő alatt, megbízhatóan és olcsón lehessen elemezni. A *DP* családba tartozik az ipari fejlesztőlaborokban egyre inkább használt *digitális prototípus* is.

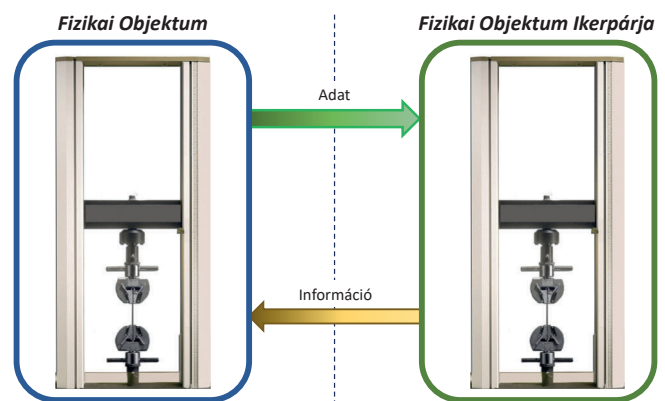
Az elmondottakat összegezve, a *KFR* modell a Kibernetika nyugati továbbfejlesztési szemléletén fogant – tudományosan és *IT* szempontból technológiailag is megalapozott –, praxisorientált konceptuális modell, melynek keretei között a fizikai valóság és a kibervilág szoros, zökkenőmentes együttműködése tudományos igényességgel megalapozható, illetve támogatható [50].

A Digitális Pár

Amint említettük, a *KFR* koncepció olyan tudományos-mérnöki koncepció, ami elsősorban a mérnöki technológiák fejlesztésének támogatására összpontosít, és mint ilyen, inkább kutatásokra orientált terület. A *DP* koncepció a fizikai valóság és a kibervilág (vagy információs világ) szoros, zökkenőmentes együttműködésének, „fűzőjának” megvalósítását megcélzó pragmatikus irányzat, melynek célja a gyakorlatorientált mérnöki megoldások támogatása [50]. A *DP* egy valóságos objektum megfelelő leképezésekkel konstruált párja a virtuális térben, amelyet azzal a céllal hoznak létre, hogy segítségével egy tervezés alatt álló, vagy működő mérnöki objektum adott célnak megfelelő kialakítását, illetve működésének ellenőrzését adekvát modelleken végzett vizsgálatokkal támogassák.

Egy műszaki alkotás *ikerpárja* vagy *replikája* – hiteles másolata, utánzata – nem új fogalom. A kutatás-fejlesztésen túlmenően, régóta széles körben használják képzési, továbbképzési célokra. Termékfejlesztési problémák megoldása során a sorozatgyártás előtti utolsó prototípusok a végleges termék fizikai ikerpárjainak tekinthetők. Az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. Karbantartó Gyakorló Központjában található reaktortartály, gőzfejlesztő berendezés stb. a blokkokban üzemelő nagyberendezések fizikai ikerpárjai, amelyeket a karbantartó személyzet kiképzési, illetve továbbképzési feladatainak begyakoroltatására használnak. Vagy egy sorozatban gyártott anyagvizsgáló berendezés fizikai ikerpárja az a példány is, amelyen a gyártóközpontban a szervízhálózat szakembereit képzik, illetve, amelyet a felhasználói hibabejelentések okainak elemzésére használnak – ld. a 2. ábrát –.

Az 1960-as 70-es évek Apollo holdraszállási programja során a hajózó személyzetet a NASA központban már szimulátor segítségével készítették föl az utazásra. Az űrhajósok az űrhajó belső terének és a vezérlő konzolának ikerpárján keresztül kommunikáltak a rendszerrel. Az űrhajó viselkedését komplex programok szimulálták. A szimulátorrendszer segítségével a személyzetet az üzemzavari és a baleseti helyzetekre is felkészítették. A szimulátoron szerzett előzetes tapasztalatokkal a hátuk mögött könnyebb volt a valódi üzemzavari helyzeteket uralni. Az Apollo 13 1970 áprilisi útja során a földi irányítóközpont mérnökei a szimulátor segítségével tudták a hajózószemélyzetet egy majdnem végzetessé vált meghibásodás szükséges mértékű elhárításához hozzásegíteni úgy, hogy az űrben utazó kabinból kapott információk alapján a szimulátorral rekonstruálták a hibát, azonosították a lehetséges okát és kidolgozták az adott körülmények között alkalmazható megoldás(oka)t. Ma az Apollo szimulátort az (egyik) első *DP*-nak tekintik [51].



2. ábra: Egy anyagvizsgáló berendezés és annak fizikai ikerpárja

A *DP* koncepció alapjai 2002-ben Michael Grieves-nek a Michigan Egyetem Product Lifecycle Model (*PLM*, a termék életciklus-modellje) Center alapításakor tartott előadása PowerPoint prezentációjában jelentek meg [52]. A koncepció akkor a '*Conceptual Ideal for PLM*' nevet kapta. A *PLM* modellt az 1980-as évek első felében az autóiparban dolgozták ki. Azóta egyre elterjedtebben használják az ipar más területén is. A *PLM*-et azon praktikus igények

kielégítésére dolgozták ki, hogy segítségével menedzselni lehessen a mérnöki alkotások, termékek fejlesztése, gyártása, üzemeltetése és leszerelése során felmerült mindenféle kérdést, problémát. Grieves a *PLM* koncepciót úgy értelmezte, hogy a virtuális és a fizikailag megvalósított rendszer a teljes életciklus folyamán szorosan összekapcsolódik. A *DP* koncepció neve [53]-ban '*Mirrored Spaces Model*', [54] és [55]-ben '*Information Mirroring Model*', ám utóbbiban megjelenik a '*Digital Twin*' megjelölés is. Grieves 2012 óta megjelent publikációiban már kizárólag a '*Digital Twin*' megnevezést használja – pl. [56-59] –. A *DP* fogalma a *PLM* infrastruktúráján fejlődött ki. Egy termék életének követése és menedzselése az 1980-as évek közepére vált megvalósíthatóvá, amikor a megfelelő információgyűjtő, -feldolgozó és -tároló infrastruktúra már működőképes és elérhető volt. A *DP* koncepció kialakulásához az információtechnológia további fejlődésére volt szükség. A *DP* koncepció kialakulása folyamatosan visszahat a *PLM* koncepció fejlődésére. Fokozódik a realisztikusabb modellek iránti igény [60], amit a *DP* következő generációs modelljeiben már elvárásként fogalmaznak meg. Az Ipar 4.0, illetve a következő generációs Ipar-modell támogatása [61], valamint a *DP* és a *PLM* fogalmának kapcsolata [62] még mindig aktuális kutatási terület. A *DP* fogalmára [63]-ban 'holisztikus definíciót' javasolnak. Grieves a legutóbbi időben megjelent publikációjában áttekintette a *DP* eddigi történetét, és a koncepció egészségügybe történő kiterjesztésének lehetőségét vázolja [64].

A *DP* koncepció lényegéhez tartozik, hogy a Fizikai Objektum (FO) és annak *DP*-ja, a Virtuális Objektum (VO) között zárt hurkot képező információs Csatolás (Csat) létezzon. Az információs csatoláson keresztül gyűjtjük be a FO-ról a megfelelő adatokat (Adat), amelyeket a virtuális térben a *DP* segítségével feldolgozunk, elemzünk, értékelünk, majd az értékelés eredményeként előállított információt (Info) visszacsatoljuk a fizikai objektumra. Ezt a koncepciót a szakirodalomban a *DP* háromdimenziós modelljének nevezik [50]. Szakítóvizsgálat háromdimenziós *DP* modelljét mutatjuk be a 3. ábrán.

Amint fent már említettük, a *DP* létrehozásának az a célja, hogy fizikai objektumok adott célnak megfelelő kialakítását, vagy működésének ellenőrzését adekvát modelleken végzett vizsgálatokkal támogatni lehessen. A *DP* kiváló konceptuális környezet arra, hogy komplex fizikai

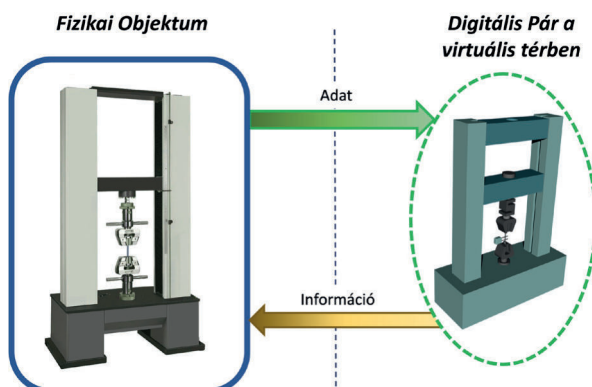
objektumok (pl. komplex technológiai rendszerek) viselkedésének tanulmányozására platformként használjuk. A *DP* által nyújtott információk mennyisége és minősége attól függ, hogy a VO milyen felbontású és komplexitású fizikai modellt tartalmaz. Az utóbbi években több publikációban foglalkoztak azzal a kérdéssel, hogy a *DP*-ban implementált modelleket a mérnöki közelítésekkel finomabb, olyan „valódi fizikai modellekre” érdemes alapozni, amelyek egy rendszernek akár több fizikai mezőt leíró, többskalás modelljei lehetnek [65, 66].

Az anyagvizsgálati mérésekre rátérve, az elmondottak alapján a következő konklúzióra juthatunk. A *Szerkezetintegritási Számítások* [1]-ben tárgyalt módszertana komplex fizikai modellen alapul. A módszertanra alapozott alkalmazásokhoz a szabványosnál finomabb mérésekre és olyan mérés-kiértékelési eljárásokra lesz szükség, amelynek alapja a módszertanban vázolt elmélet. Ennek megvalósítására egy olyan Digitális Pár platform tűnik a legalkalmasabbnak, amelybe a *Szerkezetintegritási Számítások* módszertanának elméletét implementálták.

3.3 Az anyagtudományi mérések és kiértékelésük fizikai alapú konceptuális modellje

A *Szerkezetintegritási Számítások* módszertanának részletgazdagabb, komplexebb elméleti modelljei a kísérletektől is részletekben gazdagabb információ-tömeget igényelnek, hogy az elméletet validálni, majd a szükséges és elégséges validáció birtokában prediktív célú számításokra alkalmazni is lehessen. Ezért az *elmélet és a mérések viszonyát* is tárgyaló – az 1. ábrán bemutatott – konceptuális modellt átalakítottuk. Az átalakítás célja az, hogy az új konceptuális modell foglalja össze, és ábrázolja mindazokat a releváns szempontokat és tennivalókat, amelyek minden mérési feladatban közősek. A konceptuális modell kidolgozása során figyelembe vettük, hogy: (1) a mérés sokkal összetettebb folyamat, mint ahogy azt a metrológiai alapú modell reprezentálja; (2) a mérés konceptuális modelljét sokkal könnyebb átlátni, ha azt a belső szerkezetet is láttatni engedő, „átlátszó doboz” modell (az angol „white box” kifejezés tükörfordítását nem tartjuk szerencsésnek) szellemében, a szükséges mértékben részletezzük [24].

A modellben a Mérést a mérés előkészítése (*Előkészítés*), a mérés végrehajtása (*Mérés*) és a mérés nyers eredményeinek értékelése (*Feldolgozás*) fázisokra osztottuk. Ezért a mérés metrológiai modelljében alkalmazott ($X \xrightarrow{\text{Mérés}} Y$) szimbolikus leképezést az ugyancsak szimbolikus ($X \xrightarrow{\text{Előkészítés}} MO_{\text{Kezd}} \xrightarrow{\text{Mérés}} MO_{\text{Vég}} \xrightarrow{\text{Feldolgozás}} Y$) összetett leképezéssel helyettesítettük. A modell ilyen formában történő ábrázolását azok a tapasztalatok indokolják, hogy még a megfelelő szabványok előírásainak szigorú betartásával végrehajtott mérések eredményeit is érzékenyen befolyásolhatják olyan tényezők, amelyek a mérés előkészítése, végrehajtása és nyers eredményeinek a feldolgozása során felléphetnek, ám ezeket a metrológiai modell elrejtje a „külső megfigyelők” elől. Különösen igaz ez a mérések információszerzéssel és információfeldolgozással, valamint az információk transzformációjával



3. ábra: Egy fizikai objektum (anyagvizsgáló gép a próbatesttel) és Digitális Párjának kapcsolata

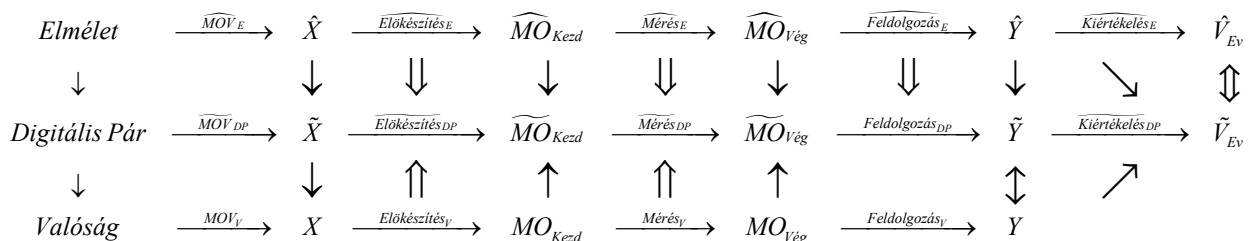
kapcsolatos aspektusára.

A konceptuális modell megalkotásához támaszkodtunk Urbanski és Samsonowicz publikációira – [67], [68] – is, és azokat az anyagvizsgálatok speciális környezetéhez szabtuk. Így az anyagvizsgálatok – a *Szerkezetintegritási Számítások* módszertanának igényeihez igazított – koncepciója a következők megfontolásából indul ki:

1. A roncsolásos anyagvizsgálatok speciális körülmények között 'lejátszott' fizikai folyamatok, amelyek a *mérőkészülék* – valamilyen anyagvizsgáló berendezés – és a vizsgált *mintadarab* mérés során indukált kölcsönhatásaiból származnak. A mérés során a megfigyeléseket megfelelő *szenzorok* végzik. A megfigyelésekhez olyan jellegű és annyi szenzort alkalmazunk, amennyi képes a kiértékeléshez elégséges, ésszerű mennyiségű, értékelhető információt szolgáltatni, valamint technikailag elérhető (ezen a szinten egyszerűen szenzornak tekintjük pl. a nyúlásmérőt és az optikai kamerát is).
2. A mérési elrendezést a megfigyelni kívánt fizikai folyamatok elméleti modellje alapján úgy tervezzük meg, hogy azok a kiértékeléshez elégséges, ésszerű mennyiségű, értékelhető információt szolgáltatassanak, és az adott vizsgálati program keretei között megvalósíthatók legyenek. A tervek kimunkálása során kiemelt figyelmet fordítunk olyan információk gyűjtési eljárásainak kidolgozására és az ezekhez szükséges, szenzorokon alapuló infrastruktúra terveinek kidolgozására, amelyek a mérés során lehetővé teszik a próbatestre jellemző mintázatok időbeli fejlődésének követését. A tervezés során számolunk azzal a ténnyel, hogy a mintadarabok előkészítésének folyamata, illetve annak eredményei a mérés során indukált fizikai folyamatokat, ezen keresztül pedig a mérések eredményeit is érdemben befolyásolhatják. A mintadarabok előkészítése a mérési folyamat elválaszthatatlan része. A tervek tartalmazzák a mintadarab előkészítése során végzett megfigyeléseket, melynek során a későbbi kiértékeléshez elégséges, ésszerű mennyiségű információt megszerezünk.
3. A tervek alapján implementáljuk a mérési elrendezést.
4. A mérés során vizsgálatnak alávetett és megfigyelt mintadarabok – *MO*-k – előkészítése során minden darab gyártását a terv szerinti eljárással figyeljük meg; így a későbbi kiértékeléshez elégséges, ésszerű mennyiségű információ áll rendelkezésre a próbatestnek

a mérés megindítása pillanatában érvényes, kezdeti állapotáról.

5. Amérési elrendezésen minden *MO* vizsgálatát elvégezzük. Egy mérés során végig követjük azt a folyamatot, amelyen keresztül a mintadarab a kezdeti állapottól a végső állapotig eljut. A folyamatot a *mérőrendszer* vezérlő- és adatgyűjtő rendszere képességeinek megfelelő – vezérlési és jelvételezési – időskála választásával idődiszkrété tesszük, az idő $\Delta\tau$ kvantálásával. A mérőrendszer a folyamat során a megfelelő kontrolljelek alapján terheli a mintadarabot, melynek állapotát a megfelelő szenzorokon keresztül, $\Delta\tau$ időpontként regisztráljuk. A szinkronizált információhalmazt rögzítjük/archiváljuk. Egy mérés „nyers eredményeit” a szenzorok jeleinek a – megfelelő transzformációkkal – további értékelésre alkalmas formába alakított eredményei jelentik. A nyers eredményeknél feltételezzük, hogy a rendszer megfelelően kalibrált. A mérőkészülék jeltranszformációs rendszere a nyers eredmények egy részét valós időben szolgáltatja, míg másik részét utófeldolgozás formájában, offline módban értékeljük ki.
6. Egy *MO* mérésének *eredményeit* a „nyers” eredmények alapján, a mérőrendszer adekvát modelljén, a mintadarab adekvát pontosságú 3D geometriai modelljére és a megfigyeléssel követett *folyamatok elméleti fizikai modelljére épített szimulációkkal* állítjuk elő. A „nyers” eredmények egyik része, a mérőrendszer viselkedését szabályozó vezérlő paraméterek, a szimulációkhoz szükséges időfüggő bemenetet szolgáltatják. A másik rész – a szimulációkkal meghatározott és a megfigyelt eredmények összehasonlításán keresztül – az elméleti modell és paramétereinek verifikálására szolgál. Az elméleti modell – a paramétereivel együtt – akkor tekinthető verifikáltnak, ha az elemzések és a mérés eredményeit összevetve, azok egy megfelelően megválasztott kritérium szerint „*megfelelően illeszkednek*”. Minden próbatest mérését a *DP*-n végzett szimulációk segítségével értékelünk ki.
7. Egy mérés *kiértékelt eredményeinek* azok az eredmények tekinthetők, amelyek a szimulációkkal meghatározott eredmények halmazából a legjobban illeszkednek a mérések nyers eredményeihez, vagy a mérések nyers eredményeihez legjobban illeszkedő szimulációk eredményeiből lettek leszármaztatva.
8. Egy mérési sorozat akkor tekinthető kiértékeltnek, ha



ahol

$$Mérés_V : \{ Mérés_V(\tau_i, \tau_{i+1}) : MO(\tau_i) \xrightarrow{Külső\ Teher(\tau_i, \tau_{i+1})} MO(\tau_{i+1}) \longrightarrow \dot{Érték}_{Prim}(\tau_{i+1}) | \tau_{i+1} : \tau_i + \Delta\tau, i : Kezd \dots Vég \}$$

4. ábra: A fizikai elmélet, a mérések és a Digitális Pár konceptuális sémája

a DP-n végzett szimulációk segítségével a sorozat minden egyes mérését egyenként kiértékeltek és az egyes mérések kiértékelte eredményeinek halmazát adekvát statisztikai módszerekkel tovább értékelték.

Az új konceptuális modell diagramját a 4. ábrán mutatjuk be.

A diagramon az *Elmélet* azt az elméleti fizikai keretrendszert fejezi ki, amely meghatározza, hogy mely fizikai mennyiségre vagyunk kíváncsiak; az *Elmélet* a mérések előkészítésének, végrehajtásának és az eredmények értelmezésének módszertanát egyaránt megalapozza. A *Valóság* reprezentálja a külső világot, ahol a folyamatok valójában zajlanak; a *Digitális Pár* a mérések DP-ját szimbolizálja. *Digitális Pár* az *Elmélet* és a *Valóság* közötti rétegben helyezkedik el, mert az *Elmélet* rétegben kidolgozott elmélet konkrét mérési esetekre vonatkozó megoldásait a *Digitális Párban* implementált geometriai modelleken, numerikus eljárásokra alapozott szimulációkkal állítjuk elő. Az *Elmélet* $\rightarrow$ *Digitális Pár* $\rightarrow$ *Valóság* leképezés-láncolat azt fejezi ki, hogy az *anyagvizsgálatok* típusát az *elmélet* határozza meg, ám a konkrét esetek elméleti vizsgálatát – pl. egy MO geometriájának fejlesztését – a *Digitális Pár* rétegben végzett elemzések segítségével végezzük el. Az MOV_L -el ($L=T, DT, R$) jelölt nyilak azt szimbolizálják, hogy az adott típusú méréshez a megfelelő típusú MO-t kell megválasztani. Az *Elmélet*-ben MOV_E azt szimbolizálja, hogy az adott típusú mérési objektum elméleti modelljét meg kell alkotni; MOV_V a *Valóság* térben azt jelenti, hogy az objektumot a mérésre elő kell készíteni; MOV_{DP} a *Digitális Párban* azt jelenti, hogy az objektum elemzésekre alkalmas informatikai modelljét ki kell dolgozni. $\hat{X}$, $\tilde{X}$ és X a vizsgált objektum lehetséges állapotainak, $\hat{Y}$, $\tilde{Y}$ és Y pedig az aktuális mérési eredményeinek halmazát írja le az *Elmélet*, a *Digitális Pár*, illetve a *Valóság* rétegben. Az $\hat{X} \rightarrow \tilde{X} \rightarrow X$ lánc azt fejezi ki, hogy az elmélet ($\hat{X}$) szabja meg, hogy a *Valóságban* (X) a megfigyeléseket milyen körülmények között kell végrehajtani; a körülmények részleteit a *Digitális Pár* segítségével ($\tilde{X}$)-ben dolgozzuk ki. Az egyes mintadarabok mérésre történő előkészítését az *Előkészítés*: $X \rightarrow MO_{Kezd}$ leképezések írják le: az *Elméletben* $\overline{Előkészítés}_E: \hat{X} \rightarrow \overline{MO}_{Kezd}$ azt jelenti, hogy a mintadarab előkészítését elméleti megfontolások használatával meg kell tervezni; az elméleti megfontolásokat a *Digitális Párban* implementálni kell, ahol a folyamatot $\overline{Előkészítés}_{DP}: \tilde{X} \rightarrow \overline{MO}_{Kezd}$ írja le; a *Valóság* rétegben megvalósított előkészítést $\overline{Előkészítés}_V: X \rightarrow MO_{Kezd}$ szimbolizálja. Az $\overline{Előkészítés}_E \Rightarrow \overline{Előkészítés}_{DP}$ nyíl azt reprezentálja, hogy az *Elméletben* meghatározott előkészítési procedúrát a *Digitális Párban* adekvátan kell implementálni. Az $\overline{Előkészítés}_V \Rightarrow \overline{Előkészítés}_{DP}$ nyíl arra utal, hogy a megvalósított előkészítési procedúráról a *Digitális Párba* olyan információt kell szolgáltatni, amely a folyamat adekvát modellezését teszi lehetővé. Az egyes mintadarabokon végrehajtott mérési folyamatot *Mérés*: $MO_{Kezd} \rightarrow MO_{Vég}$ reprezentálja. *Mérés* azt fejezi ki, hogy a mérési folyamat során a próbatest a kezdeti állapotból a végállapotba megy át. A folyamatot az *Elméletben* $\overline{Mérés}_E: \overline{MO}_{Kezd} \rightarrow \overline{MO}_{Vég}$ ábrázolja, amelyet a *Digitális Párban* a $\overline{Mérés}_{DP}: \overline{MO}_{Kezd} \rightarrow \overline{MO}_{Vég}$ fejez ki. A

Valóságban a mérési folyamatot $Mérés_V: MO_{Kezd} \rightarrow MO_{Vég}$ szemlélteti, melynek belső szerkezetét a diagram alján külön kiemeltük. $Mérés_V$ diagramon kiemelt, komplex szerkezete a fenti lista 5. pontjában leírtakat jeleníti meg. A $\overline{Mérés}_E \Rightarrow \overline{Mérés}_{DP}$ nyíl azt reprezentálja, hogy az *Elméletben* elméleti eszközökkel megfogalmazott mérési folyamatot a *Digitális Párban* úgy kell implementálni, hogy a szimulációk valósághűen kövessék a folyamatot. A $\overline{Mérés}_V \Rightarrow \overline{Mérés}_{DP}$ nyíl azt fejezi ki, hogy a mérésről a *Digitális Párba* olyan információkat kell szolgáltatni, amely a virtuális térben a mérési folyamat megkívánt pontosságú követését teszi lehetővé. A *Feldolgozás*: $MO_{Vég} \rightarrow Y$ leképezés a kiértékelés folyamatát reprezentálja. A megfigyelni kívánt fizikai folyamatok elméleti modelljei alapján tervezzük meg az *Elméletben* az adatok feldolgozásának/értékelésének módszertani alapjait; ezt fejezi ki az $\overline{Feldolgozás}_E: \overline{MO}_{Vég} \rightarrow \hat{Y}$ leképezés, amelyet a *Digitális Párban* $\overline{Feldolgozás}_{DP}: \overline{MO}_{Vég} \rightarrow \tilde{Y}$ valósít meg. A $\overline{Feldolgozás}_E \Rightarrow \overline{Feldolgozás}_{DP}$ nyíl azt fejezi ki, hogy az *Elméletben* elméleti eszközökkel megfogalmazott kiértékelési folyamatot a *Digitális Párban* úgy kell implementálni, hogy a számítások az elméleti sémát valósághűen kövessék. A *Valóság* rétegben a $Feldolgozás_V: MO_{Vég} \rightarrow Y$ eljárás a nyers mérési adatok olyan feldolgozását jelenti, melynek releváns eredményei a *Digitális Párban* végrehajtott szimulációk megfelelő eredményeivel összevetethetők lesznek. Az $Y \longleftrightarrow \tilde{Y}$ nyíllal fejezzük ki, hogy a kiértékelés során a kísérletek és a szimulációk megfelelő eredményeit összehasonlítjuk. A *Kiértékelés*: $Y \rightarrow V_{Ev}$ leképezés az indirekt úton meghatározható fizikai mennyiségek kiértékelésének folyamatát írja le. Az *Elméletben* $\overline{Kiértékelés}_E: \hat{Y} \rightarrow \hat{V}_{Ev}$ a kiértékelés elvi sémáját, míg a *Digitális Párban* $\overline{Kiértékelés}_{DP}: \tilde{Y} \rightarrow \tilde{V}_{Ev}$ a konkrét számításokat reprezentálja.

Összefoglalva, a diagramon bemutatott konceptuális séma azt fejezi ki, hogy: (1) a mérést összetett elméleti és gyakorlati előkészítő munkák előzik meg; (2) a mérés részét képezik az előkészítő munkák is, amelyekről minden olyan releváns információt javasolt begyűjteni, amely a mérések értékelésében szerepet játszhat; (3) a mérési folyamatot a *Digitális Párba* implementált elméleti modellel követjük; (4) a mérés értékelése a *Digitális Párban* végzett szimulációk és a mérések megfelelő eredményeinek összehasonlításával történik; (5) az indirekt módszerekkel meghatározható fizikai mennyiségeket az elmélet alapján, a *Digitális Párban* végzett számításokkal határozzuk meg.

4. Összefoglalás

Tanulmányunk anyagvizsgálatok és kiértékelésük általános módszertani kérdéseivel foglalkozott. Elsőként az anyagvizsgálati mérések felhasználási környezetének, a *Szerkezetintegritási Számítások* korszerű módszertanának néhány olyan tulajdonságát vázoltuk, amelyek megindokolják az anyagvizsgálatok módszertanának a Számítások módszertanához történő igazítását. Ismertettük az anyagtudományi mérések metrológiai alapú modelljét. Ezt követően az anyagtudományi vizsgálatok és kiértékelésük fizikai alapú konceptuális modelljét mutattuk

be. A modell arra épül, hogy a roncsolásos anyagvizsgálatok speciális körülmények között 'lejátsszot' fizikai folyamatok. A Szerkezetintegritási Számítások új módszertana egy, a modern kontinuum termodinamikából levezetett törésmechanikai elméleten alapul, amely átfogóbb, komplexebb a klasszikus modelleknél. Ezért az elmélet validálásához és az alkalmazások számára szükséges konstitutív paraméterek meghatározásához komplexebb, a mai anyagvizsgálati szabványokon túlmutató vizsgálati és kiértékelési módszertan szükségeseltetik.

A bemutatott konceptuális modell egységes rendszerbe foglalja az anyagvizsgálati mérések megoldásában közös szempontokat és tevékenységeket. Egységes rendszernek fogja fel az (*Elmélet, Digitális Pár, Valóság*) hármast. Az *Elméletben* a fizikai folyamatokat a későbbi alkalmazás céljainak megfelelő elméleti fizikai modell írja le. A mérési elrendezést az elméleti modell alapján tervezik meg és a méréseket úgy hajtják végre, hogy azok eredményei az elméleti modell által előírt jellemzők meghatározásához elégséges, ésszerű mennyiségű és értékelhető információt szolgáltatassanak. A mérések kiértékelését az elméleti fizikai modell alapján megtervezett és a megfelelő *IT* rendszeren implementált *Digitális Pár* segítségével végzik. A koncepció szakítóvizsgálatokra történő gyakorlati alkalmazhatóságát bizonyítottuk; a bizonyítás részleteit e lapszám következő tanulmányában [69] mutatjuk be.

Irodalomjegyzék

- [1] Fekete T., Nagyméretű nyomástartó rendszerek Szerkezetintegritási kérdéseiről, (2023) Anyagvizsgálók Lapja, 2023/III. lapszám, 22-27.
- [2] T. Nireki, Service life design, Construction and Building Materials 105 (1996) 403–406. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00045-3](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00045-3)
- [3] ASME 2023, Boiler and Pressure Vessel Code Complete Set. ASME New York (2023)
- [4] RCCM 2022, Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands, AFCEN Courbevoie (2022)
- [5] KTA Program of Standards, KTA Salzgitte (2023) https://www.kta-gs.de/common/regel_prog1.htm
- [6] VDI, VDI Standards, Beuth Berlin (2023) <https://www.vdi.eu/engineering/vdi-standards/>
- [7] PNAE G-7-002-86, Equipment and pipelines strength analysis norms for nuclear power plants, Energoatomizdat Moscow (1989) (In Russian)
- [8] RD EO 1.1.2.99.0920–2014, Brittle Fracture Resistance Calculations of Water-Water Reactor Pressure Vessels at the Design Stage. Methodology, Rosenergoatom Moscow (2014)
- [9] IAEA, Guidelines on Pressurized Thermal Shock Analysis for WWER Nuclear Power Plants Revision, 1 IAEA-EBP-WWER-08(1), IAEA Vienna (2006)
- [10] Kang, K.S., Kupča, L. (eds.) Pressurized Thermal Shock in Nuclear Power Plants: Good Practices for Assessment, Handbook on Deterministic Evaluation for the Integrity of Reactor Pressure Vessel, IAEA TECDOC-1627, IAEA Vienna (2010)
- [11] VERLIFE, Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs, VERLIFE – Version 2008, COVERS Project Report, European Commission Bruxelles (2008)
- [12] M.A.Q. Siddiqui, K. Regenauer-Lieb, H. Roshan, Thermo-Hydro-Chemo-Mechanical (THCM) Continuum Modeling of Subsurface Rocks: A Focus on Thermodynamics-Based Constitutive Models, Applied Mechanics Review (2024) 76 031001. <https://doi.org/10.1115/1.4056726>
- [13] ISO 6892-1, Metallic materials – Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature, ISO Geneva (2019)
- [14] ISO 6892-2, Metallic materials – Tensile testing: Part 2: Method of test at elevated temperature, ISO Geneva (2018)
- [15] ISO 6892-3, Metallic materials – Tensile testing: Part 3: Method of test at low temperature, ISO Geneva (2015)
- [16] ASTM E8/E8M-22, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International West Conshohocken (2022)
- [17] ISO 12135, Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness, ISO Geneva (2021)
- [18] ASTM E 399-22, Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM International West Conshohocken (2022)
- [19] ASTM E 1820-23, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM International West Conshohocken (2023)
- [20] ASTM E 1921-22, Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T₀, for Ferritic Steels in the Transition Range, ASTM International West Conshohocken (2022)
- [21] Z.P. Bažant, L. Cedolin, Stability of Structures Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories, Oxford University Press, New York Oxford (1991)
- [22] L. Mari, Notes towards a qualitative analysis of information measurement results, Measurement 25 (3) (1999) 183–192. [https://doi.org/10.1016/S0263-2241\(99\)00002-0](https://doi.org/10.1016/S0263-2241(99)00002-0)
- [23] L. Finkelstein, Theory and Philosophy of Measurement, In: P.H. Sydenham (Ed.), Handbook of Measurement Sciences, Vol. 1, Wiley New York (1982) 1–30.
- [24] L. Mari, M. Wilson, A. Maul, Measurement Across the Sciences, Developing a Shared Concept System for Measurement. 2nd Edition, Springer Series in Measurement Science and Technology, Springer Cham (2023) <https://doi.org/10.1007/978-3-031-22448-5>
- [25] G.C. Sih, Experimental fracture mechanics: strain energy density criterion. In: G.C. Sih, Mechanics of Fracture Initiation and Propagation, Chapter 8. Engineering Applications of Fracture Mechanics Vol 11. (1991) Springer Dordrecht https://doi.org/10.1007/978-94-011-3734-8_8
- [26] P. Zheng, R. Chen, H. Liu, J. Chen, Z. Zhang, X. Liu, Y. Shen, On the standards and practices for miniaturized tensile test – A review, Fusion Engineering and Design 161 (2020) 112006. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112006>
- [27] Szilárd L., Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen, Z. Physik 53, (1929) 840–856. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01341281>
- [28] Gábor D., Communication theory and physics, Transactions of the IRE Professional Group on Information Theory 1:1 (1953) 48–59. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1188558>
- [29] L. Brillouin, Science and Information Theory, Academic Press New York (1956)
- [30] R.Z. Morawski, An application-oriented mathematical meta-model of measurement, Measurement (2013) 46 3753–3765. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.04.004>
- [31] L. Mari, P. Carbone, A. Giordani, D. Petri, A structural interpretation of measurement and some related epistemological issues, Studies in History and Philosophy of Science Part A (2017) 65–66 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2017.08.001>

- [32] A. Giordani, L. Mari, A structural model of direct measurement, *Measurement* (2019) 145 535–550. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.060>
- [33] Wiener, N.: *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press, Cambridge, MA. (1948)
- [34] Johnson, B. D.: *The Cybernetics of Society, The Governance of Self and Civilization*. (1998) <https://jurlandia.org/cybsoc/>, utolsó hozzáférés: 2023. 10. 27.
- [35] Ampère, A. M.: *Essai sur la philosophie des sciences; Exposition analytique d'une classification naturelle de toutes les connaissances humaines*, 2. rész, Bachelier, Paris. (1843)
- [36] Umpleby, S.: *Definitions of Cybernetics*. <https://asc-cybernetics.org/definitions/>, (2000) utolsó hozzáférés: 2023. 10. 27.
- [37] A.L. Fradkov, *Кибернетическая физика*. Наука, Санкт-Петербург, (2003)
- [38] A.L. Fradkov, *Cybernetical physics: from control of chaos to quantum control*. Springer, Berlin. (2007) <https://doi.org/10.1007/978-3-540-46277-4>
- [39] A.L. Fradkov, Exploring nonlinearity by feedback. *Physica D* 128 159–168. (1999) DOI: [https://10.1016/S0167-2789\(98\)00322-4](https://10.1016/S0167-2789(98)00322-4)
- [40] A.L. Fradkov, I.V. Miroshnik, V.O. Nikiforov, *Nonlinear and adaptive control of complex systems*. Hingham, Massachusetts, Kluwer Academic Publishers (1999)
- [41] A.L. Fradkov, Application of cybernetic methods in physics, *Physics – Uspekhi*, 48 2 (2005) 103–127. <https://doi.org/10.1070/pu2005v048n02abeh002047>
- [42] A.L. Fradkov, Horizons of cybernetical physics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 375 (2017) 20160223. <https://dx.doi.org/10.1098/rsta.2016.0223>
- [43] Khantuleva, T. A., Shalymov, D. S.: Modelling non-equilibrium thermodynamic systems from the speed-gradient principle. *Phil. Trans. R. Soc. A* 375 (2017) 0160220. <https://dx.doi.org/10.1098/rsta.2016.0220>
- [44] NSF Program: Cyber-Physical Systems (2021), <https://www.nsf.gov/pubs/2021/nsf21551/nsf21551.pdf> letöltve: 2023. 10. 27.
- [45] Acatech: Cyber-Physical Systems: Driving force for innovation in mobility, health, energy and production. Acatech Position Paper, December 2011, Acatech (2011)
- [46] Geisberger, E., Broy, M (Eds.): *Living in a networked world. Integrated research agenda Cyber-Physical Systems (agendaCPS)*. Acatech Study, March 2015, Acatech (2015)
- [47] Jasperneite, J.: Was hinter Begriffen wie Industrie 4.0 steckt. (2012) <https://www.computer-automation.de/steuerungsebene/steuern-regeln/was-hinter-begriffen-wie-industrie-4-0-steckt.93559.html>, letöltve: 2021. november 12.
- [48] Monostori, L.: Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges, *Variety Management in Manufacturing. Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Procedia CIRP* 17 (2014) 9 – 13.
- [49] Åström, K. J., Kumar, P. R.: Control: A perspective, *Automatica* 50 (2014) 3–43. <https://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2013.10.012>
- [50] F. Tao, M. Zhang, A.Y.C. Nee, Background and Concept of Digital Twin. In: F. Tao, M. Zhang, A.Y.C. Nee, (Eds.) *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*, Academic Press New York (2019) 3–28.
- [51] S. Ferguson, Apollo 13: The First Digital Twin, *Simcenter Siemens* (2020) <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/>
- [52] M. Grieves, PLM Initiatives [PP. Slides]. Paper presented at the Product Lifecycle Management Special Meeting, University of Michigan Lurie Engineering Center, (December 3, 2002). (2002)
- [53] M. Grieves, Product Lifecycle Management: the new paradigm for enterprises. *International Journal of Product Development*, 2 1–2 (2005) 71–84.
- [54] M. Grieves, *Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking*. New York: McGraw-Hill. (2006)
- [55] M. Grieves, *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management*. Space Coast Press, Cocoa Beach, FL. (2011)
- [56] M. Grieves, *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*, White paper (2014) <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf> hozzáférés: 2023. 10. 23.
- [57] M. Grieves, Virtual Factory Replication. *Efficient Manufacturing*, 6 5 (2015)
- [58] Grieves, M.: White Paper: Driving Digital Continuity in Manufacturing. (2017) <http://research3.fit.edu/camid/research.php> hozzáférés: 2023. 10. 25.
- [59] M. Grieves, Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins. In: Flumerfelt, S. és mások (Szerk.): *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. (2019) 175–200.
- [60] S. Boschert, R. Rosen, C. Heinrich, Next Generation Digital Twin. In: Horváth, I., Suarez Riviero, J.P., Hernandez Castellano, P.M. (szerk.): *Proceedings of the 12th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2018*, Delft University of Technology. (2018) 209–218.
- [61] P. Chiabert, A. Bouras, F. Noël, J. Ríos, (Szerk.) *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0 15th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2018, Turin, Italy, July 2 – 4, 2018, Proceedings*, Springer International Publishing (2018)
- [62] C. Fortin, L. Rivest, A. Bernard, A. Bouras, (Szerk.) *Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era 16th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2019, Moscow, Russia, July 8 – 12, 2019, Revised Selected Papers*, Springer International Publishing. (2019)
- [63] M. Eigner, A. Detzner, P. Heiner Schmidt, R. Tharna, Holistic definition of the digital twin, *International Journal of Product Lifecycle Management*, 13 4 (2021) 343–357.
- [64] M.W. Grieves, Digital Twins: Past, Present, and Future. In: N. Crespi, A.T. Drobot, R. Minerva, (Eds.) *The Digital Twin*. Springer Cham (2023) https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_4
- [65] J. Post, M. Groen, G. Klaseboer, Physical Model-based Digital Twins in Manufacturing Processes. Paper presented at the Forming Technology Forum 2017, Enschede, The Netherlands. (2017)
- [66] J., Rios, N. Bolander, Physics in a Digital Twin World. In: N. Crespi, A.T. Drobot, R. Minerva, (Eds.) *The Digital Twin*. Springer Cham (2023) https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_21
- [67] M.K. Urbanski, J. Samsonowicz, Topological properties of electromagnetic measurement. In: *Proceedings of the XVI. IMEKO Word Congress, Vienna, Vol. V. (2000)* 183–186.
- [68] M.K. Urbanski, J. Samsonowicz, On the field nature of measuring process, *Measurement* 34 (2003) 31–38. [https://doi.org/10.1016/S0263-2241\(03\)00017-4](https://doi.org/10.1016/S0263-2241(03)00017-4)
- [69] Fekete T., Antók D., Tatár ., Bereczki P., Szakítóvizsgálatok innovatív kiértékelési módszertanáról, (2023) *Anyagvizsgálók Lapja*, 2023/III. lapszám, 39–54.

Szakítóvizsgálatok innovatív kiértékelési módszertanáról

An Innovative Methodology for Evaluating Tensile Tests

Fekete Tamás^a, Antók Dániel^b, Tatár Levente^c, Bereczki Péter^d

^aHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, főtanácsos, fekete.tamas@ek.hun-ren.hu

^bHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, tud. munkatárs, tatár.levente@ek.hun-ren.hu

^cHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, tud. segédmunkatárs, antok.daniel@ek.hun-ren.hu

^dDunaújvárosi Egyetem, laboratórium vezető, bereczki@uniduna.hu

Kulcsszavak

szakítóvizsgálatok,
adatgyűjtés,
kiértékelés,
szimuláció,
digitális pár

Absztrakt

Fémes anyagok képlékeny tulajdonságainak meghatározását hagyományosan szakítóvizsgálatokkal végzik. A vizsgálatokból a próbatestek egyenletes nyúlásának szakaszán nyert adatok (erő, keresztfej-elmozdulás, nyúlás stb.) elegendők ahhoz, hogy az anyag kellő pontosságú folyásgörbéjét megkapjuk. A befűződés kezdetével a próbatestben a feszültség- és nyúlásmező többc tengelyűvé válik, így a nagy nyúlások tartományában a folyásgörbe meghatározásához a mérések jobb felműszerezésére és a kiértékelési eljárások fejlesztésére van szükség. Tanulmányunkban bemutatjuk egy új, innovatív mérő- és kiértékelő keretrendszer működését: az optikai adatgyűjtő rendszerrel felszerelt anyagvizsgáló berendezést, a próbatestek gyártásának és előkészítésének folyamatát, a mérések végrehajtását és a hozzájuk tartozó adatgyűjtést. A mérés során készült képek feldolgozásával követtük a próbatest kontúr és a nyúlásmező változásait. A folyásgörbéket ezeknek az eredményeknek a felhasználásával és a megfelelő elméleti modellen végzett szimulációk segítségével határoztuk meg. A próbatestek digitális párait végelesemes módszerrel alkottuk meg. Geometria modelljüket a gyártás utáni méretellenőrzés során, nagypontosságú mérőrendszerrel felvett méretprofilokra alapoztuk. A valós geometriai méretekre alapozott modelleken végzett szimulációk eredményei sokkal jobban egyeznek a megfigyelésekkel, mint az idealizált testmodelleken végzett számításoké. Az eredmények azt mutatják, hogy a próbatestek geometriai tökéletlenségei jelentős szerepet játszanak a szakítóvizsgálatok kiértékelése és eredményeik értelmezése során.

Keywords

tensile tests,
data acquisition,
evaluation,
simulation,
digital twin

Abstract

Plastic properties of metallic materials are traditionally determined by tensile tests. During the uniform elongation phase of the specimens, data obtained from the tests (force, crosshead displacement, strain, etc.) are sufficient to obtain a sufficiently accurate flow curve of the material. After the onset of necking, the stress and strain field in the specimen becomes multi-axial, so to determine the yield curve in the range of high strains, a better instrumentation of the measurements and the development of the evaluation procedures are required. In this paper, the operation of a new, innovative measurement and evaluation framework is presented: a materials testing facility equipped with an optical data acquisition system, the process of specimen fabrication and preparation, the execution of measurements and the associated data acquisition. The changes in specimen contour and strain field were monitored by processing the images taken during the measurement. Flow curves were determined using these data and simulations based on the corresponding theoretical model. Digital Twins of specimens were created using the Finite Element Method. The geometric models were based on geometric profiles recorded by a high precision measurement system during post-production dimensional control. The simulated results on models based on real geometric dimensions are in much better agreement with observations than those obtained from calculations on idealized geometry solid models. The results show that geometric imperfections can play a significant role in the evaluation of tensile tests and the interpretation of their results.

1. Bevezetés

E lapszám egyik előző tanulmányában [1] nagyméretű nyomástartó rendszerek *Szerkezetintegritási Számítási módszertanának* időszerű problémáit tárgyaltuk, és bemutattuk az azok megoldására fejlesztés alatt álló elméleti keretrendszert. Az elméleti modell alapja A Törésmechanika Nemlineáris Mezőelmélete, egy, a modern kontinuum termodinamikában gyökerező törésmechanikai elmélet, amelyre célkitűzéseink szerint a jövőben a *Szerkezetintegritási Számítási módszerek* épülnek. Az elméleti modell átfogóbb, ezért komplexebb, mint azok, amelyeken a mai mérnöki gyakorlatban általában használt számítási eljárások alapulnak: egyfelől párhuzamosan több fizikai folyamatot követ, a köztük lévő csatolásokkal együtt, másfelől erős nemlinearitásokat tartalmaz. Komplexitása a mérések végrehajtására, megértésére és értékelésére vonatkozóan messzemenő következményekkel jár: a mérőrendszert és a kísérleteket úgy kell megtervezni és felműszerezni, hogy kellő pontossággal meg lehessen figyelni azokat a mintázatokat, az időfejlődésükkel együtt, amelyek alapján a próbatest viselkedése az elméleti leírás keretei között kielégítő pontossággal rekonstruálható. Mivel az elmélet termodinamikai elmélet, a mérések során a próbatestek termodinamikai válaszát kell megfigyelni. Az anyagvizsgálatok és kiértékelésük termodinamikai szellemben történő újragondolása még megoldásra váró kutatási kérdéseket vet fel [2]. Ennek a

szempontnak a mérési koncepcióba történő integrálása azt jelenti, hogy egy kísérlet során lényegesen több és jobb minőségű információt kell gyűjteni a próbatest viselkedéséről, mint amit a szakítóvizsgálatokra, pl. az ISO 6892-1 [3], ISO 6892-2 [4], ISO 6892-3 [5] és az ASTM E8/E8M-22 [6], vagy a törésmechanikai jellemzők mérésére vonatkozó ISO 12135 [7], ASTM E 399-22 [8], ASTM E 1820-23 [9], illetve az ASTM E 1921-22 [10] anyagvizsgálati szabványok jelenleg előírják, és az adatokat az elmélet követelményeinek megfelelően kell kiértékelni [11]. Ennek szellemében dolgoztunk ki egy olyan konceptuális modellt, amelyre az anyagtudományi mérések és kiértékelésük módszertana építhető, és amelyet szintén ezen lapszámban mutatunk be [12]. A koncepció lényege az, hogy a mérések során olyan folyamatokat figyelünk meg a Valóságban, amelyeket az Elmélettel le tudunk írni. Az elméleti leírás ahhoz szükséges, hogy a méréseket értelmezni és rekonstruálni tudjuk egyfelől, másfelől a mérések kiértékeléséből lezármaztatott eredmények alapján más helyzetekben, például az alkalmazásokban, prediktív erejű kijelentéseket tehessünk [11, 13]. Fontos megjegyezni, hogy egy alkalmazásban akkor tehetünk prediktív erejű kijelentéseket, ha a mérések értékelése során ugyanazt az elméleti apparátust használjuk, mint az alkalmazásban [11]. A méréseket az elméleti modell alapján felépített Digitális Pár (DP) segítségével, szimulációkkal értékeljük ki.

Fémes anyagok képlékeny tulajdonságait hagyományosan szakítóvizsgálatokkal határozzák meg. A vizsgálatokból a próbatestek egyenletes nyúlásának szakaszán nyert adatok (erő, keresztfej-elmozdulás, nyúlás stb.) elegendők ahhoz, hogy az anyag kellő pontosságú folyásgörbéjét megkapjuk. A befűződés kezdetével a próbatestben a feszültség- és a nyúlásmező többtengelyűvé válik, így a nagy nyúlások tartományában a folyásgörbe meghatározásához a mérések jobb felműszerezésére és a kiértékelési eljárások fejlesztésére van szükség. A tanulmányban azt mutatjuk be, hogy a [12]-ben ismertetett konceptuális modell alapján, a mérőrendszer megfelelő – kiegészítő – felműszerezésével, a mérésről gyűjtött információk mennyiségének növelésével és a mérési folyamat DP alapú kiértékelésével hogyan javítható a klasszikus szakítóvizsgálatok eredményeinek pontossága és megbízhatósága. A példával a konceptuális modell gyakorlati alkalmazhatóságát is szemléltetjük.

A továbbiakban először a szakítóvizsgálatok DP -jában használt elméleti modellt, majd a mérő- és kiértékelő keretrendszer felépítését és működését tekintjük át. Ezt a mérések leírása, majd a mérések nyers adatainak, kiemelten az optikai információk feldolgozására fejlesztett eljárások ismertetése követi. Végül a próbatestek geometriai tökéletlenségének vizsgálatára a DP segítségével végzett vizsgálataink eredményeit mutatjuk be.

2. A mérésekkel megfigyelt folyamatok elméleti modellje

[1]-ben a fejlesztés alatt álló módszertanba tervezett elméleti modellt, [12]-ben a méréseknek az elmülethez illesztett, általános konceptuális modelljét ismertettük. Mivel ma még nem áll rendelkezésünkre sem olyan számítási, sem olyan mérési apparátus, amellyel a módszertan gyakorlati alkalmazását támogató mérések és azok kiértékelése megvalósítható lenne, a mérések és kiértékelésük konceptuális modelljének alkalmazhatóságát egy egyszerűbb, ám a gyakorlat számára is fontos példán, a szakítóvizsgálatok példáján demonstráljuk. Mint feljebb már említettük, a mérések értékelése során ugyanazt az elméleti apparátust kell használni, mint az alkalmazásban [11]. Jelenleg a szerkezetintegritási számítások keretrendszer rugalmas-képlékeny anyagmodellek alkalmazására van felkészítve, ezért az elméleti apparátust is ugyanabban a formában vázoljuk. Annak érdekében, hogy az itt bemutatott modell a tisztelt olvasó számára önmagában is áttekinthető és értelmezhető legyen, az [1]-ben ismertetett megfontolások egy részét itt is ismertetjük.

Minden fizikai elmélet alapját a mozgásegyenletek képezik, amelyek egy anyagi rendszernek az őt körülvevő térben végzett mozgását írják le [11, 15, 17, 18, 19]. A mezőegyenletek az anyagi rendszeren belüli kölcsönhatások leírásával egészítik ki a mozgásegyenleteket [17]. A rendszer viselkedését a mozgásegyenletek és a mezőegyenletek együtt írják le. Ha a mozgásegyenleteket a külső térhez rögzített koordináta-rendszerben szemléljük, akkor a leírás euleri, a koordináta-rendszer pedig Euler-féle koordináta-rendszer. Ha a mozgást az anyagi rendszerrel

együtt mozgó rendszerben vizsgáljuk, akkor a leírás Lagrange-féle, a koordináta-rendszer pedig Lagrange/szubsztanciális koordináta-rendszer.

Az anyagi testet olyan sokaságnak tekintjük, amelynek saját, belső geometriája van [20]. Ezért a testen olyan koordináta-rendszert vezetünk be, amelyet anyagi vagy referencia koordináta-rendszernek nevezünk, és az anyagi pontokat (P) az ebben a koordináta-rendszerben elfoglalt helyzetükkel (X) jellemezzük. Egy test P pontjának a külső térben zajló mozgását Euler-koordináta-rendszerben a következőképpen írjuk fel:

$$x(\tau) = \chi(X, \tau), \quad (1)$$

ahol τ az időt jelenti, P helyét az anyagi koordináta-rendszerben X , míg az Euler-koordináta-rendszerben x reprezentálja. A mozgásegyenletek ezen formája hasonlít a pontmechanikában használt változathoz. A kinematikai mező legegyszerűbb alakjára úgy jutunk, hogy megvizsgáljuk, miként változnak a mozgásegyenletek, ha a P körüli reprezentatív térfogatelemben elhelyezkedő P' pont mozgását is figyelemmel kísérjük. A $P \rightarrow P', X \rightarrow X' = X + dX$ transzformáció hatására P' mozgása – a mozgásfüggvény P körüli Taylor sorfejtésének legegyszerűbb, lokálisan lineáris tagjánál megállva – Euler koordináta-rendszerben a következő alakú:

$$x'(\tau) = \chi(X, \tau) + \nabla_X \chi(X, \tau) dX + O(dX \otimes dX), \quad (2)$$

ahol x' a P' pozíciója a környező térben, $\nabla_X \chi(X, \tau)$ a mozgásfüggvény X körüli lokális Taylor sorfejtésének lineáris tagja; a másod- és a magasabbrendű tagokat $O(dX \otimes dX)$ tartalmazza. $\nabla_X \chi(X, \tau)$ -et a mozgásfüggvény gradiensének nevezzük, és F -el jelöljük; [11, 20, 18]. A továbbiakban a gradienst Euler-koordinátákban ∇ , míg Lagrange koordinátákban ∇_X jelöli. A P pontban értelmezett elmozdulást:

$$u(\tau) = x(\tau) - X(\tau) \quad (3)$$

definiálja. u kapcsolja össze P -nek az Euler és a Lagrange koordinátákban értelmezett pozícióit. A jobb Cauchy-Green tenzort, C -t $C = F^T F$, amíg a Green-Lagrangian nyúlástenzort $E = \frac{1}{2}(C - I)$ definiálja [11, 18, 21].

Az u elmozdulásvektort primer változónak tekintve, a leírásban F helyett a $H \doteq \nabla_X u = u \circ \nabla_X$ összefüggésekkel definiált elmozdulás-gradiens jut kiemelt szerephez. H és F között az összekötötést a $H = F - I$ egyenlet teremti meg. Ekkor a Green-Lagrange deformációtenzor a következő alakot ölti [18, 19]:

$$E = \frac{1}{2}(H + H^T + H \cdot H^T) = \tilde{E}^{lin} + \tilde{E}^{nonlin}, \quad (4)$$

ahol $\tilde{E}^{lin} = 1/2 \cdot (H + H^T)$ és $\tilde{E}^{nonlin} = 1/2 \cdot (H \cdot H^T)$. A (4) egyenlet a geometriailag nemlineáris, nagy alakváltozások leírására alkalmas Boltzmann-féle kontinuum modell mutatja be. A modell az elmozdulásokban másodrendű tagokat tartalmaz. Ha a leírásban a Green-Lagrange-tenzor $\tilde{E}^{lin}$ részére szorítkozunk, akkor az alakváltozás linearizált elméletéről beszélünk. Fizikai szempontból a másodrendű kinematikai elmélet alkalmazása megnyitja

az utat a kinematikai nemlinearitások számításokba történő beépítése előtt. Ez a megfelelő anyagi nemlinearitásokkal együtt lehetővé teszi egy anyagi rendszer viselkedésének pontosabb leírását olyan helyzetekben, amikor a helyi alakváltozások közismerten nagyok, például egy szakító próbatest végső tönkremenetele előtti viszonyok elemzése során [21].

A test mechanikai állapota időfejlődésének leírásához szükség van a kinematikai modellnek a test kölcsönhatásait és azok dinamikáját leíró mezőegyenletek rendszerével történő kiegészítésére. A mezőegyenletek rendszere az általános, minden anyagmodell esetén érvényes mérlegegyenletekből, továbbá az adott anyag viselkedését leíró konstitutív egyenletek kiegészítő rendszeréből áll [15, 16, 19].

A (4) egyenletben bemutatott kinematikai modellt alapul véve, rugalmas-képlékeny fémes szerkezeti anyagokra a rendszer viselkedését leíró egyenletek a következő alakban írhatók fel:

$$\begin{aligned} \hat{\varepsilon}(\mathbf{X}, \tau) &= \frac{1}{2}(\mathbf{u} \circ \nabla_{\mathbf{X}} + \nabla_{\mathbf{X}} \circ \mathbf{u} + (\nabla_{\mathbf{X}} \circ \mathbf{u}) \cdot (\mathbf{u} \circ \nabla_{\mathbf{X}}))(\mathbf{X}, \tau) && \text{a kinematikai egyenlet} \\ d\hat{\varepsilon}(\mathbf{X}, \tau) &= d_E \hat{\varepsilon}(\mathbf{X}, \tau) + d_p \hat{\varepsilon}(\mathbf{X}, \tau) && \text{az alakváltozások felbontási tétele} \\ \rho d_{\tau} \mathbf{v}(\mathbf{X}, \tau) + \nabla_{\mathbf{X}} \cdot \hat{\sigma}(\mathbf{X}, \tau) &= \mathbf{f}(\mathbf{X}, \tau) && \text{az impulzusmérleg} \\ \hat{\sigma}^T(\mathbf{X}, \tau) &= \hat{\sigma}(\mathbf{X}, \tau) && \text{az impulzusnyomaték mérlege} \\ \dot{W}(\mathbf{X}, \tau) &= \hat{\sigma}(\mathbf{X}, \tau) : \dot{\hat{\varepsilon}}(\mathbf{X}, \tau) && \text{a teljesítmény mérleg} \\ d_E \hat{\varepsilon} &= \mathbf{F}(\hat{\sigma}_E), \quad d_p \hat{\varepsilon} = \mathbf{F}(\hat{\sigma}_p) && \text{a konstitutív egyenletek} \end{aligned} \quad (5)$$

Az egyenletekben ρ a tömegsűrűség jele, a Green-Lagrange alakváltozási tenzort $\hat{\varepsilon}$ jelöli, $\hat{\sigma}$ a valódi feszültség tenzora, $d_{\tau} \mathbf{v}$ a gyorsulás, $\mathbf{f}$ a külső erőssűrűség vektora, W a tárolt mechanikai energiasűrűséget, $\dot{W}$ pedig a mechanikai teljesítménysűrűséget jelöli. $\cdot$ két vektor, míg $:$ két tenzor belső szorzatát reprezentálja. $d_E \hat{\varepsilon} = \mathbf{F}(\hat{\sigma}_E)$ a szerkezeti anyag rugalmas, míg $d_p \hat{\varepsilon} = \mathbf{F}(\hat{\sigma}_p)$ a képlékeny viselkedését leíró konstitutív egyenlet.

3. A mérő- és kiértékelő rendszer

3.1 A rendszer koncepciójáról

Az (5) egyenletek rendszerét áttekintve világos, hogy a modell geometriai és anyagi szempontból is nemlineáris. A geometriai nemlinearitást a $(\nabla_{\mathbf{X}} \circ \mathbf{u}) \cdot (\mathbf{u} \circ \nabla_{\mathbf{X}})$ tagok jelenléte fejezi ki, az anyagi nemlinearitást a nemlineáris konstitutív egyenletek hordozzák. A kinematikai modell a kis alakváltozások tartományában enyhén nemlineáris, de a nagy alakváltozások tartományában erősen nemlineárisra válik. Ezért a geometriai nemlinearitások mindig releváns információkat hordoznak. Az elmélet nemlineáris jellege teszi lehetővé a rendszer viselkedésének általánosabb és mélyebb megértését egyfelől, másfelől a megfelelő nemlineáris elmélet elengedhetetlen a szerkezeti anyagok olyan helyzetekben mutatott viselkedésének pontosabb leírásához, ahol az alakváltozások nagyok, pl. a végső tönkremenetelhez közeli, de azt még megelőző állapotokban [11, 21, 19].

Az erős nemlinearitás jelenléte az elméletben meszesemenő következményekkel jár: a mérőrendszert és a kísérleteket úgy kell megtervezni és felműszerezni, hogy a mérések során kellő pontossággal lehessen követni azokat a mintázatokat és a mintázatok időfejlődését, amelyek a próbatest nemlineáris viselkedésére jellemzők. Ennek a szempontnak a mérési koncepcióba történő integrálása azt jelenti, hogy a kísérlet során lényegesen több és jobb minőségű információt kell gyűjteni a próbatest viselkedéséről, mint amit manapság az anyagvizsgáló szabványok [3-10] előírnak.

A több és jobb minőségű információ gyűjtésére való törekvést az indokolja, hogy a mérés során követni akarjuk a próbatest geometriai mintázatának az időfejlődését. A geometria időfejlődésére vonatkozó információk gyűjtése, feldolgozása, és az így megszerzett információknak a mérések kiértékelésébe történő beépítése jelentősen felértékeli az információtechnológiának a mérésekben betöltött szerepét, ugyanis: (1) a mérés végrehajtása meglehetősen

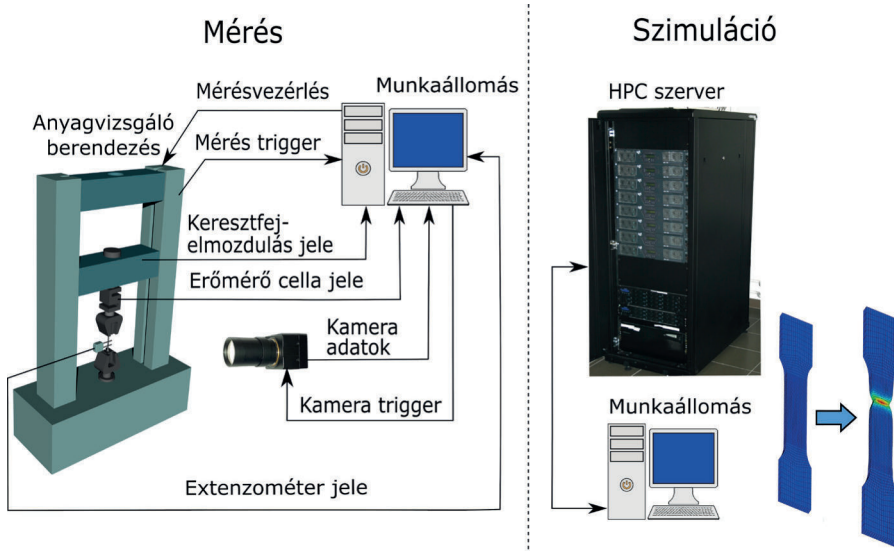
erőforrás-igényes információgyűjtő és információátviteli eszközök; (2) a mérés kiértékelése erőforrás-intenzív információfeldolgozásra képes eszközök igényel. Ez indokolja azt a stratégiát, hogy a mérések értékeléséhez azok *DP*-ját használjuk,

ahol a *DP* a mögötte álló elméleti fizikai modell implementációja [12]. Megjegyezzük, hogy szakítóvizsgálatok alább bemutatott, *DP* alapú értékelési koncepciójához hasonló megközelítés már korábban megjelent a szakirodalomban – pl. [24, 25, 26] –, de az anyagvizsgálatok végrehajtásának és kiértékelésének a *DP*-ra alapozott, általános koncepciója az elmúlt évek kutatásainak eredménye [12].

3.2 A rendszer felépítése

A rendszer az *Elmélet* $\rightarrow$ *Digitális Pár* $\rightarrow$ *Valóság* alrendszerekből épül föl, ahol a *DP* 'motorja' az *Elmélet*-ben megfogalmazott modell működő implementációja. Szakító kísérletek esetén az *Elmélet* a 2. pontban bemutatott modellt tartalmazza.

A *Digitális Pár* alrendszerben figyelembe vettük, hogy egy mérést mindig megelőzi a próbatestek mérésre történő előkészítése, melynek kimenetele a későbbi mérések eredményeit – esetleg nem elhanyagolható mértékben – befolyásolhatja. Ezért a méréseket úgy készítjük elő, hogy azok a *DP* használatát támogassák, és az előkészületek releváns eredményeit a *DP*-ban figyelembe vesszük. Ez azt jelenti, hogy a próbatestek előkészítése során, azokon olyan mintázatokat helyezünk el, amelyek időfejlődését a mérések során megfigyelhetjük. Ezen felül, az előkészítés folyamán a mintadarabok állapotáról minél több, olyan információt igyekszünk összegyűjteni, amit majd a mérések szimulációi során felhasználhatunk.



1. ábra: A keretrendszer: a mérőrendszer és Digitális Párja

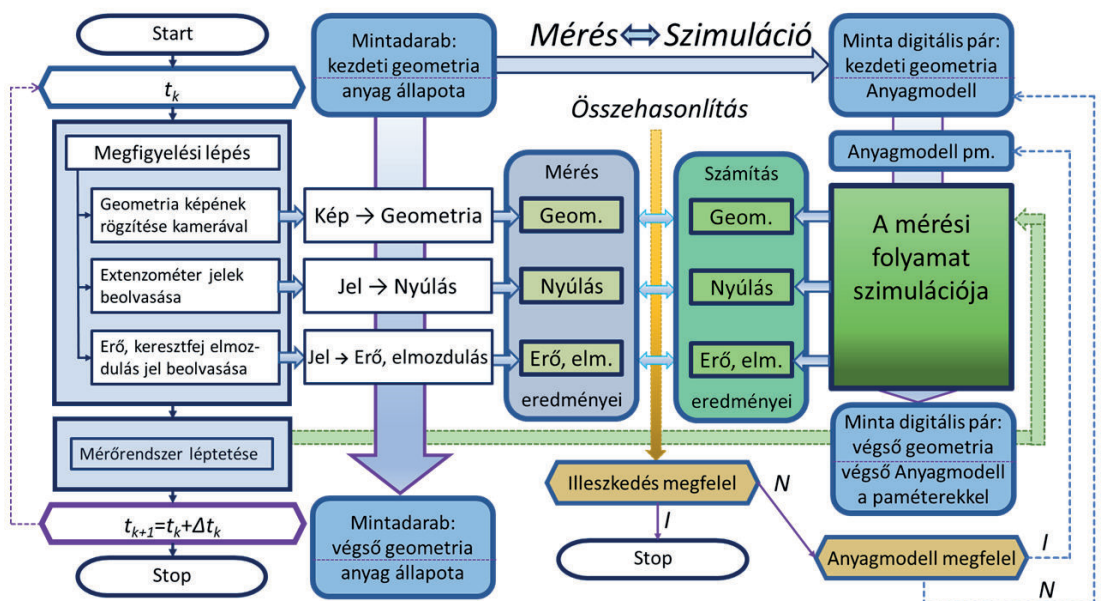
A *Valóságban* a mérőrendszer alapja egy eredetileg konvencionálisan felműszerezett termomechanikai szimulátor, amelyhez saját fejlesztésű optikai adatgyűjtő rendszert illesztettünk. Az optikai adatgyűjtő rendszer egy vagy két, a célokhoz megfelelően elhelyezett, nagy felbontású kamerából, valamint az azokat kiszolgáló adatgyűjtő- és adattároló rendszerből áll. Az optikai rendszer teszi lehetővé, hogy egyfelől a mintadarabok geometriájának, másfelől a mintadarabok előkészítése során a felületükre elhelyezett mintázatoknak a mérések során bekövetkező időfejlődését megfigyeljük.

A *Digitális Pár* alapja egy nagy teljesítményű számításon alkalmas szerver, amelyhez a megfelelő számú munkaállomás csatlakozik. A szerveren egy olyan, nagy teljesítményű véges elemes szoftverrendszer (Hexagon Marc/Mentat) fut, amelyben a 2. pontban leírt elméletet implementálták, továbbá hatékony pre- és posztprocesz-szalási lehetőségekkel rendelkezik. Ezen túlmenően a szoftverrendszert úgy választottuk meg, hogy az a jövőben ne csak egy adott konstitutív modell paramétereinek meghatározására, hanem egy vizsgált anyag konstitutív modelljének azonosítására is felhasználható legyen. A rendszer felépítését az 1. ábra ismerteti.

3.3 A rendszer működése

A rendszer működési sémáját a 2. ábrán mutatjuk be.

A mérés folyamán a próbatest geometriájából és az anyagának állapotából képezett (*Geometria, Anyag állapota*) kettős időfejlődésére jellemző mennyiségeket figyeljük meg, ami a (*Geometria kamerával rögzített képe, Extenzométer jele, Keresztfej elmozdulás jel, Erő jel*) jelek négyese. Közvetlenül a mérési folyamat megindítását megelőzően a mérést végrehajtó rendszerbe behelyeznek egy megfelelően preparált mintadarabot, amelynek geometriai méretei a minta gyártás után mért méretei. Ezek az adatok képezik a próbatest kezdeti geometriáját. A mérés indításakor a mérőrendszer végrehajt egy megfigyelési lépést, így rögzítve a rendszer kezdeti állapotát – (*Kezdeti Geometria, Extenzométer kezdeti jele, Keresztfej elmozdulás kezdeti jele, Erő kezdeti jele*) –, majd a megfelelő beavatkozással beavatkozásra kényszeríti a terhelőrendszert. Ezt követően átlép a következő megfigyelési – beavatkozási ciklusba, ahol elindít egy új megfigyelési lépést a (*Geometria, Extenzométer jele, Keresztfej elmozdulás jele, Erő jele*) négyesének szinkronizált begyűjtésével, amit aztán beavatkozással kiadása követ. A folyamat addig zajlik, amíg a próbatest el nem éri végső állapotát, melyhez az (*Utolsó Geometria, Extenzométer utolsó jele, Keresztfej elmozdulás utolsó jele, Erő utolsó jele*) állapot tartozik. A mérés során a rendszer megfelelő beavatkozásainak időbeli történetére jellemző adatokat is gyűjtjük. A rendszer az *Extenzométer jele, Keresztfej elmozdulás jele, Erő jele*, valamint a vezérlőrendszer beavatkozásainak időbeli történetére jellemző adatokat rögzíti/archiválja. A geometria időfejlődését követő videofelvételek fizikai mennyiségekké történő transzformációja offline adatfeldolgozás formájában történik.



2. ábra: A mérő- és kiértékelő keretrendszer működési sémája

A videofelvételek feldolgozása kétlépcsős folyamat: első lépésében a próbatestek kontúrjait határozzuk meg, melynek eredményeit felhasználva, azt követi a próbatestek felületén megfigyelhető elmozdulási mező generálása. A kétlépcsős adatfeldolgozás eredményei: a minta kontúrjai, valamint a minta felületén elhelyezett mintázatok időfejlődését leíró adatállományok. A kontúrok kevés, gyorsan feldolgozható, a próbatest globális viselkedését jól jellemző, olyan információkat tartalmaznak, amelyek a későbbi alkalmazások szempontjából relevánsak. A mintadarab felületi mintázatainak fejlődését leíró adatállományok sokkal nagyobb mennyiségű, részletekben gazdagabb információt tartalmaznak.

A *Digitális Pár*-ban a mérési folyamat szimulációját a mérőrendszerben rögzített, és megfelelően feldolgozott adatok alapján végezzük el. A szimulációk a 2. pontban leírt elmélet numerikus megoldásait generálják, amelyeket a próbatest *Kezdeti Geometriájáról* rendelkezésre álló adatok alapján előállított geometriai modelleken hajtunk végre. A rendszer viselkedését a mérőrendszer által generált időfüggő terhelések mellett vizsgáljuk. A *DP*-ban végrehajtott szimulációk célja az *Anyagmodell* azon paramétereinek meghatározása, amelyek mellett a szimulációkkal meghatározott és a mérések során megfigyelt (*Geometria*, *Extenzométerrel mért nyúlás*, *Keresztfej elmozdulás*, *Erő*) mennyiségek időfejlődése a legjobban illeszkedik. Jelenleg a rendszer rugalmas-képlékeny anyagmodell(ek) paramétereinek kimunkálására/ meghatározására képes, de a rendszert és annak működési sémáját úgy alakítottuk ki, hogy nyitott legyen egyéb, komplexebb anyagi viselkedést leíró konstitutív modellek paramétereinek meghatározására is. Az optikai rendszerből leszármaztatott információk közül a kontúrgörbékre alapozva a mérések egyszerűsített, de gyors kiértékelése valósítható meg, míg a mintadarab felületi mintázatainak fejlődését leíró információk teljes tömegére alapozott kiértékelési eljárások részletesebb, ám sokkal komplexebb, lokális vizsgálatokra is alkalmasak. A mérések kiértékelése során az egyszerűtől az összetettebb eljárások felé haladó eljárást követjük, mert ilyen módon bizonyos, durvább közelítésben akkor is használható eredményekhez juthatunk, ha további részletek még kidolgozásra válnak, továbbá a tapasztalatok szerint így takarékoskodni lehet az erőforrásokkal is.

4. A mérések előkészítése és végrehajtása

4.1 A mérőkészülék, mérőrendszer

A kísérleteket egy Gleeble 3800 termomechanikai szimulátoron végeztük. A berendezést gyárilag nagy pontosságú mechanikai nyúlásmérő és elmozdulásmérő rendszerekkel látták el. Mivel a mérések és kiértékelésük érvényességét ki akartuk terjeszteni a kontrakció megjelenése utáni tartományra, ahol az alakváltozási és a feszültségmező egyaránt inhomogénné válik, a kiértékelések megbízhatóságának növelése érdekében a mérőrendszer megfigyelőrendszerét egy saját erőforrásokból fejlesztett optikai megfigyelőrendszerrel egészítettük ki, amely két nagyfelbontású kamerát és az azokkal összehangolt

adatrögzítő szoftvert tartalmaz. A kameráknak az alábbi feltételeket kellett teljesíteniük:

1. fekete-fehér, 256 szintű szürke skálával, 2560×2048 pixel felbontással;
2. záridejük rövid – a mozgó próbatestről készülő éles képek biztosításához;
3. a Gleeble 3800 termomechanikus szimulátor vizsgáló-kamrájának méretkorlátai miatt a befoglaló méreteik kicsinyek;
4. objektívjük képes 80-100 mm távolságból kb. 50 mm × 30 mm-es területre fókuszálni és kis torzítású, éles képeket készíteni;
5. a [0...50] fps tartományban vezérelhető képrögzítési sebességre képesek;
6. a triggerelés megvalósításához szükséges analóg bemenettel rendelkeznek;
7. adatrögzítő szoftverük képes az anyagvizsgáló gépről érkező triggerjelek időbélyegét megjeleníteni a felvételen, és alkalmasak az elkészült, szinkronizált felvételek több, különböző formátumban történő exportálására;

A maximum két kamerát tartalmazó optikai rendszer alkalmazását egyfelől a korlátozott anyagi erőforrások, másfelől a kísérletekhez használt Gleeble 3800 berendezés vizsgáló-kamrájának méreteiből adódó hozzáférési korlátok indokolták.

4.2 A próbatestek gyártása és mérésre történő előkészítése

A próbatestek gyártását egy EML-1200SV típusú, 5 tengelyes CNC maró-megmunkálóközponton végeztettük, amelynek pozícionálási pontossága <0,005 mm, ismétlési pontossága <0,003 mm. A megmunkálóközpont olyan beépített mérőrendszert tartalmaz, amelynek pontossága 0,0005 mm.

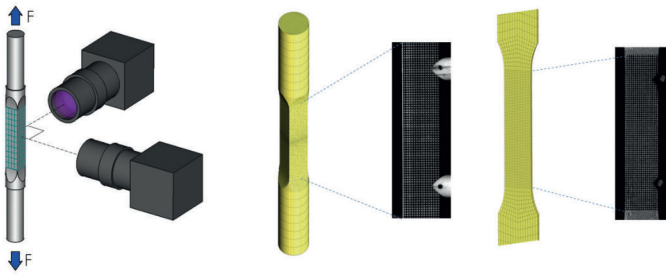
A kísérletekhez két különböző típusú próbatestet készítettünk:

1. Négyzetes keresztmetszetű próbatestek, amelyek 8×8 mm x mm névleges keresztmetszeti méretekkel, ±0,05 mm megengedett tűréssel, valamint 37,564 mm mérőhosszal rendelkeznek;
2. Lapos próbatestek, amelyek 8×2 mm x mm névleges keresztmetszeti méretekkel, ±0,05 mm megengedett tűréssel, valamint 37,564 mm mérőhosszal bírnak.

A próbatestek S460 jelű, alacsony széntartalmú, finomszemcsés szénacélból készültek.

A próbatestek mind a négy oldalfelületére lézergravírozással készítettünk a mérőhosszon túlnyúló, 0,5×0,5 mm x mm osztásközzel jellemezhető, szabályos négyzethálós rácsozatot. A kísérletek során két, egymásra merőlegesen pozícionált kamerát használtunk, hogy a próbatestek felületén bekövetkező változásokat egyszerre két egymásra merőleges irányból is megfigyelhessük. Az optikai megfigyelések elrendezését a 3. ábra bal oldalán, a próbatestekre felvitt mintázatot a 3. ábra közepén és jobb oldalán mutatjuk be.

A próbatestek felületére felvitt, 0,5×0,5 mm x mm osztásközü, szabályos négyzethálós rácsozat választásának hátterében az az elképzelés áll, hogy ez a szabályos



3. ábra: Az optikai megfigyelések elrendezése (bal), a négyzet keresztmetszetű próbatestre felvitt mintázat (közép), a lapos próbatestre felvitt mintázat (jobb)

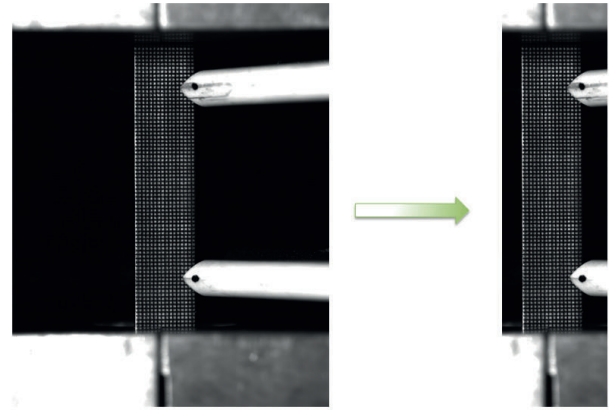
mintázat megfelel a próbatestek DP-jain alkalmazott geometriai háló élei hosszának, és a mérések során megfigyelt és a szimulációk által meghatározott geometriai hálóminták, valamint azok változásai könnyen összehasonlíthatók maradnak a szimulációk kiértékelése során. Ezen felül a mintázat megfigyelt és számításokkal meghatározott értékei közötti helyi különbségek lehetővé teszik a rendszerben lévő lokális anyagi inhomogenitások jelenlétének felismerését.

4.3 A mérések végrehajtása

A vizsgálatokat a Gleeble 3800 anyagvizsgáló szimulátoron, egyenletes, 1 mm/min keresztfej-előtolási sebességgel végeztük. A mérési folyamat a vezérlő szoftver eleminek tekintett, 0,004 s időintervallumokon végrehajtott megfigyelési és beavatkozási lépéseinek ciklusaiból épül fel. Egy elemi megfigyelési lépésben a rendszer pontosan szinkronizált adatfelvételt végez, majd beavatkozik és lépteti a terhelőegységet. Ezt követően rátér a következő ciklusra. A rendszer egy elemi megfigyelési lépés során a mechanikus extenzométerek, a keresztfej, valamint az erőmérő cella adatait, valamint a mintadarab pillanatnyi képét gyűjti. Az optikai rendszer a mérés elején, a rugalmas alakváltozások tartományában minden 5. megfigyelési lépésben (0,02 s-ként), a folyáshatár elérése után, a maximális erő eléréséig minden 10. lépésben (0,04 s-ként), ezt követően pedig újra minden 5. megfigyelési lépésben (0,02 s-ként) készít felvételt a mintadarab geometriájáról. A geometria ennél finomabb időosztással történő követését a jelenleg használt optikai rendszer nem teszi lehetővé; az a rendszer továbbfejlesztési tervei között szerepel.

5. A mérések nyers adatainak feldolgozása

A mechanikus extenzométerek, a keresztfej elmozdulás és az erőmérő cellán mért értékek további előfeldolgozást nem igényelnek. Az optikai rendszerrel gyűjtött digitális felvételek fekete-fehér 256 szürkeárnyalatú, 2560x2048 pixel felbontású, 5:4 Vertikális:Horizontális (V:H) arányú képek. A felvételek geometriai adatokká történő transzformációja a mérés után történik. A geometriai adatok képekből történő leszámaztatására egy több lépésből álló folyamat-láncot fejlesztettünk ki. Tekintettel arra, hogy az 5:4 V:H arányú felvételek sok irreleváns információt tartalmaznak, első lépésben kivágtuk a képekről a felesleges információ nagy részét, ≈ 75 -80-át. Ezt a nyers levágási



4. ábra: A képek előzetes, nyers levágása

(cropping) lépést a 4. ábrán szemléltetjük.

A képek érdemi feldolgozásának folyamatát két lépésre osztottuk:

1. A próbatestek kontúrjainak meghatározása,
2. A próbatestek felületén megfigyelhető elmozdulási mező követése.

A képfeldolgozási eljárás kétlépcsőssé alakítása mögött a következő megfontolások állnak: (a) a próbatest határoló kontúrjainak meghatározása lényegesen gyorsabb, és takarékosabban bánt a számítási erőforrásokkal, mint az elmozdulási mezőé; (b) a próbatest határoló kontúrjai egyértelműen elkülönítik a próbatestet a háttértől; (c) a kontúrok ismeretében gyorsabban és pontosabban kiértékelhetők azok a korrekciós formulákon alapuló folyásgörbék, amelyek az elméleti irodalomban évtizedek óta ismertek és a nyúlások meglehetősen nagy értékéig jó közelítést biztosítanak; (d) a kontúrról szerzett információk felhasználásával lényegesen javítható az elmozdulási mező meghatározási algoritmusának hatékonysága, mert a háttér eliminálását követően, annak zavaró hatásai kiiktathatók a további eljárásokból.

A kétlépcsős képfeldolgozási eljárás lehetővé teszi, hogy a mérések durvább közelítésben kiértékelt eredményeit valamilyen alkalmazásban akkor is felhasználhassuk, ha a finomabb felbontással kidolgozott eredmények még nem állnak rendelkezésre, továbbá ezek az első eredmények a finomabb értékelési eljárások iteratív eljárásaiban kiindulási adatként is felhasználhatók.

5.1 A próbatestek kontúrjainak meghatározása

A kontúrok meghatározása a következő lépések láncolatából áll: elmosás és szegmentálás $\rightarrow$ finom vágás $\rightarrow$ élek felismerése $\rightarrow$ vektorizálás.

1. A nyers képeket – aluláteresztő szűrő alkalmazásával, vagy Gauss-féle elmosás segítségével – elmoszuk, hogy a minta egyenetlen felületéből és a mintázat színének lokális ingadozásaiból eredő, a képeken megjelenő, zajszerű mintázatokat elnyomjuk vagy csökkentjük. Az elmosást követően a mintázat sötét és világos részeit szegmentálási küszöbérték megválasztásával határoljuk el egymástól. A küszöbértékek meghatározása meglehetősen összetett feladat: túl alacsony küszöbérték esetén a háttérzaj kedvezőtlenül

befolyásolja a kontúrvonalak meghatározásának pontosságát, míg a túl magasra választott küszöbérték a keresett kontúrok között véletlenszerűen megjelenő foltokat eredményez. A megfelelő küszöbérték megtalálása gondos vizsgálatot és felhasználói beavatkozást igényel. A kontúrok meghatározását zavaró foltok elkerülése érdekében a legcélszerűbb azt feltételezni, hogy a „küszöbölési lépés” után a mintán kívül csak fekete pixelek vannak, és onnan közelítve, az első fehér pixel a minta szélét jelöli. Ha a próbatest felületére felvitt mintázat a minta szélén belül véget ér, akkor ez a megközelítés sokkal jobban tolerálja a küszöbérték meghatározásának pontatlanságát, mint a próbatest éléig felvitt mintázat. Több próbatesten végzett küszöbérték-meghatározási munka tanulságai alapján ezért a mintázatok készítésének protokollján változtattunk: a jövőben a mintadarab felületére felvitt mintázatok a próbatest szélét max. $\approx 0,3$ mm-re közelíthetik meg.

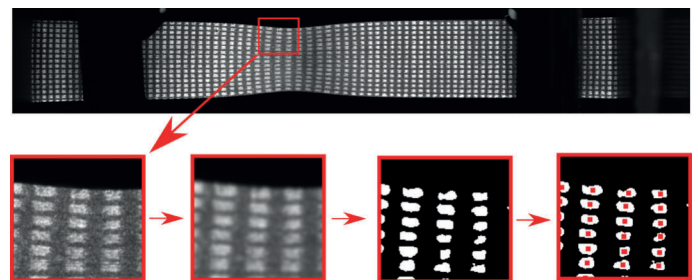
2. Finom vágás, amelyet hisztogram segítségével végzünk; célja az értékelés szempontjából releváns képmező megtartása.
3. Az élek felismerését az ImageMagick szoftver segítségével végezzük.
4. Vektorizálás, amelyet saját fejlesztésű kóddal végzünk, melynek algoritmusa azon az egyszerű feltevésen alapul, hogy a kép középpontja a minta képének belsejében található, ahol fehér pixelek vannak. A kép közepéből kiindulva, a bal oldali első fekete pixel a minta egyik kontúrján lévő pontot, míg a jobb oldali első fekete pixel a másik kontúrján lévő pontot jelöli. Így elkerülhetjük azokat a mesterségesen gerjesztett problémákat, amelyeket általános célú vektorizáló programok használata esetén tapasztaltunk. A vektoros adatokat először pixelkoordinátákban kapjuk meg. Annak érdekében, hogy a geometriai méretek meghatározásának pontosságát biztosítsuk, a pixelkoordináták fizikai koordinátákra történő átalakítása során a geometriai optika megfelelő vetítési szabályait használjuk fel. Megjegyezzük, hogy a képekről meghatározott kontúrgörbék zajosak, ezért annak kiszűrése

érdekében minden kontúrra analitikus görbét illesztünk. Ennek ellenére a zaj egy része megmarad. Az egymást követő képekből számított próbatest-keresztmetszetek és alakváltozások szintén tartalmaznak némi zajt.

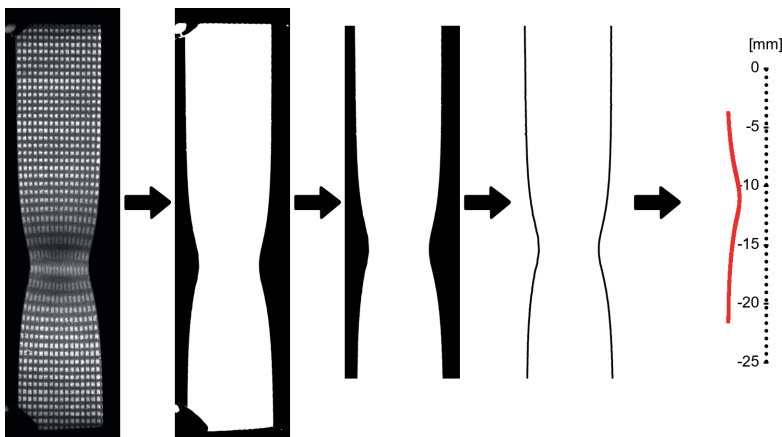
A kontúrvonal meghatározási eljárás lépéseit egy végső tönkremenetel előtt álló mintadarabra az 5. ábrán szemléltettük.

5.2 A próbatestek felületén megfigyelhető elmozdulásmező követése

A képek feldolgozásának első lépése ez esetben is az, hogy a nyers képekből a fent leírtaknak megfelelő eljárással elmosott képeket készítünk, hogy csökkentsük a minta és a rá felvitt mintázat felületi- és szín- egyenetlenségeiből származó, zajszerűnek tekinthető jelek hatását. Az elmosást követő szegmentálás itt is küszöbértékkel történik. Ezt követően határozzuk meg a fehér foltok súlypontjait, majd a súlypontok ismeretében követhetővé válik azok mozgása – ld. a 6. ábrát –. A súlypontok követésére a Lucas-Kanade algoritmust használjuk [27]. A tapasztalatok szerint az egyszerű, az egész megfigyelt területre konstans küszöbértéket feltételező küszöbértékelés, amely kezdetben jó eredményekre vezet, a befűződés megjelenése után, a nagy lokális deformációk tartományában nem működik jól, mert itt úgy a próbatest felületének, mind a felületi mintázatnak a színe, továbbá a mintázat és



6. ábra: Az elmosás és szegmentálás → vektorizálás folyamata a próbatest felületén megfigyelhető elmozdulásmező meghatározásához



5. ábra: Az elmosás és szegmentálás (a) → finom vágás (b) → élek felismerése (c) → vektorizálás (d) egy végső tönkremenetel előtt álló próbatest esetén

a felület közötti átmenet gradiense is megváltozik. A továbbfejlesztés útja a felület lokális térképekre osztása, és azokon az adaptív lokális küszöbértékek szerinti szegmentálás bevezetése. Egy ilyen algoritmus működését nagyban segíti, ha a próbatest kontúrját még a felületi mintázat követését megelőzően meghatározzuk, mert a jelenlegi algoritmus a kontúrra vonatkozó információkat a szegmentálás során elveszíti, így a kontúr közelében a számítások bizonytalansága jelentősen megnövekszik.

6. Mérések kiértékelése a DP segítségével

6.1 Egyszerűsített eljárások szerepe a kiértékelésben

A mérési és mérés kiértékelési rendszer

fejlesztésének kiemelt célja, hogy a kiértékelés során a *DP* minél megbízhatóbban reprodukálja a megfigyeléseket. Tapasztalatok igazolják, hogy a roncsolásos anyagvizsgálatok (is) érzékenyek lehetnek a mérőberendezés, továbbá a mintadarabok előkészítésére. Ez különösen a miniatűr próbatesteken végzett mérések során okozhat problémákat. Ezért tartalmaznak az anyagvizsgálati módszereket tárgyaló mérési szabványok, pl. az ISO 6892-1 [3], az ISO 6892-2 [4], az ISO 6892-3 [5], illetve az ASTM E8/E8M [6] megfelelő előírásokat a próbatestek gyártása során betartandó méret-tűrés tartományáról. Ezért a *DP*-ban a próbatestek előkészítésének folyamatát, és annak hatásait is figyelembe vesszük, és arról olyan mennyiségű és minőségű információt igénylünk, amely lehetővé teszi úgy az előkészítés, mint a mérés folyamatának adekvát modellezését.

Ugyanakkor könnyen belátható, hogy a folyásgörbéknek kizárólag a nagyon részletes, a próbatestek felületén megfigyelhető elmozdulásmező követését is magába foglaló *DP* szimulációkkal történő meghatározása pazarlóan erőforrás-igényes, meglehetősen időrabló és költséges feladat. Ezért megvizsgáltuk, hogy a próbatestek kontúrgörbéinek birtokában, analitikus korrekciók – mint például hengeres szakítópróbatetek esetén a Bridgman-korrekció [28] – segítségével leszármaztatott folyásgörbék milyen költséggel, milyen minőségű eredményekre vezetnek. Az általunk használt, négyszög keresztmetszetű próbatestekre Choung és Cho dolgozott ki egy korrekciós sémát [29], amelyet a hajóépítő iparban használt szerkezeti acélokra alkalmaztak. A korrekció meghatározása ugyanolyan elvet követ, mint a Bridgman-féle korrekció.

A Choung – Cho korrekciós séma Ludwik típusú folyásgörbéből [30] indul ki, azaz a görbét:

$$\sigma = \sigma_y + K \cdot (\varepsilon_{pl})^n \quad (6)$$

alakúnak feltételezi, ahol σ a valódi feszültség, σ_y a folyáshatár, ε_{pl} a képlékeny maradó nyúlás, K a szilárdsági együttható és n a keményedési kitevő. A korrekciós tényező alakja a következő:

$$\sigma_{eq} = \zeta(\varepsilon_{pl}) \cdot \sigma_{avax},$$

ahol

$$\zeta(\varepsilon_{pl}) = \begin{cases} 1 & , \text{ ha } \varepsilon_{pl} \leq 1,4 \cdot n \\ \alpha \cdot \varepsilon_{pl}^2 + \beta \cdot \varepsilon_{pl} + \gamma & , \text{ ha } \varepsilon_{pl} > 1,4 \cdot n \end{cases} \quad (7)$$

és

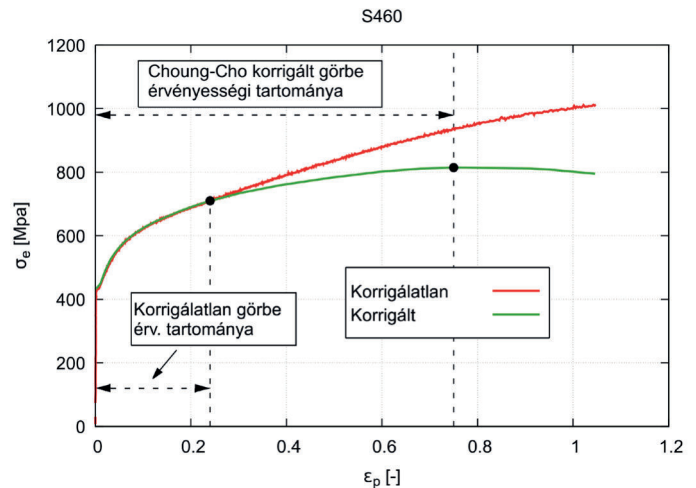
$$\alpha = -0,0704 \cdot n - 0,0275,$$

$$\beta = 0,4550 \cdot n - 0,2926,$$

$$\gamma = 0,1592 \cdot n + 1,024,$$

ahol σ_{eq} az egyenértékű, σ_{avax} az átlagolt tengelyirányú valódi feszültség a próbatétel legkisebb keresztmetszetében. ζ a feszültségkorrekciós tényező; n és ε_{pl} a Ludwik formulában használt megfelelő mennyiségek, α , β és γ a pedig a feszültségkorrekciós tényezőt reprezentáló polinom együtthatói.

A kutatás során, 8x8 mm x mm-es próbatesteken végzett vizsgálatok kiértékelése során megvizsgáltuk, hogy hogyan viszonyul egymáshoz a mérési eredményekből



7. ábra: Az S460 szerkezeti acél korrigálatlan, illetve a Choung-Cho eljárással korrigált folyásgörbéje

korrekció nélkül, valamint a korrekcióval leszármaztatott folyásgörbe. A kontúrok sorozatának ismeretében határoztuk meg a próbatestek minimális keresztmetszeit, majd a összefüggéseket, először korrekció nélkül, majd Choung-Cho korrekcióval. A korrigálatlan, illetve a korrekcióval meghatározott folyásgörbe viszonyát a 7. ábrán mutatjuk be. Itt most – hely hiányában – nem részletezett *DP* szimulációkkal megvizsgáltuk, hogy a kétféle folyásgörbén alapuló számításokkal hogyan reprodukálható a próbatétel viselkedése. A számítások eredményei szerint a Choung-Cho korrekció segítségével előállított folyásgörbén alapuló elemzések a képlékeny nyúlás lényegesen nagyobb tartományán pontosabban követik a megfigyeléseket, mint a korrigálatlan folyásgörbét felhasználó számítások. Az ábrán bejelöltük a két közelítés érvényességi tartományát is.

A vizsgálat eredményei azt mutatják, hogy a folyásgörbe *DP* alapú meghatározása során is célszerű felhasználni az eddig bevált analitikus, erőforrás-takarékos módszereket, mert ezek a részletes számítások számára jó kiindulási adatokat nyújtanak, nagyban csökkentve ezzel a részletes elemzések során szükséges iterációs lépések számát.

6.2 A próbatestek geometriai tökéletlenségének vizsgálata a *DP* segítségével

A 2. pontban bemutatott egyenletek rendszere geometriai és anyagi nemlinearitást egyaránt tartalmaz, melynek egyik legfontosabb, „trükkös” tulajdonsága, hogy a lineáris viselkedéstől kezdve, a gyengén nemlineáris viselkedésen át az erősen nemlineáris rendszerekre jellemző viselkedés leírására egyaránt képes. Ezért az alkalmazások során nagy gondossággal kell eljárni, különösen akkor, ha a szimulációkat nemcsak lokális vizsgálatokra kívánjuk felhasználni, hanem olyan globális elemzésekre is, mint pl. a szerkezeti anyagok kezdeti – relatív – stabil állapotától a végső tönkremenetelig tartó állapotváltozási pálya meghatározása az állapotterben. A globális vizsgálatok során ugyanis adódhatnak olyan helyzetek, amelyekben – a rendszer erősen nemlineáris válásával – hirtelen megjelenik a kezdeti feltételek olyan „ujjlenyomata”, ami erősen

befolyásolja a rendszer végső stabilitásvesztéséhez vezető folyamatokat [31-34].

Ezzel a jelenséggel függ össze az az anyagtudományban még ma is jórészt megoldatlan probléma, amely szerint a mérések kiértékeléséhez felépített szimulációs modellek döntő többsége nem képes követni a befűződés helyének a próbatest középsíkjától történő elvándorlását, azt, hogy a tönkremenetel szempontjából releváns befűződés helye a legkritikább esetben figyelhető meg a mintadarab középsíkjában. Az utóbbi időkben 8×2 mm x mm keresztmetszetű lapos próbatesteken végeztünk vizsgálatokat. Ezek a próbatesteken a befűződési zóna hossztengety menti relatív aszimmetrikus elmozdulása a kezdeti mérőhossz 40%-át is elérte. Ezek a próbatestek is a 4.2. pontban említett, EML-1200SV típusú, precíziós 5 tengelyes CNC maró és megmunkálóközponton készültek. A gyártás befejezte után, a mérőszakasz középső, kritikus részének méreteit két módszerrel is meghatározták: (1) 0,01 mm pontosságú tolómérővel, a próbatest hossztengetyére merőleges szimmetriasíkjában és a szimmetriasíktól ± 10 mm-re, ahol a gyártási méretek közel álltak a tervezési méretekhez; (2) a próbatest hossztengetyére merőleges szimmetriasíkjára merőlegesen, az attól számított ± 15 mm hossz mentén 1 mm-ként. Ez utóbbi méréseket a megmunkálóközpontba integrált, nagy pontosságú mérőrendszerrel végezték. A mérések szerint a gyártás pontossága többnyire kielégítette a tervezői követelményeket, azonban kiderült az is, hogy a mintadarabok vastagsága és szélessége néhány helytől eltekintve, szisztematikusan $\approx 0,01$ - $0,05$ mm-el kisebb a névlegesnél, és a változások trendszerű és zajszerű komponenseket is tartalmaznak. A mérések eredményeit tartalmazó koordinátatérképeket a gyártási dokumentációhoz csatolták.

A DP szimulációk segítségével arra kerestünk választ, hogy a próbatest gyártás során kimunkált geometriája hozzájárulhat-e a minta szakítóvizsgálat során mutatott aszimmetrikus viselkedéséhez, és ha igen, milyen mértékben. Nyilvánvaló, hogy a próbatest mérések során mutatott viselkedését a kezdeti geometriájának az ideálistól való eltérései és az anyagának az inhomogenitásai együtt befolyásolják. A szakirodalomban a próbatest alakjának az ideálistól való eltéréseit nevezik geometriai tökéletlenségeknek, geometriai imperfekcióknak vagy geometriai inhomogenitásoknak is [31, 35-37]. A próbatestek viselkedését leíró egyenletek rendszerének nemlineáris voltából az is következik, hogy a geometriai és az anyagi inhomogenitások hatásai nem szeparálhatók, azonban az anyagi inhomogenitások leírásához nem állt rendelkezésünkre elégséges információ. A geometriai inhomogenitások vizsgálatához ellenben elegendő információval rendelkezünk. Ezért a számítások csupán a próbatestek kezdeti geometriai tökéletlenségeit vették figyelembe.

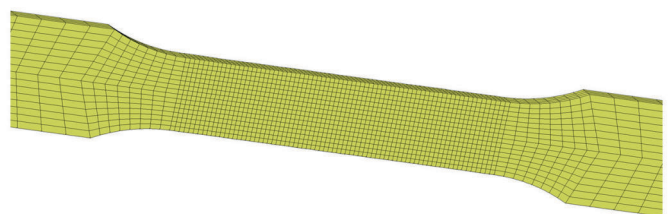
6.3 A próbatestek Digitális Párjai

Ebben a szakaszban a szakítóvizsgálatok szimulációhoz kifejlesztett modelljeit és a számítások eredményeit ismertetjük. A modellek fejlesztését és a szimulációkat a Hexagon Marc/Mentat 2022.3 végeselemes rendszerben

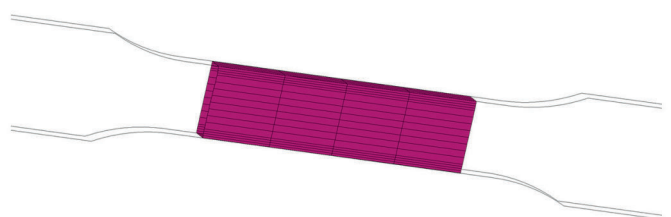
végeztük. A számítások kezdeti geometriai modelljei a következők:

1. Idealizált geometriájú, 8×2 mm x mm keresztmetszeti méretekkel jellemezhető lapos próbatest (jele FN). A próbatest tervek szerinti, idealizált geometriai modellje. A mérőszakasz hossza 37,6 mm, keresztmetszete 8×2 mm x mm éllel jellemezhető téglalap. A próbatest fejének szélessége 12 mm a mérőszakasz és a fej közötti lekerekítés sugara 20 mm.
2. A kézi méretellenőrzés eredményei szerint $7,97 \times 1,97$ mm x mm átlagos méretekkel jellemezhető próbatest (jele F1). Geometriai modellje a gyártás után – a próbatest középső szimmetriasíkjára merőleges ± 15 mm távolságig – végzett méretellenőrzés eredményein alapul. A méreteket a 8 mm széles felületeken 3, míg a 2 mm vastagságú oldalakon 1 vonal mentén határozták meg. A mérőszakasz hossza 37,6 mm, melynek két végén a keresztmetszet 8×2 mm x mm éllel jellemezhető téglalap. A mérések határai és a mérőszakasz két vége közötti „átmeneti zónákban” a lokális geometriai jellemzőket interpolációval határoztuk meg. A próbatest fejének szélessége 12 mm a mérőszakasz és a fej közötti lekerekítés sugara 20 mm. Ezek a részek a próbatest vastagsága 2 mm.
3. A kézi méretellenőrzés eredményei szerint $7,96 \times 1,98$ mm x mm átlagos méretekkel jellemezhető próbatest (jele F2). Geometriai modellje a mérőhossz mentén a gyártás utáni méretellenőrzés eredményein alapul. A mérőhossz mentén méréssel meghatározott méreteket ugyanazzal a készülékkel és módszerrel határozták meg, mint az F1 jelű próbatesten; a minta egyéb méretei megegyeznek az F1 próbatest méreteivel.

A geometriai modellek fejlesztésének első lépésében az idealizált geometriával bíró FN modellt hoztuk létre. A végeselemes háló tervezése során fontos szempont volt, hogy annak rácsosztása finomabb legyen, mint a méretmeghatározás helyeit leíró koordinátatérkép. Ezért a háló a mérőszakaszon $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ mm x mm x mm



8. ábra: A 8×2 mm x mm élhosszúságú, idealizált geometriájú lapos próbatest végeselemes hálójá

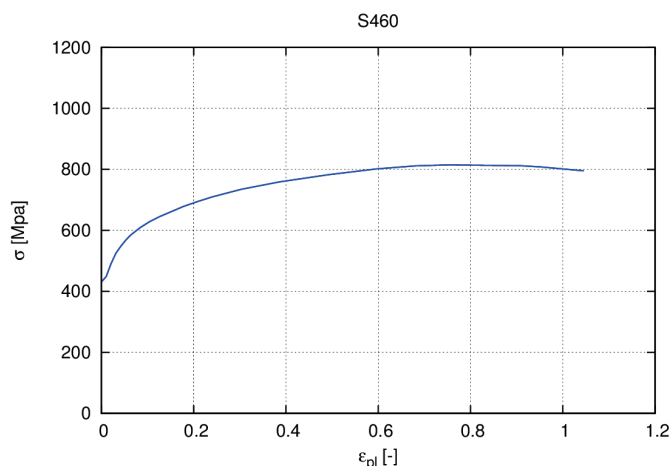


9. ábra: A 8×2 mm x mm élhosszúságú lapos próbatest gyártást követő méretellenőrzésének tartománya

20 csomópontos, kvadrátikus interpolációs hexahedron elemekből épül fel; az átmeneti zónában az elemek méretei és görbülsége a helyi viszonyoknak megfelelően változnak. A próbatest fejét $\approx 0,5 \times 1,25 \times 10 \text{ mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$ 20 csomópontos, kvadrátikus interpolációs hexahedron elemek alkotják. A geometriai modell ≈ 15000 elemet, ≈ 120000 csomópontot és ≈ 720000 szabadságfokot tartalmaz; hálózását a 8. ábrán mutatjuk be.

Az *F1* és *F2* próbatest gyártási méretekre alapozott geometriai modelljét az idealizált (*FN*) geometriai modellből származtattuk le. A próbatest gyártást követő méretellenőrzésének tartományát a 9. ábrán tüntetjük fel. Először az idealizált kiindulási modellben létrehoztuk a mintadarab méretellenőrzési felületi pontjainak halmazát. A mérések legszélső pontjai és a mérőszakasz két vége közötti „átmeneti zónákban” a szükséges pontokhoz tartozó lokális méretek a hosszúság mentén végzett lineáris interpolációval határoztuk meg. A következő lépésben az előállított pontokra köbös interpolációs spline-okat illesztettünk. Az így konstruált térgörbék hálózata felületeket feszítettünk ki, melynek végeredménye a próbatest mérési adatok alapján meghatározott határfelülete. Ez a felület még nem tartalmazta a számításokhoz szükséges csomópontokat, amelyeket úgy állítottunk elő, hogy az idealizált modell felületének megfelelő csomópontjait erre a határfelületre mozdítottuk el. Így a próbatest olyan geometriai modelljét állítottuk elő, amely a mintadarab felületének geometriai inhomogenitásait a gyártást követő méretellenőrzés térbeli felbontásának és pontosságának rendjében írja le.

A szimulációk során a 2. pontban bemutatott kinematikai modellt és alakváltozási elméletet használtuk. A képlékenységi elmélet a nagy alakváltozásos von Mises modell. A folyásgörbe az S460 szerkezeti acél, 6.1. pontban ismertetett, Choung-Cho eljárással korrigált folyásgörbéje. A szimulációk kezdeti feltételei a kezdeti geometriából és az azon feltételezett, terheletlen homogén és izotrop anyagból álltak. A mérési folyamatot a mérőrendszer adataiból származó, időfüggő kinematikai peremfeltételek írták le. A feladatot updated Lagrange eljárás alapján növekmény technikával oldottuk meg. A számításokat a próbatest S460 anyagára végeztük, melynek Young modulusa: 210 GPa, Poisson tényezője 0,3. Az S460 anyag folyásgörbéjét a



10. ábra: Az S460 szerkezeti acél DP-ben alkalmazott – Choung-Cho korrekcióval lezármaztatott – folyásgörbéje

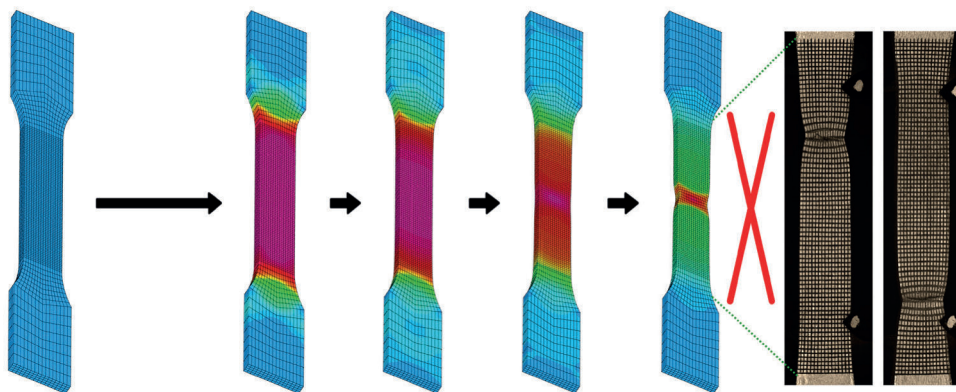
10. ábrán mutatjuk be.

A folyásgörbe rögzített voltát az indokolja, hogy a paramétervizsgálat célja a próbatest geometriai tökéletlenségeinek vizsgálata volt. A szerkezeti anyag kezdeti inhomogenitásai meghatározása problémáinak kutatása a jövő feladatai közé tartozik. A következő pontokban a szimulációk releváns eredményeit foglaljuk össze, az idealizált geometriai modell, az *F1* és az *F2* jelű próbatestek sorrendjében.

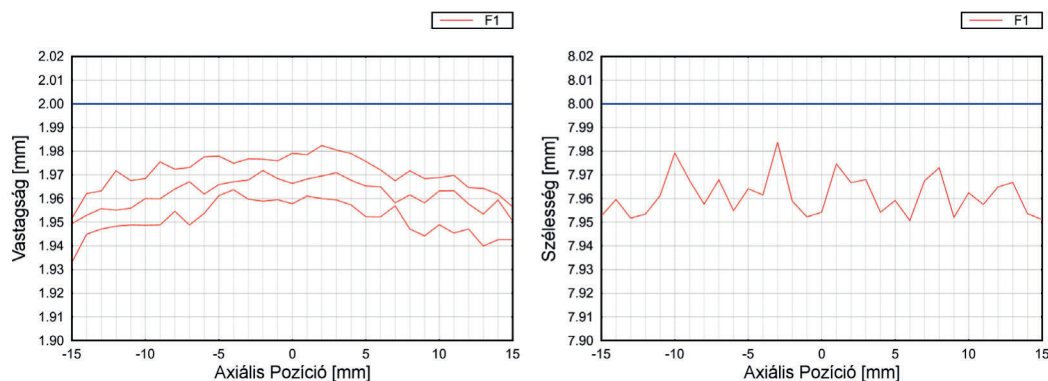
7. A Digitális Páron végzett szimulációk eredményei

7.1 Az *FN* próbatest modell viselkedése a szimulációk szerint

Az *FN* modell a próbatest idealizált geometriai modellje. Kezdetben teljesen szimmetrikus, szabályos alakzat. A modell a mérési folyamat végéig megőrzi a szimmetriatulajdonságait. A befűződés megjelenése, majd annak teljes további fejlődése a próbatest középsíkja körül, szimmetrikusan zajlik (ld. a 11. ábrát). A számítások eredményei szerint a modell alkalmatlan arra, hogy segítségével a befűződésnek a mérések során megfigyelt, aszimmetrikus elhelyezkedését (ld. a 11. ábra jobb szélén lévő felvételeket), és annak geometriai okait vizsgálni lehessen.



11. ábra: Lapos próbatest alakjának – és képlékeny nyúlásnak – szimulációval jósolt időfejlődése a szakítóvizsgálat során, a kezdeti geometria tervek szerinti, idealizált alakját és méreteit feltételezve. Az időnyíl balról jobbra mutat.



12. ábra: Az F1 jelű próbatest vastagságának (bal) és szélességének (jobb) a gyártást követő ellenőrző mérések alapján meghatározott hosszúság menti eloszlása

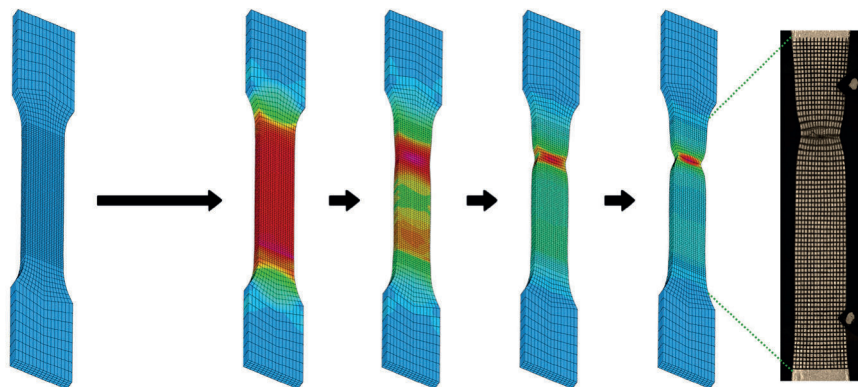
7.2 Az F1 próbatest modell viselkedése a szimulációk szerint

Az F1 jelű próbatest a hagyományos, tolómérővel készített méretellenőrzés eredményei szerint $7,97 \times 1,97$ mm x mm átlagos méretekkel rendelkezett. Geometriai modellje a gyártás után, az integrált méretellenőrző rendszerrel elvégzett mérés eredményeire épült. Ezek közül a próbatest vastagságának hosszúság menti eloszlását a 12. ábra bal oldalán, míg a szélesség hosszúság menti eloszlását a 12. ábra jobb oldalán tüntettük fel. Az axiális koordináták - előjele a próbatest szimmetriasíkja alatti, míg a + előjel a szimmetriasík feletti pozíciókat jelöli. A mérési adatok szerint a gyártás pontossága a pontok túlnyomó többségén a tervező által meghatározott 0,05 mm tűrési sávon belül van, ám vannak olyan részek, ahol azon kívül. A 12. ábra bal oldali képén jól látható, hogy a próbatest a közepe táján a legvastagabb és a két vége felé vékonyodik. A kész próbatest vastagságának hosszúság menti eloszlása egy enyhén aszimmetrikus hordó formájára emlékeztet, és erre a trendre zajszerű perturbációk rakódnak. A próbatest szélessége hossz menti eloszlásának trendje közép felé sokkal kisebb kiemelkedést mutat, a zajszerű perturbációk amplitúdója pedig lényegesen felülmúlja a trend megfigyelhető változásait. A 12. ábrán ismertetett adatok alapján is belátható az az állítás – melyet a 13. ábrán bemutatott, a kezdeti állapotot követő első számítási eredmény is megerősít –, hogy a leggyártott minta

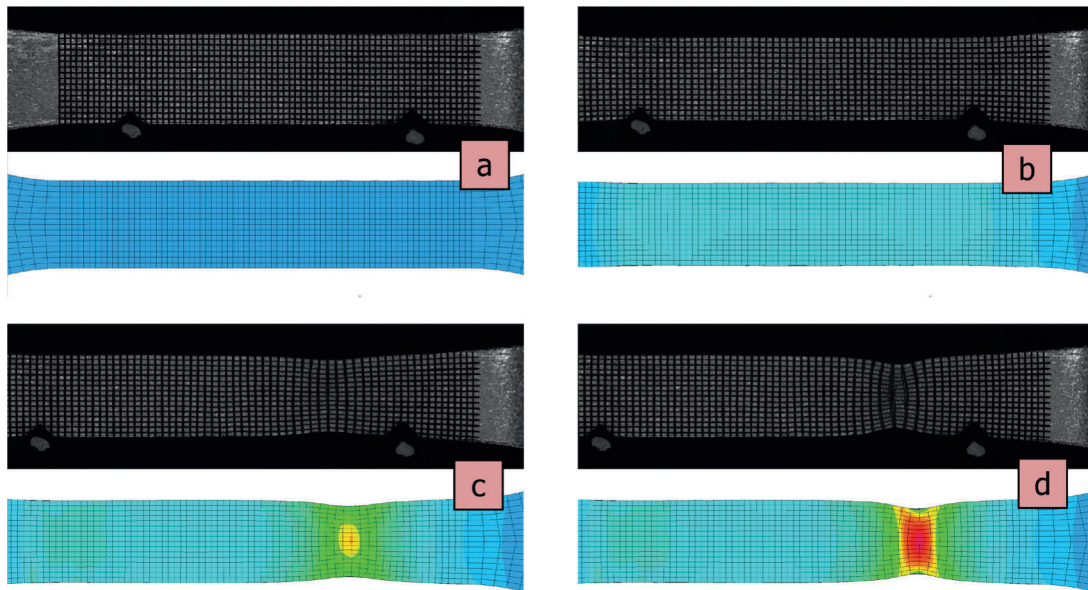
két leggyengébb zónája a szimmetriasíktól lefele a 10-15 mm, míg a szimmetriasíktól felfele a 7-15 mm tartomány. A mérési adatok eloszlásából és a modell építésének stratégiájából következik, hogy a próbatest mérőhossz menti keresztmetszeteit nem tökéletes téglalapok határolják, hanem téglalaphoz közeli, görbült éllel jellemezhető poligonok. A mérőszakasz

hossza 37,6 mm, melynek két végén a minta keresztmetszete 8×2 mm x mm éllel jellemezhető téglalap. A geometriai mérések határai és a mérőszakasz két vége közötti „átmeneti zónákban” a mintadarab lokális geometriai jellemzőit interpolációval határoztuk meg. A próbatest fejének szélessége 12 mm a mérőszakasz és a fej közötti lekerekítés sugara 20 mm. Ezeken a részeken a próbatest vastagsága 2 mm.

A tervezői elképzelések szerint a próbatest geometriája teljesen szimmetrikus, szabályos alakzat lenne. A tűrésmező felbontásánál finomabb mérések eredményei azt mutatják, hogy a próbatest a gyártás utáni állapotában nem szimmetrikus; a geometriája inhomogén. Ezért már a mérési folyamat kezdetén sem mutat teljesen szimmetrikus viselkedést, ám ekkor az inhomogenitások még kis mértékűek (ld. a 13. ábrát). A mérési folyamat során a lokális inhomogenitások felerősödnek, és arra a zónára, vagy annak közelébe koncentrálnak, ahol a kezdeti inhomogenitások eloszlásai a későbbi folyamatok megindulása szempontjából összességében a legkedvezőbbek. A számítások eredményei azt mutatják, hogy a kontrakciós zóna középsíkjának a kezdeti pozíciója a próbatest középsíkjától +10,0 mm-re helyezkedik el. Ez azt jelenti, hogy a modell jó közelítéssel arra a környezetre jósolja a befűződés és a végső tönkremenetel helyét, ahol azt a mérés során megfigyelték. Mivel a modell – a kezdeti geometriába kódoltan – finoman aszimmetrikus és inhomogén, a mérési folyamata során sem az alakváltozási-, sem a feszültségmező



13. ábra: Az F1 jelű próbatest alakjának – és képlékeny nyúlásának – szimulált időfejlődési trendje a szakítóvizsgálat során. A kezdeti geometriai modell a gyártás után mért geometriai méretekre épül. Az időnyíl balról jobbra mutat



14. ábra: Az F1 jelű próbatest alakjának a DP szimulációval meghatározott időfejlődési trendje (alul) összevetve a próbatest geometriájának megfigyelt időfejlődésével (felül)

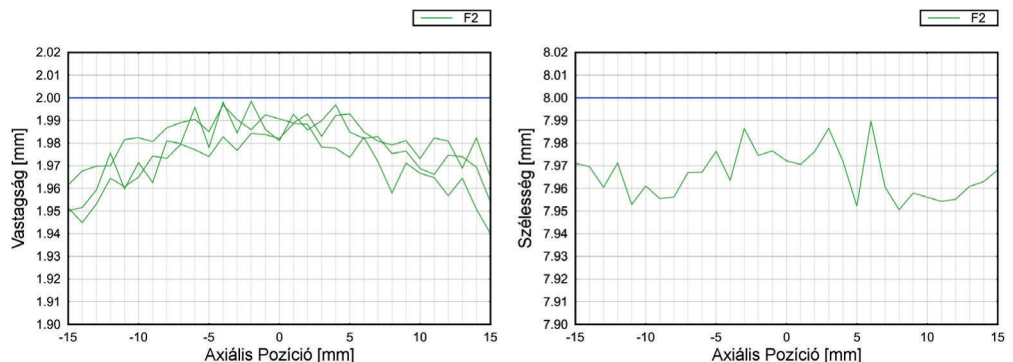
eloszlása nem szimmetrikus, és a folyamat során sem válik szimmetrikussá, hanem a kezdetben szabad szemmel érzékelhetetlen aszimmetria mértéke az idő előrehaladásával arányosan, folyamatosan növekszik. A szimuláció igen jól követi azt a trendet, amelyet az optikai megfigyelések adatai alapján vártunk. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a gyártás utáni méretellenőrzés adataira épített, a valós geometria inhomogenitásait és aszimmetriáit finoman közelítő modell alkalmas arra, hogy segítségével a befűződés – mérések során megfigyelt – aszimmetrikus elhelyezkedésének (ld. a 13. ábra jobb szélén lévő felvételt) geometriai okait vizsgálni lehessen.

A 14. ábrán az F1 próbatesten végzett mérések és a DP pár szimulációk négy – időben szinkronizált – eredmény-párját mutatjuk be; felül a mérések, alul a DP szimulációk eredményei találhatók. Az „a”-val jelölt pár a próbatest kezdeti állapotát, „b” az egyenletes nyúlás végéhez közeli állapotot mutat be, „c” a diffúziós befűződés szakaszán készített felvétel, míg „d” a próbatest végső állapotát mutatja meg. A „b” jelű ábrán a DP szimuláció eredményei világosan mutatják, hogy a nyúlásmező jó közelítéssel homogén a mérőhossz mentén, de az eloszlás a minta két vége felé enyhén aszimmetrikus. A „c” ábra tanúsága szerint a szimuláció minőségileg helyesen, mennyiségileg elfogadható közelítésben írja le a kontrakciós régió aszimmetrikus elhelyezkedését. A „d” ábra szintén ezt bizonyítja. A DP szimuláció eredményei szerint a befűződési zóna minimális keresztmetszete némileg közelebb tolódna a próbatest fejéhez, mint azt megfigyelések mutatják (a DP szerint a kezdeti szimmetriasíktól +10 mm-re kellene lennie – lásd a 12. ábra bal

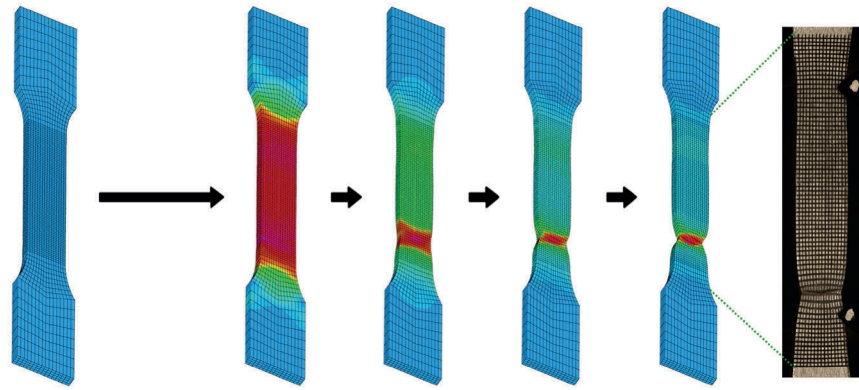
felét –, míg a megfigyelések szerint +8,3 mm-re, az eltérés 20,5 %).

7.3 Az F2 próbatest modell viselkedése a szimulációk szerint

Az F2 jelű próbatest a hagyományos, tolómérővel készített méretellenőrzés eredményei szerinti átlagos méretei: $7,96 \times 1,98$ mm × mm. A végesselemes geometriai modell ez esetben is a gyártás utáni méretellenőrzés eredményein alapul. A próbatest vastagságának hossz menti eloszlását a 15. ábra bal oldalán, míg a szélesség eloszlását a 15. ábra jobb oldalán tüntettük fel. A mérési eredmények szerint a gyártás pontossága a pontok túlnyomó többségén a tervező által meghatározott 0,05 mm tűrési sávon belül van, és csak egy-két olyan mérési hely létezik, ahol azon kívüli értékeket mértek. A 15. ábrán jól látható, hogy ez a próbatest is a közepe táján a legvastagabb, és a két vége felé egyre jobban vékonyodik. A vastagság hossz menti eloszlásának trendje ez esetben is egy enyhén aszimmetrikus hordó formájára emlékeztet, amelyet az egyéb tényezők erre ráépülve, zajszerűen perturbálnak. A próbatest szélessége hossz menti eloszlásának trendje



15. ábra: Az F2 jelű próbatest vastagságának (bal) és szélességének (jobb) a gyártást követő ellenőrző mérések alapján meghatározott hosszúság menti eloszlása

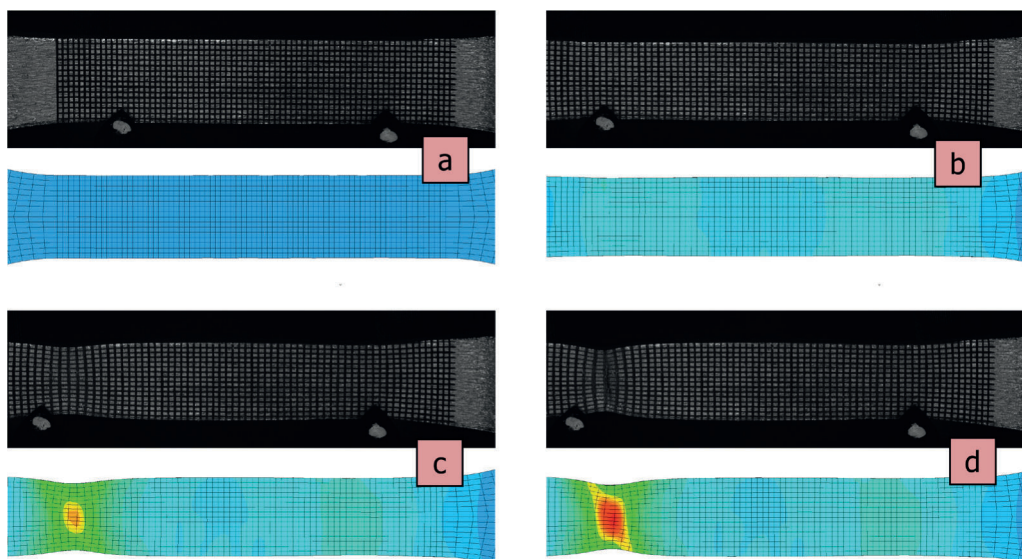


16. ábra: Az F2 jelű próbatest alakjának – és képlékeny nyúlásának – szimulált időfejlődési trendje a szakítóvizsgálat során. A kezdeti geometriai modell a gyártás után mért geometriai méretekre épül. Az időnyíl balról jobbra mutat

közép felé kisebb kiemelkedést mutat, mint a vastagságé, ám a zajszerű perturbációk amplitúdója lényegesen felülmúlja a trend változásait. A 15. ábrán ismertetett adatok azt mutatják – melyet a 16. ábrán bemutatott, a kezdeti állapotot követő első számítási eredmény is megerősít –, hogy a leggyártott minta két leggyengébb zónája a szimmetriasíktól lefele a 10-15 mm, míg a szimmetriasíktól felfele a 7-15 mm tartomány. Ezen felül a mérések eredményeiből és a modell építésének stratégiájából az is következik, hogy a próbatest mérőhossz menti keresztmetszeteit nem tökéletes téglalapok, hanem téglalaphoz közeli, görbült élekkel jellemezhető poligonok határolják. A mérőszakasz hossza 37,6 mm, melynek két végén a minta keresztmetszete $8 \times 2 \text{ mm} \times \text{mm}$ élekkel jellemezhető téglalap. A próbatest egyéb geometriai méretei megegyeznek az F1 mintadarab méreteivel.

A tervek szerint a próbatest kezdeti geometriája ez esetben is teljesen szimmetrikus, szabályos alakzat lenne, azonban a tűrésmező felbontásánál finomabb mérések eredményei azt mutatják, hogy a próbatest már a gyártás utáni állapotában is nagyon finoman inhomogén, igen enyhén nonszimmetrikus geometriával rendelkezik. Ezért

már a mérési folyamat kezdetén sem mutat teljesen szimmetrikus viselkedést, ám ekkor az inhomogenitások még igen kicsik (ld. a 16. ábrát), és az előbb említett leggyengébb zónák fölött meglehetősen nagy területen oszlanak el. A folyamat előrehaladtával az inhomogenitások lokalizációt gerjesztő hatásai felerősödnek, és arra a zónára koncentrálódnak, ahol a kezdeti inhomogenitások eloszlásai a későbbi folyamatok megindulása szempontjából összességében a legkedvezőbbek voltak. A számítások eredményei szerint a kontrakciós zóna középsíkjának kezdeti pozíciója -12,5 mm, ami meglehetősen jól megközelíti a mérés során végzett megfigyelések eredményeit. Mivel a modell kezdeti geometriája ebben az esetben is igen finoman aszimmetrikus és enyhén inhomogén, a mérési folyamata során sem az alakváltozási-, sem a feszültségmező eloszlása nem szimmetrikus, és a folyamat során sem válik szimmetrikussá, hanem a kezdetben szabad szemmel érzékelhetetlen aszimmetria mértéke az idő előrehaladásával arányosan, folyamatosan növekszik. A szimuláció eredményei igen jól követik azt a trendet, amelyet az optikai megfigyelések adatai alapján várunk. A számítások eredményei alapján ebben az esetben is kijelenthető,



17. ábra: Az F2 jelű próbatest alakjának a DP szimulációval meghatározott időfejlődési trendje (alul) összevetve a próbatest geometriájának megfigyelt időfejlődésével (felül)

hogy a gyártás utáni méretellenőrzés adataira épített, a valós geometria inhomogenitásait és aszimmetriáit finoman közelítő modell alkalmas arra, hogy segítségével a kontrakciós zóna mérések során megfigyelt aszimmetrikus elhelyezkedésének (ld. a 16. ábra jobb szélén lévő felvételt) geometriai okait vizsgálni lehessen.

A 17. ábrán az $F2$ próbatesten elvégzett mérések és a DP pár szimulációk néhány eredményét ismertetjük, idő-szinkronizált párok formájában; egy párban a megfigyelések felülre, a DP szimulációk eredményei alulra kerültek. Az „a”-val jelölt kép pár a próbatest kezdeti állapotát, „b” az egyenletes nyúlás végéhez közeli állapotot mutatja, „c” a diffúziós befűződés szakaszán készített felvételt ismertet, míg „d” a próbatest végső állapotát mutatja meg. A „b” jelű ábrán a DP szimuláció eredményei világosan mutatják, hogy a nyúlásmező jó közelítéssel homogén a mérőhossz mentén, de az eloszlás a minta két vége felé enyhén aszimmetrikus. A „c” ábra szerint a szimuláció igen pontosan jósolja meg a kontrakciós zóna helyét. A „d” ábra szintén ezt bizonyítja. A DP szimuláció eredményei szerint a befűződési zóna minimális keresztmetszete a fejtől kissé beljebb helyezkedik el, mint azt a megfigyelések adatai mutatják (a DP szerint ez a keresztmetszet -11,5 mm-re van a kezdeti szimmetriasíktól – lásd a 15. ábrát balra –, míg a megfigyelések szerint ez a hely -12 mm-re; a különbség 5 %).

7.4 Az FN , $F1$ és $F2$ próbatestekre végzett szimulációk eredményeinek összevetése

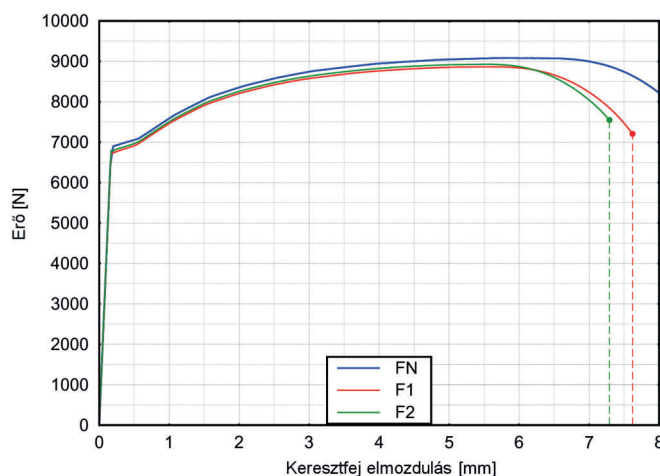
Az FN , $F1$ és $F2$ jelű lapos próbatestek szimulációinak eredményeit áttekintve a következőket állapíthatjuk meg:

1. Az ideális alakú FN modell a szimuláció során végig megőrizte a kezdeti geometriai szimmetriáit. Ezt a 11. ábrán bemutatott eredmények igazolják. Az eredményekből világosan látszik, hogy ez a modell alkalmatlan a próbatestek mérések során megfigyelt aszimmetrikus viselkedése geometriai okainak magyarázatára.
2. Bár az $F1$ kezdetben nagyon hasonló alakú, mint az FN , a kezdeti geometria nagyon kis inhomogenitásokat és aszimmetriákat tartalmaz. A fizikában azt mondják, hogy a rendszer kezdetben közelítő geometriai szimmetriával rendelkezik. A szimulációk elején a modell a szimmetrikus FN modellhez nagyon hasonló, de azzal nem azonos alakot vesz fel. A kontrakció kialakulásához szükséges kritikus nyúlás a minta középpontjától távolabb, abban a tartományban érhető el, ahol a kezdeti geometria inhomogén jellegéből eredő különbségek és azok gradiensei az alkalmazott terhelés időbeli alakulására adott legnagyobb választ adják. Amint a befűződés kezdetén az anyag a helyi kritikus állapotát eléri, a különbségek egyre gyorsuló ütemben felerősödnek, ami végül megszünteti a kezdeti modell által mutatott közelítő geometriai szimmetriákat. Ezt az állítást a minta 13. és 14. ábrán bemutatott, a geometria- és a képlékeny nyúlás időfejlődését szemléltető eredmények igazolják. Az eredmények azt bizonyítják, hogy a modell alkalmas próbatestek megfigyelések

során észlelt aszimmetrikus viselkedésének geometriai okait megmagyarázni.

3. Az $F2$ modell kezdeti állapotában ugyancsak nagyon jó közelítéssel megegyezik az FN modellel, azonban ez is tartalmaz kismértékű inhomogenitásokat és aszimmetriákat. A szimulációk során a minta alakja kezdetben szintén nagyon hasonlít az ideális FN modelléhez, de nem tekinthető azonosnak azzal. A kontrakció megkezdéséhez szükséges kritikus nyúlást a szerkezeti anyag ebben a modellben sem közepén, hanem abban a környezetben éri el, ahol a kezdeti geometria inhomogén voltából eredő különbségek és azok eloszlásainak (gradienseinek) a terhelés időfejlődésére adott válasza erre az eredményre vezet. Az anyag lokális kritikus állapotának elérését követően, egyre gyorsuló ütemben növekszenek és válnak szembetűnővé azok a különbségek, amelyek aztán végleg megszüntetik a modell kezdeti közelítő geometriai szimmetriáit. Ezt az állítást az $F2$ próbatest 16. és 17. ábrán bemutatott, a geometria- és a képlékeny nyúlás időfejlődését szemléltető eredmények igazolják. A szimulációk eredményei ebben az esetben is bizonyítják, hogy a modell alkalmas a próbatest megfigyelések során észlelt aszimmetrikus viselkedésének geometriai eredetű okait megmagyarázni.

A 18. ábrába az FN , az $F1$ és az $F2$ modelleken végzett szimulációk Erő – Keresztfel Elmozdulás eredményeit gyűjtöttük össze. Az eredményeket áttekintve jól látszik, hogy a „kísérlet” során a próbatestek nyújtásához szükséges erő végig az FN próbatesten a legmagasabb. Az $F1$ és az $F2$ próbatest közül az $F1$ próbatest válaszreakciója a keresztfel elmozdulás (Δs_{kf}) (0, 6) [mm] tartományán kisebb, ami a két modell közötti átlagos geometriai méretek különbségének következménye. Ebben a tartományban a két próbatest viselkedésében fellelhető különbség szinte elenyésző. A két mintadarab 6 mm-en túli, egyre gyorsuló lokalizációval és nagy inhomogenitásokkal jellemezhető viselkedését azonban már jelentősen befolyásolják a kezdeti geometriai inhomogenitások és a terheléstörténet 'emlékei', amit jól mutat, hogy ebben a tartományban az



18. ábra: Az FN , az $F1$ és az $F2$ jelű próbatestek szimulációkkal meghatározott erő – elmozdulás diagramjai a keresztfel elmozdulásának függvényében

F_2 próbatest gyorsabban közelíti meg, és hamarabb, $\Delta s_{KF}=7,28$ mm-nél éri el a végső tönkremenetel állapotát, mint F_1 , amely $\Delta s_{KF}=7,61$ mm-nél megy tönkre. Az FN próbatest szimulációjának eredményei szerint a próbatest lényegesen hosszabb elmozdulási tartományon, a $\Delta s_{KF}(0, 7)$ [mm] tartományán alig veszít a teherviselő képességéből, mint az F_1 és az F_2 próbatest.

A jelenség viszonylag egyszerű magyarázata abból indul ki, hogy a (4) egyenletek rendszerében ismertetett kinematikai modell az elmozdulási gradiens nemlineáris járulékait is figyelembe veszi, ezen keresztül pedig „érzekei” a próbatest geometriájának globális és lokális inhomogenitásait. A geometria globális inhomogenitását a próbatest tervezés szerinti, idealizált alakja határozza meg, a lokális inhomogenitásokat pedig az idealizált és a tényleges geometria helyi eltérései. Ezek az eltérések manapság egy megfelelő mérőrendszer használatával meghatározhatók. A gyártás utáni mérések eredményeire alapozott geometriai modell (F_1 és F_2 próbatest) a szimulációk kezdeti feltételei között tartalmazza a lokális geometriai inhomogenitásokból származó járulékokat, amelyek a rendszer külső terhelésre adott válaszaiban – már a kezdetektől – „járulékos” belső forrásként szerepelnek [38]. Az idealizált modell kezdeti feltételeiből a lokális geometriai inhomogenitások járulékos forrástagjai hiányzanak (FN próbatest). Amennyiben a próbatest gyártási méreteit pontosan követő geometriai modellre alapozott számítások helyett egy átlagolt méretek alapján meghatározott, idealizált modellre támaszkodunk, az átlagolással „töröljük” a rendszer kezdeti feltételeiből a geometriai inhomogenitások járulékait. A két rendszer kezdeti feltételeiben rejtőző – egyébként finom – különbségekre épülnek azok a későbbi folyamatok, amelyek az idealizált és a realisabb geometriai modellekre alapozott szimulációk kritikus állapotokra vonatkozó eredményeinek nagy mértékű különbségeit okozzák.

A bemutatott eredmények felhívják a figyelmet arra, hogy – amennyiben a vizsgálatok kiértékelése során a szerkezeti anyagok tönkremenetelhez vezető pályáját is pontosabban követni akarjuk, akkor – az anyagvizsgálati mérések DP -jában a próbatestek valóságot jobban megközelítő geometriai modelljei kiemelkedő szerepet játszanak. A jelen munkában alkalmazott elméleti modellrendszer már legegyszerűbb formájában is van annyira finom, hogy a gyártási geometriai tökéletlenségek hatását képes modellezni. A pontosabb geometriai modell kidolgozásának az a feltétele, hogy a gyártás után a mintadarabról, megfelelő felbontással, kellően pontos mérési technikával készítsenek egy „méreteloszlás térképet”. A mai gyártás- és a mérési technológia szintjén ezek a mérések elérhető áron megvalósíthatók. A vizsgálatához használt próbatesteket a mai kor technológiájának színvonalán álló, kereskedelmi forgalomban elérhető CNC megmunkálóközponton végezték. Az elkészített próbatestek méreteit az integrált, precíz méretellenőrző rendszerrel ellenőrizték. A geometriai modellek ilyen elemzésekre történő fejlesztése ugyan több információ feldolgozását igényli, és a próbatest DP -jának a szimulációk futtatásához szükséges erőforrás-igénye

némileg megnövekszik, azonban tapasztalataink szerint az elemzési esetek többségére kidolgozható egy költség-hatékony, jól használható modell. A gyártás utáni mérések eredményeire alapozott, realisabb DP -ok alkalmazásának gyakorlati előnye az lehet, hogy szisztematikus és körülmintő alkalmazásukkal az anyagjellemzők meghatározásának bizonytalanságai csökkenthetők.

8. Összefoglalás

A tanulmányban egy klasszikusnak tekinthető anyagvizsgálati eljárás, a szakítóvizsgálat kiértékelésének módszertani kérdéseit tárgyaltuk. Az általunk fejlesztett új koncepció túllép a mai anyagvizsgálati szabványokba kódolt, pusztán metrológiai szemléleten, és a méréseket azok kiértékelésével együtt az *Elmélet* → *Digitális Pár* → *Valóság* hármas egységében szemléli. A mérések kiértékelésének kulcsa a *Digitális Pár*, amely a vizsgált fizikai jelenség(ek) elméleti modelljének gyakorlati számításokra alkalmazható implementációit tartalmazza.

Bemutatott munkánk legfontosabb eredményei a következők:

1. Bemutattuk az új koncepción alapuló mérő- és mérés-kiértékelő rendszert, amelynek egyik legfontosabb egysége az optikai megfigyeléseket végző, a rendszerbe integrált modul. A méréseket a *Digitális Páron* végzett szimulációkkal értékeljük ki.
2. Az optikai megfigyelésekkel támogatott szakítómérések optikai rendszerből származó adatainak feldolgozása során mind a minta kontúrjait, mind a próbatest teljes geometriájának követését lehetővé tévő mintázatok javasolt meghatározni, és a kiértékelésbe ezt az információ-halmazt bevonni.
3. A szakítómérések *Digitális Párján* végzett szimulációk eredményeivel igazoltuk, hogy a DP -ban kiemelkedő szerepet játszanak a próbatestek tényleges alakját precízen leíró geometriai modelljei, mert bizonyos – főként a kisebb méretű – próbatestek a geometriai imperfekciókra érzékenyek. Ezért javasoljuk, hogy a próbatestekről a mérések előtt készítsenek, finom felbontással, megfelelő pontosságú 'koordináta térképet', melynek technikai feltételei ma már adottak. A mérések szimulációi során használt geometriai modellek a mérésekből származó adatokra épüljenek. Ez a munka legfontosabb következtetése, egyben ez tekinthető a cikk legfőbb üzenetének az anyagvizsgálatok, különösen az anyagok végső tönkremenetelével, kiemelten pedig a törési tulajdonságaival foglalkozó kutatók számára.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást részben az Innovációs és Technológiai Minisztérium által támogatott Tematikus Kiválósági Program 2020 (2020-4.1.1.-TKP2020) finanszírozta.

Irodalmak

- [1] Fekete T., Nagyméretű nyomástartó rendszerek Szerkezetintegritási kérdéseiről, (2023) Anyagvizsgálók Lapja, 2023/III. lapszám 22-27.

- [2] M.A.Q. Siddiqui, K. Regenauer-Lieb, H. Roshan, Thermo-Hydro-Chemo-Mechanical (THCM) Continuum Modeling of Subsurface Rocks: A Focus on Thermodynamics-Based Constitutive Models, *Applied Mechanics Review* (2024) 76 031001.
- [3] ISO 6892-1, Metallic materials – Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature, ISO Geneva (2019)
- [4] ISO 6892-2, Metallic materials – Tensile testing: Part 2: Method of test at elevated temperature, ISO Geneva (2018)
- [5] ISO 6892-3, Metallic materials – Tensile testing: Part 3: Method of test at low temperature, ISO Geneva (2015)
- [6] ASTM E8/E8M-22, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International West Conshohocken (2022)
- [7] ISO 12135, Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness, ISO Geneva (2021)
- [8] ASTM E 399-22, Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM International West Conshohocken (2022)
- [9] ASTM E 1820-23, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM International West Conshohocken (2023)
- [10] ASTM E 1921-22, Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range, ASTM International West Conshohocken (2022)
- [11] Z.P. Bažant, L. Cedolin, *Stability of Structures Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories*, Oxford University Press, New York Oxford (1991)
- [12] Fekete T., 2023. Anyagvizsgálatok és kiértékelésük innovatív módszertana, *Anyagvizsgálók Lapja*, 2023/III. lapszám 28-38.
- [13] Sih, G.C., 1991. Experimental fracture mechanics: strain energy density criterion. In: G.C. Sih, *Mechanics of Fracture Initiation and Propagation*, Chapter 8. *Engineering Applications of Fracture Mechanics Vol 11*. Springer Dordrecht
- [14] P. Zheng, R. Chen, H. Liu, J. Chen, Z. Zhang, X. Liu, Y. Shen, On the standards and practices for miniaturized tensile test – A review, *Fusion Engineering and Design* (2020) 161 112006 <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112006>
- [15] Gy. Béda, I. Kozák, J. Verhás, *Continuum Mechanics*, Akadémiai Kiadó Budapest (1995)
- [16] W. Muschik, C. Papenfuss, H. Ehrentraut, A sketch of continuum thermodynamics. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 96 1–2 (2001) 255–290. [https://doi.org/10.1016/S0377-0257\(00\)00141-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0257(00)00141-5)
- [17] J. Musilová, S. Hronek, The Calculus of variations on jet bundles as a universal approach for a variational formulation of fundamental physical theories, *Communications in Mathematics* 24 (2016) 173–193. <https://doi.org/10.1515/cm-2016-0012>
- [18] C.B. Hirschberger, *A Treatise on Micromorphic Continua, Theory, Homogenization, Computation*. UKL/LTM T 08-03 TU Kaiserslautern Kaiserslautern (2008)
- [19] C. Papenfuss, *Continuum Thermodynamics and Constitutive Theory*, Springer Cham (2020) <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43989-7>
- [20] A. Yavari, J.E. Marsden, M. Ortiz, On spatial and material covariant balance laws in elasticity, *Journal of Mathematical Physics* 47 4 (2006) 042903 <https://doi.org/10.1063/1.2190827>
- [21] J.D. Clayton, *Nonlinear Mechanics of Crystals*, Springer Dordrecht Heidelberg London New York (2011) <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0350-6>
- [22] A.L. Fradkov, Application of cybernetic methods in physics, *Physics – Uspekhi*, 48 2 (2005) 103–127. <https://doi.org/10.1070/pu2005v048n02abeh002047>
- [23] A.L. Fradkov, Horizons of cybernetical physics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 375 (2017) 20160223. <https://dx.doi.org/10.1098/rsta.2016.0223>
- [24] G. Bolzon, Advances in experimental mechanics by the synergetic combination of full-field measurement techniques and computational tools, *Measurement* 54 1(2014) 59–165. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.020>
- [25] G. Fedorko, V. Molnár, M. Vasiľ, R. Salai, Proposal of Digital Twin for Testing and Measuring of Transport Belts for Pipe Conveyors within the Concept Industry 4.0, *Measurement* 61 (2021) <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.108978>
- [26] F. Toussaint, L. Tabourot, P. Vacher, Experimental study with a Digital Image Correlation (DIC) method and numerical simulation of an anisotropic elastic-plastic commercially pure titanium, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 8 3 2008. 131–143. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60168-X](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60168-X)
- [27] B.D. Lucas, T. Kanade, An iterative image registration technique with an application to stereo vision, In: *IJCAI'81 Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Volume 2 August 1981. Morgan Kaufmann Publishers San Francisco (1981) 674–679.
- [28] P.W. Bridgman, *Studies in Large Plastic Flow and Fracture, With Special Emphasis on the Effects of Hydrostatic Pressure*, McGraw-Hill New York (1952)
- [29] Choung, J.M., Cho, S.R., Study on true stress correction from tensile tests, *Journal of Mechanical Science and Technology* 22 (2008) 1039–1051.
- [30] P. Ludwik, *Elemente der Technologischen Mechanik*, Springer Berlin (1909)
- [31] R. Gilmore, *Catastrophe Theory for Scientists and Engineers*, Dover Publications New York (1993)
- [32] R. Gilmore, *Catastrophe Theory*. In *digital Encyclopedia of Applied Physics*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2007) <https://doi.org/10.1002/3527600434.eap052.pub2>
- [33] V.S. Ivanova, *Synergetics. Strength and Fracture of Metallic Materials*, Cambridge International Science Publishing Great Abington (1998)
- [34] V.I. Arnold, *Catastrophe Theory*, Springer Berlin Heidelberg New York Tokyo (1984) <https://doi.org/10.1007/978-3-642-58124-3>
- [35] I. Stewart, Applications of catastrophe theory to the physical sciences, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2 2 (1981) 245–305. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(81\)90012-9](https://doi.org/10.1016/0167-2789(81)90012-9)
- [36] I. Stewart, Catastrophe theory in physics, *Reports on Progress in Physics*, 45 (1982) 185–221. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/45/2/002>
- [37] E.C. Zeeman, Bifurcation, Catastrophe, and Turbulence. In: P.J. Hilton, G.S. Young, (eds.) *New Directions in Applied Mathematics* Springer New York (1982) https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5651-9_7
- [38] L. Vitagliano, On Higher Derivatives as Constraints in Field Theory: A Geometric Perspective, *Journal of Geometrical Physics* 60 (2011) 1264–1283.

Mini-szakító próbatetek fejlesztése

Development of mini-tensile test specimens

Cinger Dávid^a, Hargitai Balázs^b, Csikos Kristóf Andor^c, Szenthe Ildikó^d

^aHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, kutató, cinger.david@ek.hun-ren.hu

^bHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, mérnök, hargitai.balazs@ek.hun-ren.hu

^cHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, mérnök, csikos.kristof.andor@ek.hun-ren.hu

^dHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, mérnök, szenthe.ildiko@ek.hun-ren.hu

Kulcsszavak

szakítás,
kis próbatet,
szabványosítás,
fejlesztés,
roncsolásos vizsgálat

Keywords

tensile,
small specimen,
standardization,
development,
destructive test

Absztrakt

A fúziós és fission anyagtudományi kutatások során látható az a tendencia, hogy ugyanazon mennyiségű anyagból, minél több információt tudjunk kinyerni. Ennek feltétele a próbatetek méretének csökkentése. Hat európai kutatóintézet vállalkozott arra, hogy az ASTM-E8/E8M szabványt kiegészítve egy keretrendszert alkosson meg a kis méretű próbatetek vizsgálatához. Fő feladat a vizsgálati előírások megalkotása a reprodukálhatóság és ismételhetőség tekintetében, az adatgyűjtés és a tapasztalatcsera a résztvevő laboratóriumok között.

Abstract

In fusion and fission material science research, the tendency to extract as much information as possible from the same amount of material can be seen. The condition for this is to reduce the size of the test specimens. Six European research institutes undertook to supplement the ASTM-E8/E8M standard and create a framework for testing small specimens. The main task is the creation of test specifications in terms of reproducibility and repeatability, data collection and the exchange of experience between the participating laboratories.

1. Bevezetés

A fúziós anyagtudományi kutatásokhoz használt és a jövőben használandó nagy neutronfluxussal dolgozó besugárzó helyek nyalábátmérője a néhány mm-től a néhány cm-ig terjed. Ennek folyományaként szükségessé vált a kis méretű – „small/sub-size specimen” – próbatetek használata. Hat európai kutatóhely vállalkozott arra, hogy egy szabványosított laboratóriumok közötti együttműködés keretében [1], egy új szabványmellékletet alkosson a kis méretű szakító próbatetek gyártás-, mérés-technológiájához, valamint a mérések kiértékeléséhez. Az EUROFUSION2 WPMAT-EDDI-SSTT szervezte körvizsgálatban résztvevő kutatóhelyek: UGR – University of Granada, CIEMAT – Center for Energy, Environmental and Technological Research, HUN-REN EK – Energiatudományi Kutatóközpont, KIT – Karlsruhe Institute of Technology, SCK-CEN – Belgian Nuclear Research Centre, UKAEA – United Kingdom Atomic Energy Authority, WUT – Warsaw University of Technology.

2. Kiválasztott anyag és próbatet geometriák

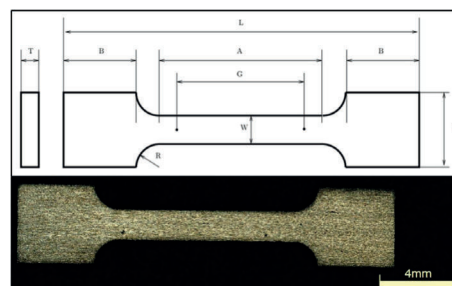
A laborok közötti teszt-sorozathoz egy európai referenciaanyag, a EUROFER97 került kiválasztásra. Ez egy RAFM (Reduce Activated Ferritic-Martensitic) acél, mely 9% krómot, 1% volfrámot tartalmaz. Az ötvözetben erősen redukálták azoknak az elemeknek a mennyiségét – pl.: Cu, Ti –, melyek a neutronsugárzás hatására erősen felaktiválódnak.

A projektben résztvevő kutatók megállapodtak abban, hogy három próbatettípuson végzik el a méréseket. Ezen próbatetek az EUROFLAT (1. ábra), SS-J3 (2. ábra) és az SCK-CEN (3. ábra). A próbatetek geometriai paraméterei az 1. táblázatban láthatóak. A próbatet méret minimalizálása és geometriai kialakítása során két feltétel került bevezetésre [2, 3]:

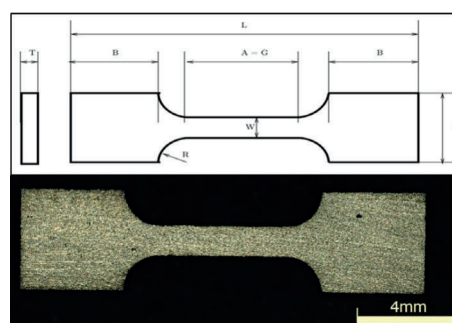
1. a vastagság és a szemcseméret aránya min. 10:1, amelynek oka, hogy az eredmények minél inkább a

polikristályos izotróp anyagjellemzőkhöz közelítsenek;

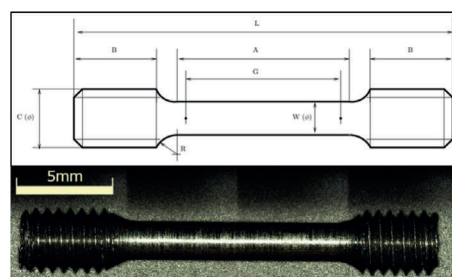
2. a Bertella-Oliver formula [4, 5] alapján a mérőhossz és a keresztmetszet négyzetgyökének hányadosa egy 5,65 körüli értéket vegyen fel, mivel hasonló arányszámmal dolgozik az ASTM és az ISO standard is.



1. ábra: EUROFLAT



2. ábra: SS-J3



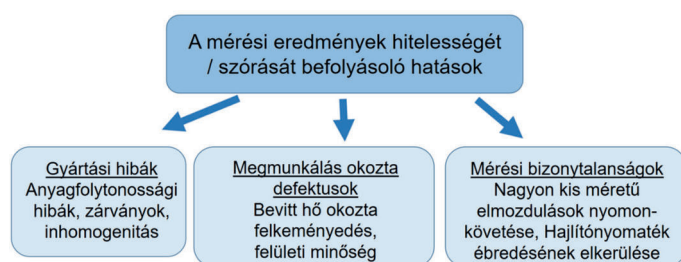
3. ábra: SCK-CEN hengeres

1. táblázat: Szakító próbatestek geometriai paramétere

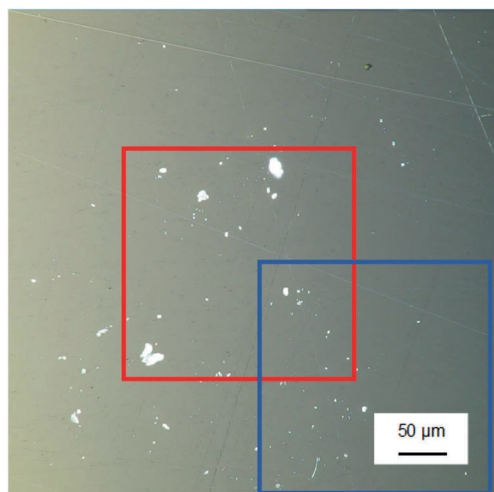
[mm]	EUFLAT	SCK-CEN	SS-J3	Tűrés
G – mérőhossz	7,2	7,1	5,0	0,00 -0,1
W – szélesség/átmérő	1,6	2,0	1,2	0,00 0,05
T – vastagság	1,0		0,75	0,00 0,05
R – rádiusz	1,3	2,0	1,4	0,05 0,00
L – teljes hossz	20,0	22,0	16,0	0,00 -0,1
A – a keskeny párhuzamos szakasz hossza	9,2	10,0	5,0	0,00 -0,1
B – fej hossza	4,1	4,1	4,1	0,00 -0,1
C – fej vastagsága/átmérője	4,2	3,5	4,0	0,00 -0,1

3. Kis próbatestek használatának hátrányai

Kis méretű próbatestek vizsgálata során a keresztmetszet csökkenése drámai hatással van a mérési eredmények szórására. Az eredmények szórását befolyásoló hatások a 4. ábrán láthatóak.

**4. ábra:** Befolyásoló hatások**Gyártási hibák:**

Minél kisebb a keresztmetszet, annál inkább felértékelődik a gyártás okozta folytonossági hibák és mikroszerkezeti anomáliák szerepe. Az egyik ilyen fontos jelenség a zárványosság. Szakító vizsgálat során uniaxiális terhelés éri a próbatestet, de a zárványok környezetében multiaxiális feszültség ébred. Jól látható az 5. ábrán (15H2NMFA

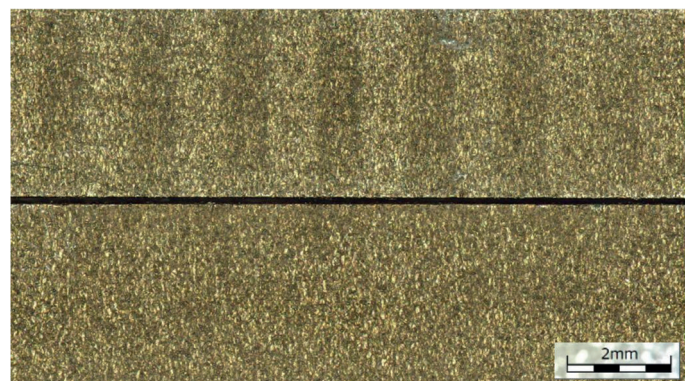
**5. ábra:** MnS zárványok 15H2NMFA acélban

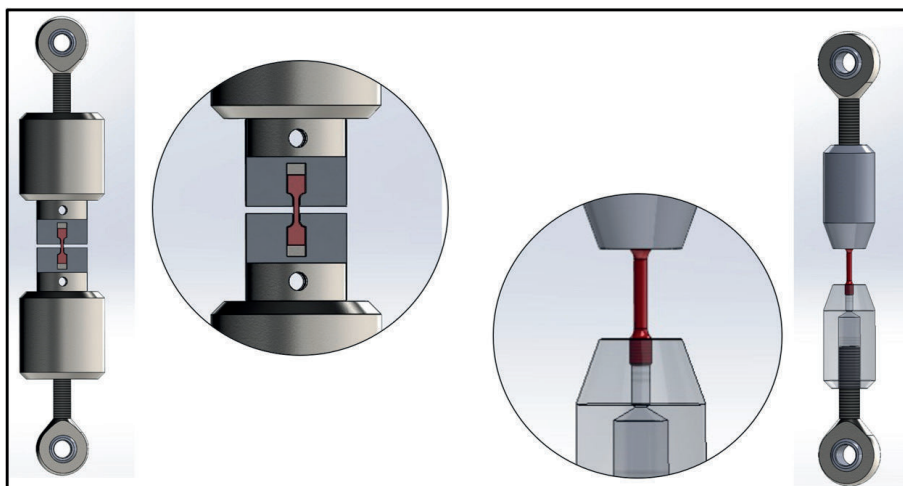
reaktor acél MnS zárványokkal), hogy a kék és a piros négyzetben a zárványok térfogataránya jelentősen eltér egymástól, így a mérési eredmények jelentős szórását okozzák.

A másik fontos gyártás okozta mikroszerkezeti inhomogenitás a vastag hengerelt lemezek keresztmetszetére merőlegesen (S irány) figyelhető meg. Ha vastag lemezből munkálunk ki kis méretű próbatesteket, szükséges vizsgálni az anyag S irány menti homogenitását, hogy eldöntsük, mely rétegből kell mintát készíteni, hogy redukáljuk méréseink szórását és hiteles anyagszerkezeti adatokat kapjunk, amik jellemzik az egész tömbi anyagot.

Mégmunkálás okozta defektusok:

A nagyon kis próbatest méret és a nagy pontosság precíziós gyártástechnológia alkalmazását követeli meg. Erre a legjobb berendezés a huzal szikraforgácsoló (wire-EDM). A technológia lényege, hogy a huzal és a fémes anyag közötti ívkisülések segítségével végzi az anyag forgácsolását. Kis térfogatmennyiséget olvaszt meg (6. ábra), majd párologtat el miközben a huzal halad az anyagban. Az ötvözet anyagától, valamint a forgácsolási paraméterektől függően nagyon eltérő felületi minőséget érhetünk el (7. ábra). A mégmunkálás során törekedni kell az elérhető legjobb felületi minőségre és a bevitt hő minimalizálására, mivel a bevitt hő hatására a ferrit-martenzites acélok hajlamosak a felkeményedésre.

**6. ábra:** Olvadt fémgyöngyök a vágási felületen**7. ábra:** Wire-EDM felületi minőségek



8. ábra: Önbeálló befogók

Méréstechnikai bizonytalanságok:

Kis méretű szakító próbatestek esetén nagyon kis méretű elmozdulásokat kell nagy felbontással nyomon követni. A piacon jelenleg nincs olyan kontakt-extenzométer, ami teljesen megfelel a kívánalmaknak, ezért mindenképpen szükséges lézer-extenzométer vagy valamilyen optikai mérőrendszer használata.

A másik méréstechnikai bizonytalanság a legtöbb szakítógép esetében fennáll. A befogó szerszámok nincsenek teljesen egy tengelyben, így a próbatestben káros hajlítónyomaték ébred. Ennek kiküszöbölésére önbeálló befogó szerszámok (gombcsuklóval ellátott) használata szükséges (8. ábra). Ezen túlmenően szükséges biztosítani a befogás során a lapos próbatestek nyakánál az egyenletes feszültségeloszlást. Ehhez huzalszikraforgácsoló segítségével nagy pontosságú betétek készíthetők, tulajdonképpen a próbatestek negatívjai.

Gyártási és méréstechnikai ajánlások:

Olyan próbatestgeometria kialakítása, mely megfelel az alábbi paramétereknek: 1) a vastagság és a szemcse-méret aránya min. 10:1; 2) a Bertella-Oliver formula alapján a mérőhossz és a keresztmetszet négyzetgyökének hányadosa egy 5,65 körüli értéket vegyen fel. A tömbi anyagon történjen keménységmérés az S irányban és a próbatestek fején, ellenőrizve, hogy a gyártás során nem okoztuk-e a próbatest felkeményedését. A legyártott próbatesteken nagyfelbontású optikai elemzést kell végezni

felületi minőségellenőrzés céljából. A mérés során önbeálló befogó használata szükséges a hajlítónyomaték ébredésének elkerülésére. Minden mérést részletes – elektronmikroszkóppal kiegészült – fraktográfiai elemzésnek kell követnie. Eldöntendő, hogy az anyagban lévő inhomogenitások befolyásolhatták-e a mérési eredményeinket. A fentebb említetteken túlmenően a kis keresztmetszetből adódó nagyobb mérési szórás miatt a standard 2-3 próbaszámot javasoljuk minimum 5-re emelni. Az összességében nagyobb tesztelt keresztmetszetarány redukálja az eredmények szórását.

4. Összefoglalás

A jövőben a fúziós anyagtudományi kutatások egyik sarokköve lesz a próbatestméret miniaturizálása. Más nemzetközi együttműködés kisméretű törésmechanikai próbatestek fejlesztésén fáradozik. A fentebb leírt és ehhez hasonló kutatóhelyek közötti körmérések fogják megválaszolni a kispróbatestes méréstechnikák felmerülő kérdéseit és határozzák meg használhatóságuk limitjét. Végső soron alapot adnak új szabványok, kódok kidolgozásához.

Irodalomjegyzék

- [1] ASTM 691-22 «Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method»
- [2] Zheng, P., Chen, R., Liu, H., Chen, J., Zhang, Z., Liu, X., & Shen, Y. (2020). On the standards and practices for miniaturized tensile test—a review. *Fusion Engineering and Design*, 161, 112006. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112006>
- [3] Gussev, M. N., Howard, R. H., Terrani, K. A., & Field, K. G. (2017). Sub-size tensile specimen design for in-reactor irradiation and post-irradiation testing. *Nuclear Engineering and Design*, 320, 298-308.
- [4] Kohno, Y., Kohyama, A., Hamilton, M. L., Hirose, T., Katoh, Y., & Garner, F. A. (2000). Specimen size effects on the tensile properties of JPCA and JFMS. *Journal of nuclear materials*, 283, 1014-1017.
- [5] Gussev, M., Busby, J., Field, K., Sokolov, M., & Gray, S. (2015). Role of scale factor during tensile testing of small specimens. In *Small Specimen Test Techniques: 6th Volume*. ASTM International.

Feszültségintenzitási tényező összefüggésének meghatározása hibrid CT próbatesthez

Determination of the correlation of the stress intensity coefficient for a hybrid CT test specimen

Spisák Bernadett^a, Szávai Szabolcs^b

^aBay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., senior kutató, bernadett.spisak@bayzoltan.hu; Miskolci Egyetem, tanársegéd

^bBay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., divízió igazgató, szabolcs.szavai@bayzoltan.hu

Kulcsszavak

hibrid CT próbatest,
feszültségintenzitási tényező,
végelem szimuláció,
feszültségkorróziós repedés

Keywords

hybrid CT specimen,
stress intensity factor,
finite element simulation,
stress corrosion cracking

Absztrakt

Az atomerőművekben a feszültségkorróziós repedés az egyik legfontosabb károsodási folyamat. Mérésére három fő módszer létezik, az állandó elmozdulás (CD), az állandó terhelés és a lassú alakváltozási sebességű vizsgálat, amely a legelterjedtebb, de nagyon drága, és az atomerőművekre jellemző üzemi körülményeket nehéz megvalósítani benne. Ezért olyan kísérleti elrendezés lett kifejlesztve, ahol az atomerőművekben jelen lévő üzemi körülmények több, kis kapszulában tarthatók fenn. Ezzel a CD vizsgálatok megvalósíthatók, de a berendezés mérete miatt új próbatest tervezése szükséges, amelyen az előrepesztés és az előfeszítés elvégezhető. Ehhez a kettős konzolos és a kompakt szakító próbatestek előnyeit kombináltuk. Ez a cikk ismerteti a feszültségintenzitási tényező meghatározására szolgáló képlet létrehozásának lépéseit erre az új hibrid próbatestre.

Abstract

Stress corrosion cracking is one of the most important damage processes in nuclear power plants (NPPs). There are three main methods for measuring it, the constant displacement (CD), the constant load and the slow strain rate test, which is the most common but very expensive and difficult to achieve the operating conditions typical of NPPs. Therefore, an experimental set-up has been developed where the operating conditions present in the steam generator can be maintained in several small, pressurized capsules. In this way, CD tests can be performed, but the size of the apparatus requires the design of a new test specimen on which the preload and precracking can be performed. For this the advantages of double cantilever and compact tensile specimens have been combined. This paper describes the steps to create a formula to determine the stress intensity factor for this new hybrid specimen.

1. Bevezetés

Egy komoly problémát jelentő károsodási folyamat, a feszültségkorróziós repedés terjedésének előrejelzése bizonytalanságai még napjainkban is kihívást jelentenek az atomerőműi berendezések megbízhatósági valószínűségének meghatározásakor. A nehézséget a jelenség összetettsége és az azt befolyásoló számos tényező természetes bizonytalansága okozza. A feszültségkorróziós repedés vizsgálatára a szakirodalom több módszert is javasol igazolva azt, hogy egységes álláspont még nem alakult ki az ipar egyetlen szegmensében sem. Ezek közül a három fő vizsgálati módszer az állandó elmozdulásos, az állandó terheléses és a lassú alakváltozási sebességű (SSRT) vizsgálat. A legszélesebb körben az SSRT technikát alkalmazzák, azonban ehhez egy relatíve drága berendezés szükséges, továbbá az atomerőműveknél jellemző magas nyomás biztosítása, állandó értéken történő tartása is nehezen kivitelezhető. Ezáltal az [1]-es szakirodalomban már ismertetett új típusú méréshez egy olyan próbatest kialakítására volt szükség, amelyen egyszerűen elvégezhető annak előrepesztése és előfeszítése is. Ehhez a kettős konzolos (DCB) és a kompakt szakító (CT) próbatesteket tekintettük kiindulási alapnak.

Az új hibrid CT próbatest esetében az egyik fő probléma, hogy nem szabványos kialakítású, ezáltal annak érdekében, hogy a próbatest előfeszítése megfelelően elvégezhető legyen, szükség van egy rá vonatkozó feszültségintenzitási tényező (K_I) meghatározására szolgáló formulára. A következő fejezetekben ezen képlet kifejlesztéséhez szükséges lépések kerülnek bemutatásra.

2. CT és DCB próbatestek

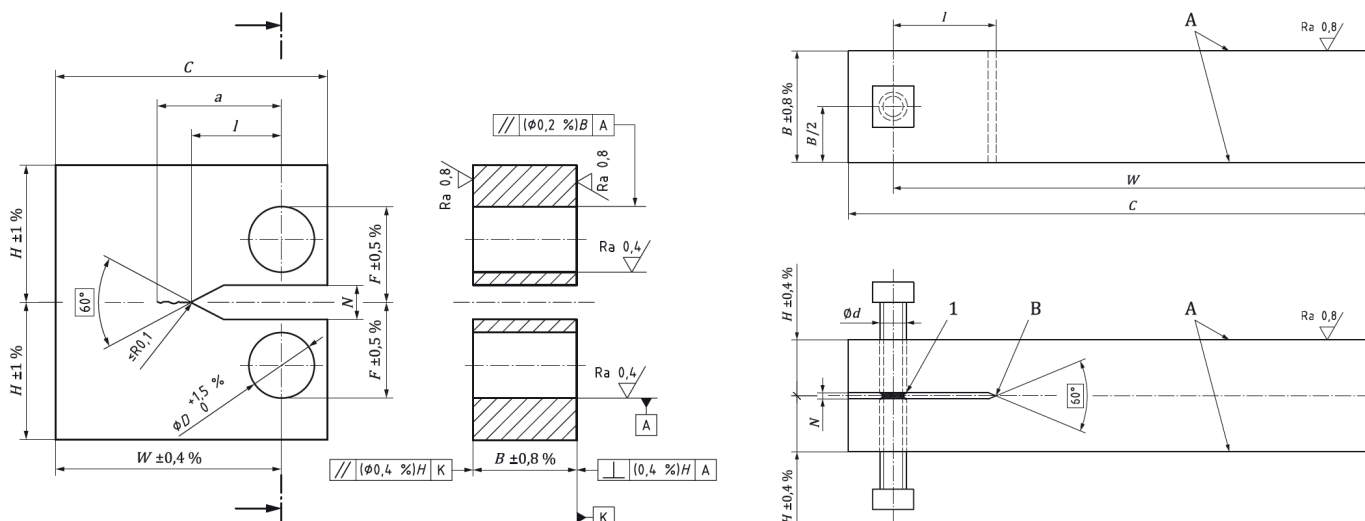
A feszültségkorróziós repedés (SCC) vizsgálatára szolgáló ISO 7539-6:2018 szabvány [2] CT és DCB

próbatestek geometriai kialakítását az 1. ábra szemlélteti. Továbbá az ábrán szereplő betűjelölések jelentéseit az 1. táblázat tartalmazza, amely alapján a CT próbatestnél az összes méret a nettó szélesség függvényében adható meg, míg a DCB próbatest esetében a legfontosabb paraméter a próbatest félmagassága. Továbbá a DCB próbatestnél megjegyzendő, hogy az A felületeknek adott esetben 0,002H-n belül merőlegesnek és párhuzamosnak kell lenniük, minden oldalsó pontnál a B felületnek 0,001H pontossággal egyenlő távolságra kell lennie a felső és az alsó felülettől, a csavar középvonalának 1°-on belül merőlegesnek kell lennie a próbadarab középvonalára és végezetül a csavar anyagának hasonlóan kell lennie a mintadarab anyagához, és finom menettel, négyszögletes vagy imbuszos csavarfejjel kell rendelkeznie.

2.1 Hibrid CT próbatest kialakítása

Az SCC vizsgálatok a VEIKI Energia+ Energetikai Fejlesztő, Kivitelező Kft. által biztosított autokláv berendezésben végezhetőek el. A feszültségintenzitási tényező-repedésterjedés diagram meghatározásához előrepesztett próbatestet célszerű alkalmazni, azonban a berendezés miatt hagyományos CT próbatesteken nem volt kivitelezhető a mérés, ezáltal először a DCB próbatestet választottuk.

Végelem szimuláció segítségével, illetve analitikus számítással meghatározható, hogy az adott anyagból készült DCB próbatestek esetében milyen előfeszítési erő szükséges. A hosszú ($L=90\text{ mm}$) DCB próbatestek esetében a kívánt maximális feszültségintenzitási tényező ($K=35\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) eléréséhez szükséges erő mértéke (14000 N) meghaladta az előfeszítésre alkalmazott berendezés által létrehozható erő maximális értékét (6000 N), ezáltal a próbatest hosszának a csökkentésére volt szükség, így a szimulációkat elvégeztük 80, 75, 70, 65 és 60 mm hosszú DCB próbatesteken is.



1. ábra: Próbatest kialakítások a ISO 7539-6:2018 szabvány alapján
a) CT próbatest;
b) DCB próbatest

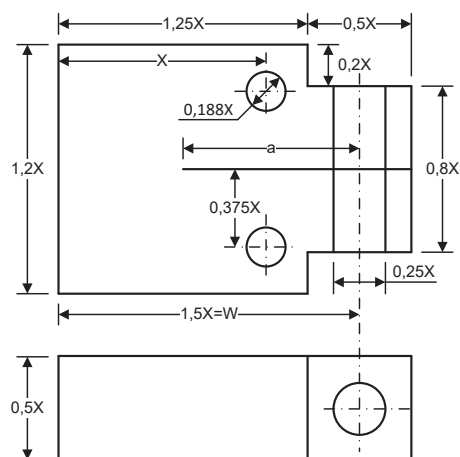
1. táblázat: Próbatestek geometriai jelölései

CT próbatest			DCB próbatest		
Jelölés	Megnevezés	Nagyság	Jelölés	Megnevezés	Nagyság
W	Nettó szélesség	-	1	Csavarcsúcs sugara	12,5 és 50 mm között
C	Teljes szélesség	minimum 1,25W	H	Félmagasság	-
B	Vastagság	0,5W	B	Vastagság	2H
H	Félmagasság	0,6W	W	Nettó szélesség	minimum 10H
D	Furat átmérő	0,25W	C	Teljes hossz	W+d
F	A furatok külső szélei közötti féltávolság	1,6D	d	Csavar átmérő	0,75H
N	Bemetszés szélessége	0,065W	N	Bemetszés szélessége	0,14H
l	Effektív bemetszés hossza	0,25W-0,4W	l	Effektív bemetszés hossza	2H
a	Effektív repedéshossz	0,45W-0,55W			

A 60 és a 65 mm hosszú próbatestek esetében az előfeszítés hatására nem csak a repedéscsúcs környezetében jött létre képlékeny alakváltozás, hanem a próbatest ligament részében is, amely a repedéscsúcs és a próbatest hátlapja közötti távolságot jelenti.

További problémát jelentett az előfeszítéshez a csavarok elhelyezése. Mivel a mérőberendezés belső átmérője adott volt, ezáltal a próbatest előfeszítésének a módja került módosításra. Ennek eredményeképpen a 2. ábrán szemléltetett módosított dimenziókat határoztuk meg, amely során annak érdekében, hogy a lehető legnagyobb mértékben alkalmazható legyen a későbbiekben a CT és DCB próbatestekre vonatkozó leírások, az ezekre előírt méretkorlátok figyelembe lettek véve. Látható, hogy az előreperesztés elvégzéséhez a CT próbatest kialakításához hasonlóan a modell tartalmaz egy furatot, amelybe a befogócsap beilleszthető. Illetve az előfeszítés elkészítéséhez egy furat lett kialakítva, ahol az előfeszítés súllyesztett fészekben belső kulcsnyílású csavarral elvégezhető.

A tervek szerint a módosított kialakítás 1T, 0,5T, 0,25T és 0,16T méretekben alkalmazhatók, amelyek nagyságát a 2. táblázat mutatja be.



2. ábra: Hibrid CT próbatest dimenziói

2. táblázat: Hibrid CT próbatest dimenziói

Arányszám	1T	0,5T	0,25T	0,16T
1,5W	75	37,5	18,75	12
1,25W	62,5	31,25	15,63	10
1,2W	60	30	15	9,6
W	50	25	12,5	8
0,8W	40	20	10	6,4
0,5W	25	12,5	6,25	4
0,375W	18,75	9,4	4,7	3
0,25W	12,5	6,25	3,2	2
0,2W	10	5	2,5	1,6
0,188W	9,4	4,7	2,35	1,5

2.2 CT és DCB próbatestekre vonatkozó feszültségintenzitási tényező összefüggése

A vizsgálathoz szükséges előfeszítésekhez négy terhelési szint került kiválasztásra (15, 20, 30, 35 MPa√m). Annak érdekében, hogy az ezekhez szükséges terhelési erő megfelelően legyen beállítva szükséges volt a hibrid CT próbatestre vonatkozó feszültségintenzitási tényező meghatározására szolgáló összefüggés. Ehhez első lépésként az CT és a DCB próbatestre vonatkozó formulák kerültek elemzésre.

A CT próbatesthez tartozó feszültségintenzitási tényező meghatározására vonatkozó képlet a szabvány alapján a következő alakban írható fel:

$$K_I = \frac{P}{B \cdot W^{1/2}} \cdot \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[0,886 + 4,64 \left(\frac{a}{W}\right) - 13,32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \quad (1)$$

ahol P a terhelés nagysága. E kifejezés pontatlansága a $0,2 \leq a/W \leq 1,0$ tartományban legfeljebb $\pm 0,5\%$.

A DCB próbatesthez tartozó feszültségintenzitási tényező meghatározására vonatkozó képlet a szabvány alapján pedig a következő alakban írható fel:

$$K_I = \frac{E \times V_{yLL} H \sqrt{3H(a + 0,6H)^2 + H^3}}{4[(a + 0,6H)^3 + H^2a]} \quad (2)$$

ahol V_{yLL} az elhajlás a terhelési pont tengelyénél és E a rugalmassági modulus. A kifejezés a $2 \leq a/H \leq 5$ tartományban alkalmazható.

A képletekből látható, hogy a DCB próbatest esetében a feszültségintenzitási tényező független az a/W értéktől, azonban a hibrid kialakítás esetében az előrepszítés folyamata teljes egészében a CT próbatesthez hasonlóan végezhető el, továbbá alakja is leginkább a CT próbatestre hasonlít, ezért a hibrid próbatest esetén a CT próbatestre jellemző képlet került átalakításra.

3. Feszültségintenzitási tényező leírására szolgáló összefüggés meghatározása

A hibrid CT próbatestre alkalmazható feszültségintenzitási tényező leírására szolgáló összefüggés meghatározása

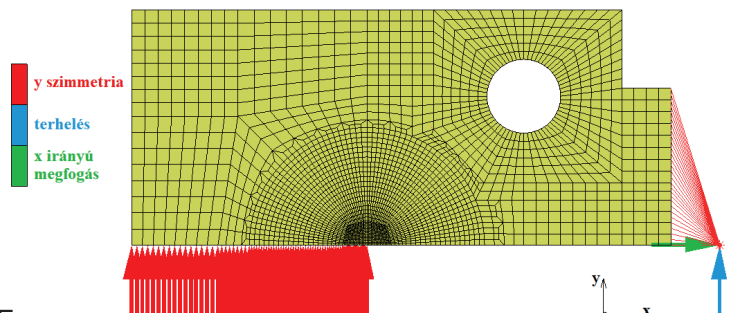
több lépésből tevődik össze, amelyek a következők:

- Végeelem szimulációk elvégzése különböző a/W arányok, próbatest méretek esetében annak érdekében, hogy a feszültségintenzitási tényező az erő függvényében ábrázolható legyen.
- A meghatározott görbékre felület illesztése, és az adott alakú formula ismeretlen paramétereinek meghatározása a különböző próbatest méretekhez.
- Paraméterek egységesítése annak érdekében, hogy a meghatározott feszültségintenzitási tényezőre alkalmazható összefüggés mindegyik próbatest méret esetén használható legyen.

A következőkben az előbb felsorolt lépések kerülnek részletesen ismertetésre.

3.1 Végeelem szimuláció

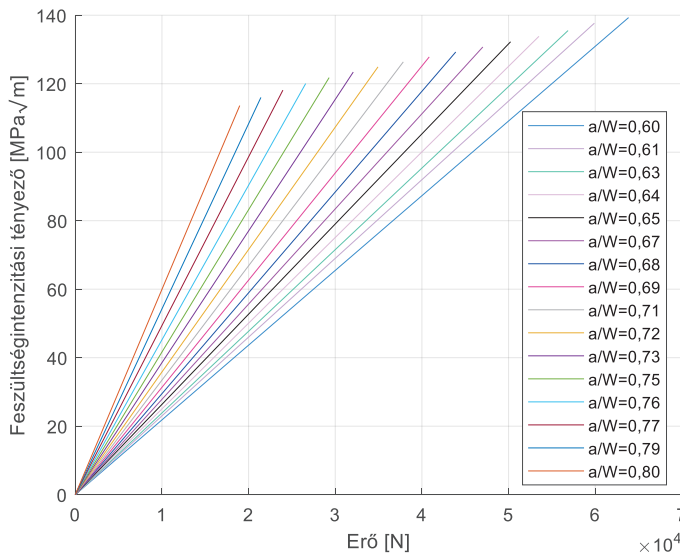
A feszültségintenzitási tényező leírására szolgáló egyenlet létrehozásához végeelem szimulációkat végeztünk el az MSC.Marc Mentat szoftverben, 2D-s síkalakváltozás modellrel és a lineárisan rugalmas anyagmodell alkalmazva rá. Ehhez 205 GPa-t határoztunk meg a rugalmassági modulusnak, és 0,3-et a Poisson-tényezőnek. Peremfeltételnek egy y irányú szimmetria feltételt, egy x irányú megfogást és terhelésként y irányú elmozdulást adtunk meg. Ezeket a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra: Alkalmazott peremfeltételek

Ezt követően a repedés hosszának a tartományát kellett meghatározni. A CT próbatest esetében az 1. ábrán szemléltetett W mérethez viszonyítva az a/W aránynak 0,45 és 0,55 közé kell esnie. Ezt figyelembe véve a 2. ábrán látható próbatest esetében az a/W arányt 0,6 és 0,8 közé vettük fel. Összesen 16 db a/W arány esetén végeztük el a szimulációkat.

A szimulációk eredményeképpen a feszültségintenzitási tényező értéke adott a/W arány esetén meghatározható. Összegezve a szimulációkból kapott feszültségintenzitási tényező-erő görbéket a 4. ábra mutatja be, ahol a görbék egy-egy a/W értékhez tartoznak.



4. ábra: Hibrid 1T CT próbatétel feszültségintenzitási tényezője a terhelési erő függvényében

3.2 KI formula meghatározása hibrid 1T CT próbatétel esetében

A következő lépésben a szimulációból kapott görbékre a CT próbatesteknél alkalmazott (1)-es képlet alakjában illesztettünk felületet. Ehhez a Matlab szoftvert alkalmaztuk, amely segítségével görbék és felületek illeszthetők adott adathalmazokra. Ehhez az úgynevezett "fit", illesztési funkció használható, amelynél a következő modell típusok különböztethetők meg:

- Lineáris és nemlineáris regresszió: Görbék vagy felületek illesztése lineáris és nemlineáris előre definiált modellekkel és egyéni egyenletekkel.
- Interpoláció: Interpoláló görbék vagy felületek illesztése, ismert adatpontok közötti értékek becslése.
- Simítás: illesztés simító görbék és lokalizált regresszió segítségével, adatok simítása mozgóátlaggal és más szűrőkkel.
- Illesztés utófeldolgozása: Ábrázolás, kiugró értékek, maradékok, konfidenciaintervallumok, validálási adatok, integrálok és deriváltak meghatározása.

A lineáris és a nemlineáris regresszió esetében a következő modellek közül lehet választani: polinomiális modellek, exponenciális modellek, Fourier-sorozat, Gauss-modellek, teljesítménysorozat, racionális polinomok, szinuszok összege modellek, Weibull-eloszlások, egyéni modellek.

Mivel az eszköztár könyvtára nem tartalmazta a kívánt parametrikus egyenletet, ezért egy saját egyéni egyenletet hoztunk létre, amelynek az (1)-es egyenlet alapján a következő alakot adtuk meg:

$$K_I = \frac{P}{B \cdot W^{1/2}} \cdot \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[b + c \left(\frac{a}{W}\right) + d \left(\frac{a}{W}\right)^2 + e \left(\frac{a}{W}\right)^3 + f \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right], \quad (3)$$

amelyből a b, c, d, e és f paraméterek meghatározása volt a cél.

Az adatok illesztésekor a legkisebb négyzetek módszerét használtuk. Az illesztéshez egy parametrikus modellre van szükség, amely a válasz adatokat egy vagy több együtthatóval kapcsolja az előrejelző adatokhoz. Az illesztési folyamat eredménye a modell együtthatóinak becslése, amely során a legkisebb négyzetek módszere a maradékok összegzett négyzetét minimalizálja. A legkisebb négyzetek illesztésnek további típusai különböztethetők meg, amelyek a következők:

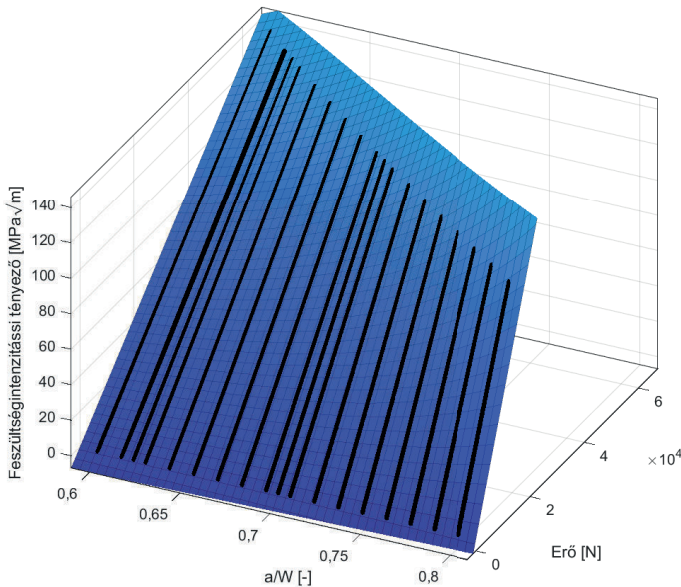
- lineáris legkisebb négyzetek,
- súlyozott lineáris legkisebb négyzetek,
- robusztus legkisebb négyzetek,
- nemlineáris legkisebb négyzetek.

Ezek közül mivel az általunk választott egyenlet nemlineáris, ezért a nemlineáris legkisebb négyzetek módszert alkalmaztuk.

A nemlineáris modelleket nehezebb illeszteni, mint a lineárisakat, mivel az együtthatókat nem lehet egyszerű mátrixtechnikákkal becsülni. Ehelyett iteratív megközelítésre van szükség, amely az alábbi lépéseket követi:

1. Az egyes együtthatók kezdeti becslése: Egyes nem lineáris modellekhez heurisztikus megközelítés adható meg, amely ésszerű kiindulási értékeket eredményez. Más modellek esetében a [0,1] intervallumon belüli véletlen értékeket szükséges megadni.
2. Az aktuális együtthatókra illesztett görbe elkészítése.
3. Együtthatók beállítása, és annak megállapítása, hogy javul-e az illeszkedés. A kiigazítás iránya és nagysága az illesztési algoritmustól függ. Az eszköztár biztosítja ezeket az algoritmusokat:
 - Megbízhatósági régió - Ez az alapértelmezett algoritmus, és akkor használható, ha együttható korlátok vannak megadva. A nehéz nemlineáris problémákat hatékonyabban tudja megoldani, mint a többi algoritmus.
 - Levenberg-Marquardt - Ezt az algoritmust már évek óta használják, a nemlineáris modellek és kiindulási értékek széles skáláján a legtöbbször bevált módszer. Ha a bizalmi régió algoritmus nem eredményez ésszerű illeszkedést, és nincsenek együtthatói megkötések, akkor érdemes a Levenberg-Marquardt algoritmust alkalmazni.
4. Folyamat ismétlése a 2. lépéshez való visszatéréssel addig, amíg az illesztés el nem éri a megadott konvergenciakritériumokat.

Ezen ismereteket figyelembe véve elvégeztük a hibrid 1T CT próbatestnél meghatározott görbékre a felületillesztést, amelyet az 5. ábra szemléltet.



5. ábra: Hibrid 1T CT próbatess K-F görbéire illesztett felület

3.3 Feszültségintenzitási tényező leírására szolgáló összefüggés

Az előző alfejezetben bemutatott módszert a többi próbatess méret (0,5T, 0,25T és 0,16T) esetén is alkalmaztuk. Majd ezt követően a program segítségével meghatároztuk mindegyik dimenzióánál az egyes paramétereknél (b, c, d, e, f) megengedhető minimális és maximális értéket, továbbá ezek átlagát. Ezen értékeket a 3. táblázat ismerteti.

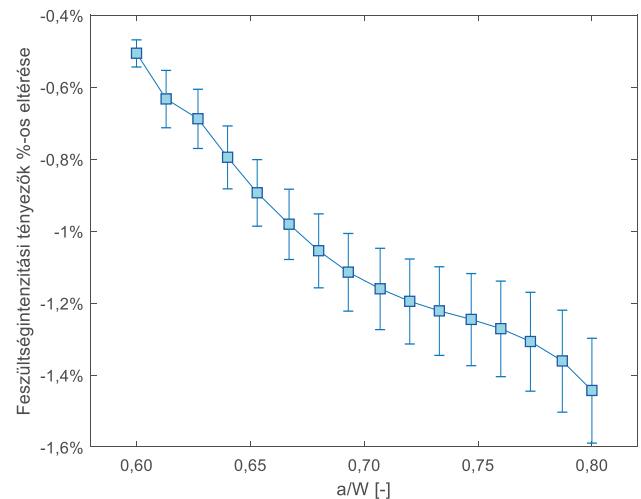
3. táblázat: A (3)-as egyenlet paramétereinek illesztett értékei

Paraméter	Minimum				Maximum				Átlag			
	1T	0,5T	0,25T	0,16T	1T	0,5T	0,25T	0,16T	1T	0,5T	0,25T	0,16T
b	-0,151	-0,212	-0,225	-0,225	-0,046	-0,102	-0,103	-0,083	-0,098	-0,157	-0,164	-0,153
c	0,819	1,137	1,145	1,145	1,427	1,766	1,848	1,836	1,123	1,451	1,497	1,431
d	-3,520	-4,229	-4,412	-4,412	-2,207	-2,872	-2,897	-2,632	-2,863	-3,551	-3,654	-3,508
e	2,367	2,983	3,010	3,010	3,622	4,280	4,459	4,425	2,994	3,631	3,735	3,589
f	-1,345	-1,574	-1,639	-1,639	-0,897	-1,110	-1,121	-1,026	-1,121	-1,342	-1,380	-1,325

Végezetül annak érdekében, hogy a feszültségintenzitási tényező meghatározására alkalmazható képlet mindegyik próbatess méret esetén használható legyen, szükség volt a paraméterek egységesítésére. Ezen célból a paraméterek minimális értékei közül a maximális értéket, míg a maximális értékei közül a minimális értéket vettük, így biztosítva, hogy a képlet minden méretű próbatess esetén alkalmazható, majd meghatároztuk ezen két érték átlagát. Ezáltal a (3)-as egyenlet átalakításával a feszültségintenzitási tényező a terhelési erő és az a/W arány függvényeként a következő alakban írható fel:

$$K_I = \frac{P}{B \cdot W^{1/2}} \cdot \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[-0.1273 + 1.286 \left(\frac{a}{W}\right) - 3.2085 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 3.316 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 1.233 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]. \quad (3)$$

Az így kapott képlet megfelelőségének az ellenőrzésére az egyes dimenziók esetében meghatároztuk a feszültségintenzitási tényező értékét, ahol a bemenő paraméterként a szimulációból kapott erő értékeket használtuk fel. Ezt követően vettük a szimulációval és a képlettel meghatározott feszültségintenzitási tényező értékeket, és meghatároztuk ezek százalékos eltérését, amelyet a szimulációból származó eredményhez hasonlítottunk. Az egyes dimenziók esetében a 4. táblázat mutatja be, hogy mely a/W értéknél volt a legnagyobb az értékek közötti különbség.



6. ábra: Hibrid 1T CT próbatess esetén képlettel és szimulációval meghatározott feszültségintenzitási tényezők százalékos eltérése

4. táblázat: A (3)-as egyenlet paramétereinek illesztett értékei

Paraméterek	1T	0,5T	0,25T	0,16T
a/W	0,8	0,8	0,8	0,8
K _{szimuláció}	0,2842	0,4019	0,5684	0,7105
K _{képlet}	0,2797	0,3955	0,5593	0,6991
Százalékos eltérés	-1,59	-1,59	-1,59	-1,60

A táblázat jól szemlélteti, hogy a legnagyobb eltérés mindössze 1,6%. Tovább elemezve az adatokat, a 6. ábra a képlet és szimuláció segítségével meghatározott feszültségintenzitási tényezők százalékos különbségét szemlélteti az a/W arány függvényében, 1T próbatest esetében. Ebből jól látható, hogy a képlettel meghatározott értékek minden esetben alul becsülik a végelem analízisből származó eredményeket. Továbbá minél magasabb az a/W értéke, annál nagyobb az eltérés tartománya, amely a 0,5T, 0,25T és 0,16T méretű próbatesteknél jobban kirajzolódik. 0,6 a/W esetében a különbségek mindössze 0,08%-os tartományban mozognak, míg 0,8 a/W esetén ez az érték 0,29%-ra növekszik. Hasonló tendenciát mutattak a 0,5T, a 0,25T és a 0,16T méretű próbatestek is.

Azonban megállapítható, hogy ezen értékek elenyésző különbséget jelentenek, ezáltal a képlet a hibrid CT próbatest esetében jól alkalmazható a feszültségintenzitási tényező meghatározására. Ezáltal a későbbiekben adott erőhöz tartozó feszültségintenzitási tényező meghatározása végelem szimuláció nélkül is lehetséges.

4. Összefoglalás

A cikkben bemutatásra került egy, – a szakirodalomban eddig nem említett – olyan új típusú törésmechanikai próbatest, amely alkalmas a feszültségkorróziós repedés terjedésének a vizsgálatára, és a CT és a DCB típusú kialakítások előnyeit foglalja magába. Ezáltal a próbatest előrepsztése és előfeszítése is egyszerűen kivitelezhető. A próbatest előfeszítésének egyszerűsítése érdekében meghatározásra került 1T-0,16T közötti méretarányok és 0,6-0,8 a/W arányok esetében a próbatestre vonatkozó feszültségintenzitási tényező képlete.

Irodalomjegyzék

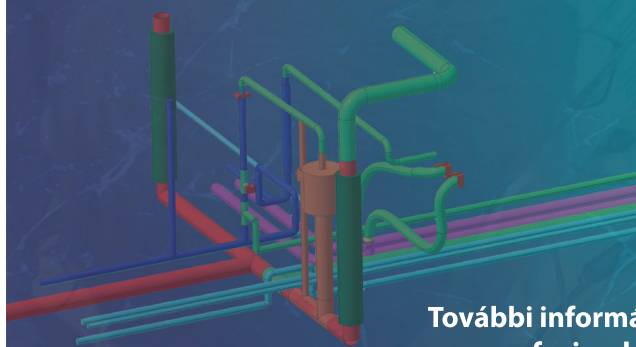
- [1] Spisák B., Szávai Sz., Gál A.: Feszültségkorróziós repedés vizsgálata egyedi próbatesttel, Anyagvizsgálók Lapja 4 pp. 18-23., 6 p. (2021)
- [2] ISO 7539-6:2018: Corrosion of metals and alloys stress corrosion testing — part 6: Preparation and use of precracked specimens for tests under constant load or constant displacement



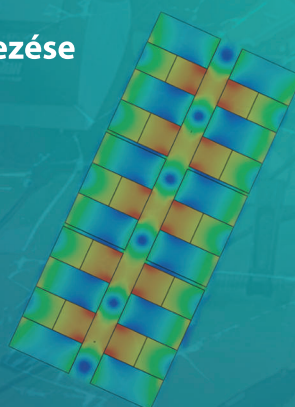
A CEFusion Kft. a HUN-REN Energiatechnikai Kutatóközpont kutatói és mérnökei által újonnan alapított spin-off vállalkozás. A vállalkozás célja, hogy olyan mérnöki és technológiai területeken nyújtson szolgáltatásokat és fejlesszen eszközöket, amelyek Magyarországon kevésbé ismertek. Ezen területek főként kutatási infrastruktúrák és „Big Science” projektek során kerülnek előtérbe, tipikusan ilyenek mondhatók a nemzetközi fúziós kutatások, amely a vállalkozás szakmai hátterét adja.

A CEFusion Kft. főbb tevékenységei:

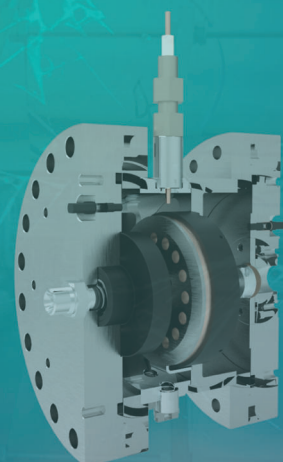
- Kriogén rendszerek mérnöki tervezése és építése
- Vákuumrendszerek, vákuumkamrák tervezése és gyártása
- Nagynyomású, nagy térfogatáramú gyorszelepek fejlesztése és gyártása
- Mechanikai és mágneses végelem analízis
- Összetett kutatás-fejlesztési projektek kivitelezése



További információért:
www.cefusion.hu



info@cefusion.hu



Fissziós reaktorok anyagainak európai kutatási irányai

European research topics in fission reactor materials

Napjainkban a minél több energiát minél hatékonyabban felhasználni igyekvő gazdaságpolitika számára nélkülözhetetlennek tűnik a fissziós energia alkalmazása. Kevés kivétellel az atomenergia felhasználása világszerte része az energiapalettának és a "zöld átmenet" részének tekintik. Elterjedtek az ún. II. generációs energiatermelő atomreaktorok, nagy részük azonban a tervezése idején „tervezési üzemidőként” meghatározott üzemidején már jelentősen túllépett. Az újonnan épülő energiatermelő reaktorok többsége III. generációs reaktornak tekinthető, amelyeket továbbfejlesztett biztonsági rendszerekkel, 60 éves üzemidőre terveznek. A jelenleg működő, illetve a tervezés és a kivitelezés alatt álló reaktorok többségénél a biztonságos üzemeltetéssel kapcsolatos kérdések nagyon hasonlóak. Ezek integrált keretrendszerben történő vizsgálatára alapították Európában a NUClear GENeration II & III Alliance – röviden **NUGENIA** nemzetközi non-profit szervezetét 2011 novemberében. A



NUGENIA küldetése a II. és III. generációs nukleáris létesítmények biztonságával kapcsolatos európai kutatások koordinálása és integrálása a biztonságos, hosszú távú működés magas szintű biztosítása érdekében, integrálva a magán- és állami erőfeszítéseket. A NUGENIA 2012 óta a Fenntartható Nukleáris Energia Technológiai Platform, Sustainable Nuclear Energy Technology Platform – röviden **SNETP** ernyője alatt működik.



Tagjai között találhatók állami szervezetek, kutatóközpontok és iparági képviselők, mint pl. a spanyol CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) kutatóközpont, a német KIT (Karlsruhe Institute of Technology) kutatóközpont, az EON, a Rolls Roys, a Westinghouse, tiszteletbeli tagként például az Európai Bizottság is. Magyar részről tagja a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. (továbbiakban: BAY), MVM Paks Atomerőmű Zrt. és a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont (továbbiakban: HUN-REN EK).

A NUGENIA munkája 8 technikai tématerületen (Technical Area, TA) belül oszlik meg: TA1. Üzembiztonság és kockázateértékelés; TA2. Súlyos balesetek; TA3. Atomerőművek fejlett üzemeltetése; TA4. Rendszerek, szerkezetek és komponensek integritásértékelése; TA5. Hulladék- és kiégett fűtőelemek kezelése és leszerelés; TA6. Innovatív reaktor tervezés és technológia, üzemanyagok, TA8. Üzem közbeni ellenőrzés és roncsolásmentes vizsgálat.

A negyedik tématerület, a TA4 foglalkozik azokkal a szerkezetekkel, alkatrészekkel és anyagokkal kapcsolatos értékelésekkel, amelyek fontos részét képezik az atomerőmű-gazdálkodási programoknak és szükségesek a hatékony időszakos biztonsági felülvizsgálatokhoz. A figyelembe vett szempontok közé tartoznak a szerkezeti

integritás teljes életciklusra kiterjedő értékelése, a különböző tönkremeneteli mechanizmusok, az öregedéskezelés, a biztonsági határok és a harmonizációs kérdések. Vizsgálja azokat a biztonság és a rendelkezésre állás szempontjából fontos szerkezeteket és komponenseket, amelyek cseréje magas költségeket igényel, és amelyek jelentős hosszú távú felújítási program nélküli cseréje nem megoldható. Ide tartoznak azon alkatrészek is, mint pl. a műszerezés és a vezérlés, amelyek a biztonság szempontjából rendelkeznek nagy jelentőséggel. Ehhez a szakterülethez kapcsolódik szorosan a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Fűtőelem- és Reaktoranyagok Laboratóriuma Reaktoranyagok kutatócsoportjának tevékenysége. A kutatócsoport számos olyan projektben vett és vesz részt jelenleg is, amelyet részben vagy egészben az Euratom programok finanszíroznak. Az Euratom az Európai Unió Horizon Europe kutatási és innovációs finanszírozási programjának kiegészítéseként futó, a nukleáris kutatásra és innovációra kiterjedő program, amelynek költségvetése 1,38 milliárd euró az új program végrehajtására a 2021. január 1. és 2025. december 31. közötti időszakra. A kutatási programjavaslatok esetében kiemelkedő fontosságú az SNETP – NUGENIA pecsét (label) megszerzése. A projektekhez azok kidolgozása, tervezési részében lehet csatlakozni, ezért fontos tudni, milyen témájú javaslatok indulnak az adott időszakban. Idén az aktuális SNETP – NUGENIA – TA4 tématerület megbeszélését június 27-29. között a nagy-britanniai Sheffieldben, az "NDE in Nuclear", a fissziós érintettséggű roncsolásmentes vizsgálatok konferenciával együtt rendezték meg. Célja a különböző projektek áttekintése, az eredmények terjesztése, az új projektötletek megvitatása és a következő kiírásokra benyújtandó javaslatok racionalizálása volt. A megbeszélésen elhangzott témajavaslatok egyben iránymutatást adnak az érintett kutatási terület, az üzemelő atomerőművek szerkezetintegritási értékelésének jelenlegi kihívásaival kapcsolatban és a következő időszak kutatási irányairól.

A megbeszélés két napos volt. Az első nap az SNETP – NUGENIA céljáról, általános kutatási irányairól, a jövőképről és a stratégiáról, a témák portfóliójáról, általános szervezeti kérdésekről zajlott a megbeszélés. A résztvevők bemutatták a folyamatban lévő, már támogatást elnyert projektekben végzett munkáikat, az elért eredményeket.

A STRUMAT-LTO: (STRUctural MATerials research on parameters influencing the material properties of RPV steels for safe Long Term Operation of LWR NPP's) projektet M. Kolluri, Nuclear Research & Consultancy Group (továbbiakban: NRG) ismertette. A projekt célja az atomerőművek biztonságos, hosszú távú üzemeltetéséhez felhasznált reaktortartály acélok öregedési tulajdonságait befolyásoló paraméterek kutatása. A nyomottvízes



reaktorok hosszú távú működésének egyik kritikus kérdése a reaktortartály szerkezeti anyagainak – főként a neutronbesugárzás által okozott – elöregedése. A projekt a reaktoracélok hosszú távú üzemeltetés során, a neutron fluxus és fluens hatására bekövetkező elridegedésével foglalkozik. Az projekt során elvégzett anyagvizsgálatok eredményei felhasználhatók az öregedési modellek érvényességének vizsgálatára 60+ éves üzemidő esetén, továbbá kispóbateszt vizsgálati technológiák fejlesztésére a felügyeleti programokhoz kapcsolódóan. Az eddigi eredmények igazolják a vizsgált acél fajták Nikkel és Mangán tartalmának szinergikus hatását a sugárkárosodott acélokban. Igazolódott, hogy a termikus lágyítás visszaállítja a besugárzott anyagok kezdeti szakítószilárdságát. A projekt koordinátora a HUN-REN EK és az NRG, magyar résztvevő még a BAY Zoltán Kutatóintézet.

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): A projekt célja a nyomottvízes reaktorok hosszú távú működés szempontjából leginkább érintett és veszélyeztetett komponenseik meghatározása, a termikus öregedés hatásának és az anyag duzzadásának leírása, követése roncsolásmentes vizsgálatok alkalmazásával, valamint egy olyan szimulációs eszköz kifejlesztése, amely képes előre jelezni az anyag állapotának öregedését. A projekt első éve alatt a kritikus elemek felmérését, vizsgálatukhoz rendelkezésre álló anyagok kigyűjtését, az elvégzendő vizsgálatok mátrixának kidolgozását és a kapcsolódó szabványok, kódok, előírások összegzését végezték el. A projekt résztvevői magyar részről a HUN-REN EK és a BAY Zoltán Kutatóintézet.



ENTENTE (European Database for Multiscale Modelling of Radiation Damage): Európai adatbázis a sugárkárosodás többskálás modellezéséhez. Az eddig elvégzett munkát a szabványok referenciaesetein keresztül mutatták be: "ASME Code Case N-830-1: use of the KJc 95% lower bound master curve indexed using T0 directly", "ASME Code Case N-914 Accounting for the Effect of Embrittlement on Fracture Toughness Properties Used in Evaluations of Pressure Boundary Materials in Class 1 Ferritic Steel Components, Section XI, Division 1" alapként használva az EPRI jelentését: "EPRI-R-3002010332-MRP-418 Use of Master Curve For Pressure-Retaining Materials". A projekt résztvevője magyar részről a Bay Zoltán Kutatóintézet (BZN).



OFFERR (eurOpean platform For accessing nuclear R&d facilities): Európai platform a nukleáris K+F tudományos infrastruktúrákhoz való hozzáféréshez. Az OFFERR ezt az Euratom kutatási és képzési programja által biztosított pénzügyi támogatások csatornáján keresztül fogja elérni, amely a Horizont Európa



nukleáris kutatásra és innovációra vonatkozó kiegészítő finanszírozási programja. Kétféle pályázat várható, Fast Track (<50k euró és <6 hónap) és komplex (>50k euró, <1,5 év).

ORIENT-NM (Organization of the European Research Community on Nuclear Materials): A három éves projekt alatt a résztvevők egységes jövőképi stratégiai kutatási menetrendet dolgoztak ki a nukleáris anyagokkal kapcsolatban a reaktorok minden generációja számára 2040-ig.



INCEFA-SCALE (INcreasing safety in NPPs by Covering gaps in Environmental Fatigue Assessment – focusing on gaps between laboratory data and component SCALE): A projekt a laboratóriumi vizsgálatok és a gyakorlatban nyert adatok közötti szakadék megszüntetésére összpontosít, kísérleti és analitikai módszereket alkalmazva.



NUCOBAM (NUclear COmponents Based on Additive Manufacturing): A 4 éves projekt célja az „additive manufacturing” anyagok üzem közbeni viselkedésének értékelése, a minősítési folyamatok fejlesztése. A projekt a továbbiakban a nukleáris iparban felhasználható additív gyártású 316L acél minősítésére összpontosít.



A második napon a pályázatokat készítő koordinátorok a tervezett új projektekről számoltak be:

ICARUS+ (Improved Component integrity Assessment for structural Safety; koordinátor: Teknologia Kutimuskus VTT OY - röviden VTT): A projektjavaslat célja a szerkezetintegritás témakörében, öregedéskezelésre alkalmas, a tönkremenettel kapcsolatos mechanizmusokat: pl. a másodlagos feszültségeket és törést nyomkövető és kezelő local approach (LA) megközelítésű szimulációs és modellező eszköz fejlesztése, használata hosszú távú üzemelés (LTO) esetén, standardizálás. A munka első része az adatok összegyűjtése mechanikai vizsgálatok alapján, majd a törés modellezése, maradó feszültségek, Post Weld Heat Treatment (PWHT) hatásának vizsgálata.

STRUMAT-LTO+ (koordinátor: HUN-REN EK és az NRG): a fentebb ismertetett, jelenleg futó STRUMAT-LTO projekt folytatása, cél a besugárzott reaktortartály anyagok mechanikai és mikroszerkezeti jellemzőinek meghatározása további hőkezelés, illetve besugárzás után, ennek alapján a tönkremetel nagy fluenciáknál is érvényes modelljének kidolgozása, a modell alkalmazhatóságának definiálása a reaktortartály szerkezetintegritási vizsgálatához LTO körülmények között. További fókusz tevődik a reaktortartály plattírozásának szerepére a kifejlesztésre kerülő új modellben. A projekt során további anyagbesugárzást és hőkezelést terveznek elvégezni: 4-6

ciklust a HFR-ben (High Flux Reactor), esetleg a budapesti Kutatóreaktorban, majd az anyagok mechanikai, mikroszerkezeti vizsgálatát, kiemelt figyelmet fordítva a plattírozás anyagára. Tervezik a más projektek, mint pl. az ENTENTE, FRACTESUS, stb. adatbázisából nyert adatok átfogó értékelését, a magas neutronfluenciáknak megfelelő modell validálását LTO esetére, a mestergörbe modell kiterjesztését a szerkezetintegritási vizsgálatokhoz. A projekt tervezett futamideje 4 év 2024 szeptemberétől, kb. 5 millió euró támogatással.

MARISSA (Methods for Assessment of RPV Integrity During a Severe Accident; koordinátor: UJV REZ, a.s., UJV): A reaktortartály szerkezetintegritási vizsgálata külső hűtés megvalósulása esetén: cél a repedés kialakulásának modellezése "local approach" módszerrel, a törés várható idejének és helyének szimulálása, a keletkező corium vizsgálata Lumped Parameter (LP) és Computational Fuel Dinamic (CFD) kódok együttes használatával, esetleg az Accident Source Term Evaluation Code (ASTEC) kód alkalmazásával. A projekt tervezett ideje 2024. márciusától 4 év, 5 millió euró támogatással.

INDEED (Intelligent non-destructive in-service inspection tool for early detection of operation-induced material degradation in reactor pressure vessels; koordinátor: Fraunhofer Institute for Nondestructive Testing IZFP, Fraunhofer IZFP): A mágneses tulajdonságok és a Charpy átmeneti hőmérséklet közötti kapcsolatot kereső NOMAD – „Nondestructive Evaluation (NDE) System for the Inspection of Operation-Induced Material Degradation in Nuclear Power Plants” projekt folytatása. A NOMAD projektben két intézet, a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont és a Fraunhofer kutatóintézet vizsgálata adott eredményt, azonban csak két fluenciára, amely így nem alkalmas trendgörbe meghatározására. A tervezett projekt során több fluencián vizsgálják a két NDE mérési módszer alkalmasságát, keresve a mérések mögötti fizikai jelenségeket, a mikroszerkezeti hátteret. Az adatok elemzését mesterséges intelligencia felhasználásával végzik, a két mérési módszer integrálásával mérő mérőműszer kifejlesztésére készülnek. A 4 éves projekt 2024-től indulna, az igényelt támogatás 5 millió euró.

FIND (Future Instrumentation and coNtrol based on innovative methods and Disruptive technologies for higher safety level; koordinátor: Institute for Radiation Protection and Nuclear Safety, IRSN): A reaktortartályt és reaktor-belső szerkezeti elemek vizsgáló rendszer fejlesztése, amely folyamatos működéssel alkalmas a szerkezetek

integritásának vizsgálatára, a biztonsági rendszerek folyamatos monitorozásával nyomon kísérve a károsodás mértékét, egyben előre jelezve a tönkremenetelt is. Lehetséges irány a mágneses mérések felhasználása. A pályázatban igényelt támogatás 5 millió euró.

CONNECT-NM (Coordination of the European Nuclear Materials Community for Energy Innovation, koordinátor Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT), az ORIENT-NM alapjaiból tovább épülő, európai partnerségen alapuló együttműködés, amely legkevesebb 5 évig az atomenergiára összpontosító anyagtudományi kutatások folytonosságát hivatott biztosítani, optimalizálni az erőforrásokat, a „megfigyelés és minősítés” paradigmáról a „tervezés és ellenőrzés” irányába fókuszot váltva.

ISAHEL (Improved Safety Assessment of High Energy Lines for Leak and Break; koordinátor: VTT): primerköri elemek emelt szintű biztonsági elemzése: törés és lyukadás. A projekt részeként valós körülmények között végzett kísérleteken keresztül tervezik vizsgálni a nagy terhelésű csővezeték lyukadását, törését, ezek keletkezésének folyamatát, kiegészítve a mért adatok alapján történő modellezéssel és szimulációval.

EmbrACE (Healing of thermal and radiation embrittled components by controlled annealing comprehensive exploration; koordinátor: BZN) A reaktortartály anyag öregedését okozó hő hatásának azonosítása, elkülönítése a neutronbesugárzás által okozott öregedés hatásától. Ehhez a jelenleg rendelkezésre álló tapasztalatok összegzése, analízisa, majd hőkezelési kísérletek végzése, a kísérletek értékelése, modellezés. A hőterhelés hatása LTO esetén, kódokba építése. A kutatás tervezett időtartama 4-5 év, 2024-es indulással, a tervezett költség 6,5 millió euró, max. 75%-os intenzitástámogatás mellett.

A tervezett projektjavaslatok nagy része kapcsolódik a jelenleg már működő reaktorok 60 éven túli biztonságos üzemeltetéséhez, a primerköri rendszerek, reaktortartály integritásának témaköréhez. Javaslat hangzott el a reaktor zónájával kapcsolatos tudás kiterjesztésére, ez irányú kutatási témák indítására. Bár a javaslatok beadásának határideje ez év novembere, a felvetett témajavaslatok a következő évek kutatási irányait is előrevetítik, így az elhangzott projektötletek ismerete a hazai kutatóműhelyek csatlakozását is elősegítheti.

Szenthe Ildikó

Reaktoranyagok kutatócsoport vezető, HUN-REN EK

Pungor Ernő születésének Centenáriuma For the Centenary of the Birth of Ernő Pungor

Vasszécseny, 1923. október 30. Ez áll Pungor Ernő születési anyakönyvi kivonatában. A pusztán tények sokunkban több-kevesebb személyes emlékeket idéz fel a memória különböző rétegeiből. Bizonyára vannak olyanok is, akiknél nem csupán néhány személyes élmény, hanem ennek sorozataként emlékképek folyama, gondolatok idéződnek fel egy nagyszerű szakember, egy kiváló ember, egy barát, társasági lény, közéleti személyiség kapcsán. Az éppen egy évszázada született Pungor Ernő lénye természetesen úgy villan fel mindenkiben, ahogyan meg- és átélte személyes találkozásait, azok gyakoriságát. Életéről sokan és nagy terjedelemben írtak. Nem sok olyan mozzanata van, amely ilyen vagy olyan formában nem került volna már a köztudatba. Csupán a kíváncsiságtól irányítva a GOOGLE keresőbe beütve nevét, 14.800 találatot kaptam. Sok ez vagy kevés?? A feltett „költői kérdés” megválaszolása kapcsán biztosan kialakulhatna egy vita, mert az emberi gondolkodásmód ilyen. Két dolog viszont biztos. Nem célom a kapott információkat áttekinteni, rendszerezni és egy idősorban a Tisztelt Olvasók elé tárni. A másik biztos tény, hogy a „képtalálatok” között megjelent annak az életrajzi ihletésű könyvnek címlapja¹,



Bay Zoltán Pungor Ernő otthonában (1986)²

amelyet közösen készítettünk. E könyvet mindenki szabadon letöltheti és biztosan hozzájut olyan információkhoz, amelyek árnyalják a Pungor Ernőről alkotott véleményét. A GOOGLE „képtalálatait” nézegetve egy 2018-ban készült fénykép az „IDŐKAPSZULA” hasított igazán belém és indított el bennem egy gondolatsort. Ezen ugyanis a „Bay Zoltán non-profit kutatási struktúra” alapításának 25 éves évfordulójára emlékeznek. Próbáltam felkeresni a fénykép jogtulajdonosát, de próbálkozásaim sikertelennek bizonyultak. Így fordulok a „saját merevlemezemhez”, ahol igazán sok részlet található meg a Pungor Ernő által megálmodott és a „Fraunhofer Gessellschaft” mintája alapján 1993-ban „megszületett” Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Alapítvány létrejöttének körülményeiről. Pungor Ernő ekkor 70 évesen az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság (OMFB) elnöke volt Antall József miniszterelnöksége (1990.05.23.-1993.12.12.) idején. A lábjegyzetben hivatkozott önéletrajzi könyvhöz csupán egyetlen forrásértékű fénykép miatt fordulok. Ennek 57. oldalán látható az 1986-ban Pungor Ernő lakásán készített Bay Zoltán (1900-1992) felvétel, mely igazán baráti kapcsolatra utal.

A hazai kutatási struktúrák már-már követték a nemzetközileg elfogadottakat (ipari, egyetemi és volt szocialista országokban meglevő akadémiai rendszert), de hiányzott a részben piaci érdekeltségű nonprofit működésű. Pungor Ernő tárcanélküli miniszterként és az OMFB elnökeként rendelkezett olyan súllyal, hogy 1993-ban mindezt elindíthatta. Kezdődött ez azzal, hogy Szeged, Miskolc és Budapest egyetemeiről javasolt nagyszámú – eredményes kutatómunkát végző – oktató-kutató szakembereket, akiket a mintaintézményhez, a Fraunhofer Gessellschaft központjába és a tervezett hazai profilok intézményeibe 6 hét időtartamú tanulmányútra küldött német támogatással. Visszatérve a tapasztalatokat meghallgatta a német nagykövet és az MTA elnökével együtt és az Antall-kormánytól az induláshoz kapott támogatással létrehozta intézeteit: Szegeden a biotechnológiához (1993. szeptember, BAY-BIO), Miskolcon a gyártástechnikai és logisztikai témakörhöz (1993 decembere, BAY-LOGI) kötődve, ill. Budapesten az anyagtudományi témakörben (1995, BAY-ATI). Hazánkban az 1990-es évek gazdasági környezetének változását – mondhatni mesteri módon – ki- és felhasználva erősödött meg a non-profit struktúra (lásd életrajzi könyvének 76. oldalát). Éppen a könyvére támaszkodva nagyon nem szeretnék ismétlésekbe bocsátkozni, így csupán néhány eddig nem igazán ismert tényt szeretnék megemlíteni, hiszen az alapítás 30. évét november 2-án ünneplő Bay-struktúra részese lehettem – különböző pozíciókban - folyamatosan az elmúlt 30 évben.

¹ Pungor E.: Ifjan—Éretten—Öregem. Beszélgetőtárs: Tóth L. 2003. <https://mek.oszk.hu/html/vgi/kereses/keresesujgy.phtml?tip=gyors&cim=ifjan>

² A magyarok szerepe a világ természettudományos és műszaki haladásában. Budapest. 1986. augusztus 4-9. Elnöke: Pungor Ernő, díszelnökei: Bay Zoltán, Berend T. Iván, Bognár József, Fock Jenő, Horváth Csaba, Kovács Ervin, Láng István, Merszei Zoltán, Pál Lénárd, Székér Gyula, Szentágothai János, Tétényi Pál, Wigner Jenő.



Pungor Ernő a BAY-LOGI alapításának 10. évfordulóján (2003)

2003-ban egy nemzetközi rendezvénnyel ünnepelte a BAY-LOGI alapításának tízéves évfordulóját. Ezen részt vett a minta, a Fraunhofer Gessellschaft elnöke is. Pungor Ernő megnyitóját a fenti fénykép örökítette meg.

A BAY-LOGI-val szorosan együttműködő Miskolci Egyetem rektora, Kovács Ferenc akadémikus közvetlenül nem tudott részt venni a rendezvényen, így megkért, hogy gondolatait tolmácsoljam a résztvevők számára. Ebből emelném ki a következő részletet:

„A jubileumi ülés keretében, megragadom az alkalmat, hogy a konferencia nyilvánossága előtt köszöntsem a gondolat atyját, az intézet alapítóját, Pungor Ernő professzor urat a közel-múltban volt 80. születésnapja alkalmával is.

A Bay Zoltán Alapítvány létrehozása ugyancsak olyan jelentős tett volt, ami nehezen értékelhető túl. Ennek során a budapesti központ létrehozása mellett a vidéki kutató bázisok (Miskolc, Szeged) létrehozása olyan tett volt, ami az általában megszo-



Pungor Ernőt köszönti Boros Péter volt miniszterelnök, valamint Medgyessy Péter miniszterelnök

az intézetre, intézetekre, hanem a munka irányításában való személyes részvételével súlyt adott a végzett munkának.

Pungor professzor születésnapja alkalmával a nagy nyilvánosság előtt ismert kitüntetéseihez szívből gratulálok. További támogatását kérve, munkájához erőt, egészséget kívánok, nagy tisztelettel és ha megengedhetem magam barátsággal.”



A Magyar Érdemrend nagykeresztjét veszi át Pungor Ernő a Magyar Köztársaság elnökétől, Mádl Ferenc-től és a kitüntetett a kitüntetésével



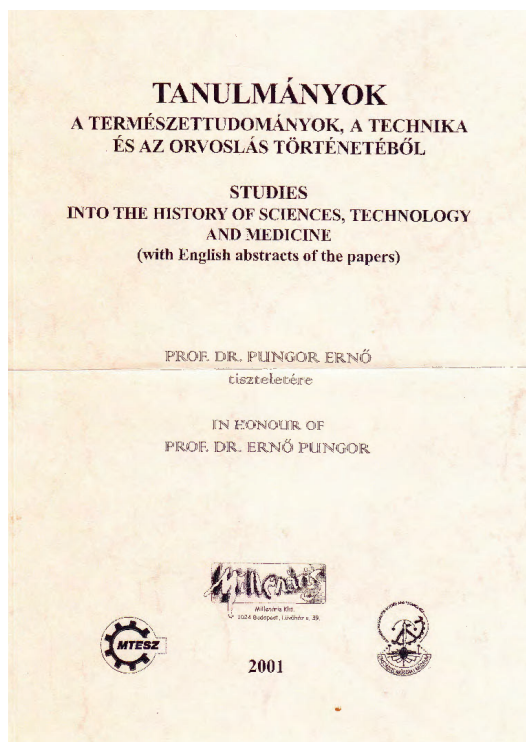
A BAY-LOGI alapításának 10. évfordulója idején a 80. születésnapját ünneplő Pungor Ernő 2003-ban vehette át a magyar állam által adományozható második legnagyobb kitüntetését, a Magyar Érdemrend nagykeresztjét³ Mádl Ferenc Köztársasági Elnöktől a Sándor Palotában.

A kitüntetettet köszönti Boros Péter – akinek Antall József halála utáni miniszterelnökének kormányában Pungor Ernő tárcanélségi miniszter volt – Medgyessy Péter, aki 2002 és 2004 szeptembere között töltötte be a miniszterelnöki posztot.

³ Wikipédia: A Magyar Érdemrend nagykeresztje: https://hu.wikipedia.org/wiki/A_Magyar_Érdemrend_nagykeresztje (Megtekintés dátuma: 2023.11.11.)

Ha még néhány pillanatot szeretnék kiragadni Pungor Ernő életéből, akkor csupán felsorolás szerűen álljon itt:

- Az évente megszervezett tudománytörténeti előadássorozatok 2001. évi konferenciáját Pungor Ernő tiszteletére rendezték:



Pungor Ernő tiszteletére szervezett tudománytörténeti konferencia kiadványa

- A már hivatkozott életrajzi ihletésű könyvről jómagam is igen sok és nagyon pozitív visszajelzést kaptam. Ezeket is célszerű lenne egyszer csokorba szedni, mert igazán számos olyan visszajelzés is olvasható ezekben, amelyek ilyen vagy olyan formában árnyalják, kiegészítik mindazt, amit egy eseménydús életről tudunk. Ezen visszajelzések közül szemléltet egyet az alábbi:

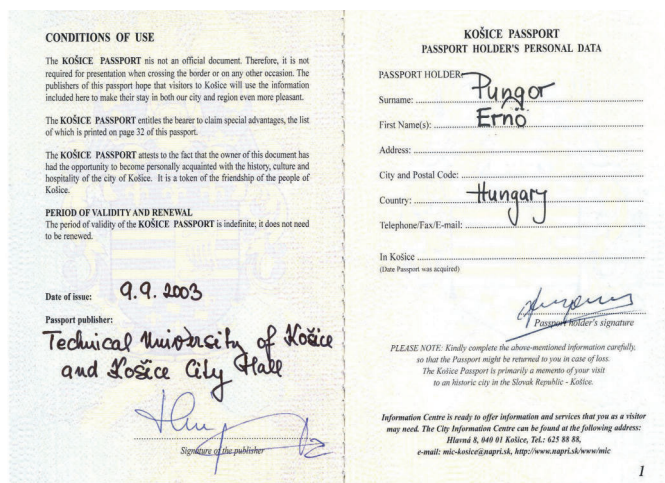
Kedves László,
ebben a pillanatban érkezett meg a könyv(ek) és kinyitottam. Aztán belenéztem itt, belenéztem ott, és azon kaptam magam, hogy elolvasgatom a drága munkaidőt!
Így letettem hogy megköszönjem: nagyon sok ismert személy és adat meg a közös idők, emlékek teszi számomra izgalmassá a "történetet" ami persze egy kis magyar történelem is.

Professzor úrnak üdvözlétem (mindenkorra érvényes) és Önnek valamint szeretteinek Kellemes Karácsonyt valamint Békés Boldog Újesztendőt kívánok:

Bádonfai Judit

Bádonfai Judit visszajelzése Pungor Ernő könyvéről

- De talán ide kerülhet Pungor Ernő 80. születésnapján megkapott „Kassa Útleve” is, amelyen a képeken látható kitüntéseket is átvehette.
- Folytathatnám a felsorolásokat Pungor Ernő utazásairól. Mindegyikről VIDEO felvétel is készült, amelyekből csodálatos tájak, jellegzetes lakosok, élethelyzetek kerülhetnének bemutatásra. Ezen



7. ábra: Pungor Ernő Selmezbányai kitüntetése és a Kassai Műszaki Egyetem kitüntetése



Pungor Ernő Selmezbányai kitüntetése és a Kassai Műszaki Egyetem kitüntetése

centenárium megemlékezésben maradunk csupán a meglátogatott országok abc szerinti felsorolásában: Anglia, Argentína, Ausztria, Brazília, Dél-Afrika, Egyiptom, India, Irak, Izrael, Japán, Kína, Mexikó, Svájc, Thaiföld, USA kiegészítve egy Ausztráliában tett körúttal.

A természet azonban mindnyájunk számára egyformán dönt. Hogy kit és mikor, hány napot át- és megélve irányít a véges és végtelen határvonalának átlépésére az

egyedi, de megkerülhetetlen. Pungor Ernőnek 1923. október 30. és 2007 július 13-ig (e napon későn este 23:02-kor csukta le örökre a szemét), így 28.015 napot biztosított számára a Sors, amelyet példás szorgalommal és nehezen megismételhetően ki is használt. Temetésén többek között Dr. Várszegi Asztrik pannonthalmi főapát búcsúztatta.

Temetését követően sokan megemlékeztek eredményes tevékenységéről, túlszűfolt életéről, emberi karakteréről, munkásságának egyes részleteiről, a Pungor Katalin és Pungor András, ill. Pungorné Horváth Tünde által megalapított Pungor Ernő-díjról. Ezt legutóbb 2022-ben Péntek Kálmán vehetett át.

Tóth László

Emlékek Bay Zoltánról

Memories of Zoltán Bay

1986 januárjától 1987 decemberéig az Amerikai Egyesült Államokban a George Washington Egyetem (Washington D.C.) vendégprofesszora voltam. Ezen az egyetemen kezdte amerikai pályáját két magyar tudós: Teller Ede 1935-ben, valamint Bay Zoltán 1949-ben. A tanítás és kutatás mellett igyekeztem minél több amerikai nevezetességet meglátogatni, és minél több embert, főként amerikai magyar emigránsokat megismerni.

1986-ban húsvét ünnepe március végén volt. Az egyetemen több napos szünet volt, így elhatároztam, hogy a családommal New Yorkba kirándulunk. Beszéltem egyetemi évfolyamtársammal, aki Yorktown Heights-ban az IBM Kutató Központjában dolgozott és családi házukban – célzatos unszolásomra – szíves vendéglátást ajánlott fel négyünknek. Pár nap alatt meg tudtuk látogatni a kötelező turisztikai látványosságokat, a később földig rombolt WTC, Világkereskedelmi Központ két monumentális épületét, az Empire State Buildinget, ezeknek a tetején is voltunk, elhajózáztunk a Szabadság szoborhoz, amit Marci fiam elnevezett „Sztettyú av Libödi”-nek, ahogy az amerikaiak a „Statue of Liberty”-t ejtik. Voltunk a Central Parkban és felkerestük a Püski könyvesboltot.

A könyvesboltban amerikai tartózkodásunkról, a népi írókról, paraszti sorsból fizikussá válásomról beszélgetve Ilus néni megkérdezte, hogy ismerem-e Bay Zoltánt. Mondtam, hogy a nevét ismerem, tudok a Hold-radar-visszhang kísérletéről, de többet nem nagyon tudnék róla mondani, különben is szakmailag nagyon kicsi ember vagyok én hozzá képest, hogy jönnék én ahhoz, hogy egy ilyen nevezetes tudóst személyesen zavarjak ismeretség kezdeményezésével. Ilus néni szerint igenis meg kell vele személyesen ismerkednem, hiszen Bay Zoltán is dolgozott a George Washington Egyetemen és ott lakik Chevy Chase-ben, nem messze a lakásunktól. Egy otthonról jött fizikus nem jelenthet zavarást és én el sem tudom képzelni, hogy Bay Zoltán mennyire közvetlen modorú, barátságos és kedves ember. Szinte rám parancsolt, hogy „keresd meg, hívd fel, itt van a telefonszáma, meg a lakásának a címe”. Visszatérve Washingtonba írtam egy rövid bemutatkozó levelet, feladtam és pár napon belül csengett a telefonunk, Bay Zoltán kíván velem találkozni. 1986 nyarán többször volt alkalmam beszélgetni Zoltán bácsival és feleségével, Duci asszonnyal, aki a feleségemet közeli barátságába fogadta. Asszonyok közt könnyebben alakul ki barátság, én szerény értékeim tudatában Zoltán bácsi iránt mindvégig mély tiszteletet, a tudásának és saját kútfejéből fakadt kivételes tudományos eredményeinek kijáró csodálatot éreztem. Munkatársaival itthon, a Tungfram izzólámpagyár laboratóriumában találta fel a fotoelektron sokszorozót, majd a háború utáni nyomorúságos körülmények között 1946-ban végezték el a Holdról a radarvisszhang kísérletet. 1949 után az Amerikai Egyesült Államokban dolgozott, szinte végletekig finomította az időtartamnak és a fénysebességnek a mérési módszerét, így



Bay Zoltán és Kádár György Bay Zoltán kertjében

lehetővé vált, hogy a nemzetközi tudományos közösség a fénysebesség pontosan megmért számértékét rögzített természeti állandónak fogadja el. Ezzel a távolság mértékegysége 1983 óta Bay Zoltán és John White javaslata alapján a „fényre szabott méter”, vagyis a távolság mértékegységét nem a párizsi méterrúd jeleníti meg, hanem annak az időtartamnak az igen pontosan mérhető értéke határozza meg, amennyi idő alatt a fény az egy méter távolságot megteszi: $t_m = s/c = 1[m]/c[m/s] = 1/299792458$ sec. Bay Zoltán tudományos életpályája és eredményei csak tiszteletet és csodálatot érdemelnek, én legfeljebb csak méltatlan tanítványa lehettem volna, mégis örömteli elégedettséggel tapasztalhattam beszélgetéseink folyamán, hogy fizikus kollégájának tekint, feleségével együtt barátságos megbecsüléssel fogadja az otthonról jött ifjabb magyar családot.

Büszkén mondhatom, hogy Bay Zoltán a bizalmába fogadott, ezt fontos események jelzik. Bánffy György színművész amerikai előadó körútján bemutatta „Széchenyi István – A legnagyobb magyar” című monodrámáját Washingtonban is, az előadás után Bay Zoltánék látták



Bay Zoltán és Kádár György és felesége

vendégül őket feleségével együtt. Ez alkalommal minket is meghívtak a Bay családhoz és három házaspár egy egész délutánt töltött együtt felemelő hangulatú beszélgetéssel.

Számomra az egyik legfontosabb és legnagyobb büszkeségre okot adó esemény 1986 októberében az 56-os Forradalom 30. évfordulóján Bay Zoltánék házában a Washington környéki magyarok részvételével megtartott megemlékezés volt. A megismerkedésünk óta eltelt fél-évnyi idő alatt Zoltán bácsi annyira kiismert, megismerte a politikai körülményekre vonatkozó nézeteimet, hogy helyénvalónak tartotta megismertetésemet, bevezetésemet az emigráns magyarok társaságába, akik a hazai szocialista diktatúra rendszerét elutasították, legjobb esetben megszállási kényszer bábukormányja alatt sínylődő nép rendszerének tartották. Itt ismertem meg Högye Mihály református lelkészt, Csicsery-Rónay István irodalmárt, a Pen klub emigráns magyar képviselőjét, Marton Endre újságíró és Wágner Ferenc író, aki angol nyelvű könyvet írt Bay Zoltán életéről, és több más, viszonylag idős amerikai magyar embert.

A másik fontos és büszkeségre okot adó jele Bay Zoltán bizalmának az volt, amikor 1987 elején átadott nekem egy vastag iratcsomagot, kézzel, tintával írott szöveget, „Az Élet erősebb” című írásának másolati példányát. Elmondta, hogy ezt a kéziratot az Egyesült Izzó második világháború alatti és utáni viszontagságairól, az ország háborúba lépésétől (1941) az Ő Amerikába érkezéséig (1949) történt eseményekről írta és 1950 óta őrizi. Eddig csak néhány amerikai magyar barátjának mutatta meg, én leszek az első magyarországi olvasó. Otthon azon az éjszakán egyfolytában elolvastam elejétől a végéig, felejthetetlen élmény volt a világos, pontos és szabatos szöveg tartalmát, leírt eseményeit átélni, történelmi, gazdaságtörténeti és tudománytörténeti jelentőségét felismerni. Legközelebbi találkozásunk alkalmával megkérdeztem, hogy ez miért nincs nyomtatott formában kiadva? Elmondta, a később kinyomtatott könyv előszavában is leírta, hogy attól tartott, hogy a nyomtatással

nyilvánosságra kerülő tények miatt a Rákosi-rendszer az otthon maradt családjának tagjait miatta megbüntetné akár bebörtönzéssel is. Megjegyeztem, hogy talán ennyi idő után a lazuló „gulyáskommunista” Kádár-rendszerben már nem kellene ettől félni, érdemes lenne kiadni. Döntés előtt még meg akarta ismerni Németh László lányának, a Kanadában élő Németh Magdának a véleményét is. 1987 augusztusában az amerikai magyarok Magyar Baráti Közösségének szervezésével a Lake Hope tónál minden évben Szent István hetében rendszeresen tartott ITT-OTT találkozón Németh Magda is megismerhette a kéziratot és az ő véleménye szerint is érdemes volt könyv alakban kiadni. Ezután Magyarországon Pungor Ernő és Marx György is megkapták a kéziratot és próbálták elintézni a kiadást. Marx elvitte a Magvető Kiadóhoz, ahol készséges kitörő örömmel késznek mutatkoztak a könyv megjelenítésére, de azért lett volna néhány részlet, amelyeket aktuális politikai indokokkal kihagyni javasoltak. Zoltán bácsi egyértelműen megüzente, hogy vagy úgy adják ki, ahogy le van írva, vagy sehogy. Így történt végül, hogy 1990-ben a hazatelepülő Püski Könyvesház és a debreceni Csokonai Kiadó együttműködésével „Csokonai-Püski” jelöléssel megjelent a könyv „Az Élet erősebb” címmel. A könyv azt írja le, hogy a háború alatt hogyan sikerült megmenteni az Egyesült Izzó legfontosabb berendezéseit és ügyes trükkök alkalmazásával megakadályozni, hogy a németek leszereljék és Németországba telepítsék a gyárat, és a háború után hogyan nem sikerült lebeszélni az orosz megszállókat arról, hogy romboló vandalizmussal leszereljenek a gyárban minden fontos berendezést, amelyekből néhány vagonnyit a Szovjetunióban magyar hadifoglyok vakvágányra félretolva láttak rozsdásodni. Bay Zoltán tevékenyen részt akart venni a háborúban lerombolt ország talpra állításában, újra helyreállítottak az Izzóban egy gyártósort és az első működő izzólámpát „AZ ÉLET ERŐSEBB” feliratú díszdobozban állították ki, innen a könyv címe. A gyári, Akadémiai és egyetemi kommunista térfoglalások elleni küzdelem hozta el Bay Zoltán elhatározását, hogy barátja, Szentgyörgyi Albert példáját követve elhagyja Magyarországot.

Hazatérésünk után is tartottuk a kapcsolatot, Budapesti látogatásaik alkalmával mindig találkoztunk, 1990 tavaszán sikerült egy hivatalos úton, a COCOM lista feloldásáról tárgyaló küldöttség tagjaként Washingtonba utaznom és meglátogatnom a Bay családot. A mindig egészséges és energikus, szálegyenes tartású Bay Zoltánt 92 éves korában 1992-ben egy banális tüdőgyulladás vitte el. 1993 áprilisában Rómából autóztam haza a Gyulaváriban, szülőfalujában tartott temetésre. Ekkor alapította Bay Zoltán özvegye, Herczegh Júlia a Bay Zoltán Tudomány- és Technikatörténeti Alapítványt, amelynek azóta kuratóriumi tagja vagyok. Idén 2023. június 17-én temettük el Gyulaváriban férje mellé az 2021-ben elhunyt feleségét, Herczegh Juliát.



Bay Zoltán, Kádár György, Bakonyi Imre, Tompa Kálmán és Takács László

Dr. Kádár György
fizikus, kutató professzor emeritus

Egy kitüntetés margójára, Trampus Péter Magyar Érdemrend tisztikereszt kitüntetése

On the margins of an award

Az emberi kíváncsiság – talán – egyike lényünknek, amely ilyen vagy olyan formában, gyengébben-erősebben felmerül mindnyájunkban éppen attól függően, hogy az adott pillanatban aktuális cselekedeteinkkel mire is fókuszálunk. Március közepén és augusztus végén, nemzeti ünnepeink idején vagy az éppen aktuális hírek, vagy az ismerősökkel folytatott beszélgetések során értesülünk arról, hogy kit tartott a szakma (és mellette a politikai vezetés) érdemesnek arra, hogy munkáját állami kitüntetéssel ismerje el. Bevallom örömmel olvastam a következő hírt:

VITÁLYOS ESZTER, a **Kulturális és Innovációs Minisztérium** miniszterhelyettese és **ZÁVOGYÁN MAGDOLNA** kultúráért felelős államtitkár augusztus 20-án alkalmából Magyar Érdemrend parancsnoki keresztet, **Magyar Érdemrend tisztikeresztet**, Magyar Érdemrend lovagkeresztet, Magyar Arany Érdemkeresztet, Magyar Ezüst Érdemkeresztet, Magyar Bronz Érdemkeresztet, Bánffy Miklós-díjat, Bessenyei György-díjat, Csokonai Vitéz Mihály-díjat, Martin György-díjat, Móra Ferenc-díjat, Népművészet Ifjú Mestere díjat, Népművészet Mestere díjat, Pauler Gyula-díjat, Pro Cultura Hungarica díjat, Szinyeyei József-díjat adott át a Pesti Vigadóban.

Kiemelkedő színvonalú munkája elismeréseként **Magyar Érdemrend tisztikereszt polgári tagozat** kitüntetésben részesült:

DR. TRAMPUS PÉTER gépészmérnök, a Magyar Tudományos Akadémia doktora, a Dunaújvárosi Egyetem professor emeritusa.



Folyóiratunk felelős kiadóját, a MAROVISZ (Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség) elnökét, az EFNDT (European Federation for Non-Destructive Testing) volt elnökét mindnyájan jól ismerjük, hiszen szakmai tevékenysége, kiváló tudományszervező képességének eredményei nyitott könyv mind a hazai, mind pedig a nemzetközi közösségekben, az érintett szakmai körökben. Ha valakit a mélyebb részletek is érdekelnek, lapozza fel a 2022/IV. lapszámunkban Trampus Péter 75. születésnapja alkalmából Skopál István által készített interjút. De elő lehet venni legutóbbi lapszámunkat is, amelyben a nemzetközi részvételű XIII. RAKK-ról (Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Konferencia és Kiállítás), annak eseményeiről, amelyben két európai szakmai szervezet jelenlegi

(ESIS, European Structural Integrity Society) és volt elnökei (EFNDT) értékelik a közép-európai lehetőségeket, avagy ugyanezen lapszámban egy Nobel-díjas tudóssal folytatott megbeszéléséről számol be Trampus Péter professzor. Nem, nem kívánok részletekbe menni, időt rabolni. Inkább engedjék meg, hogy feltegyek két kérdést.

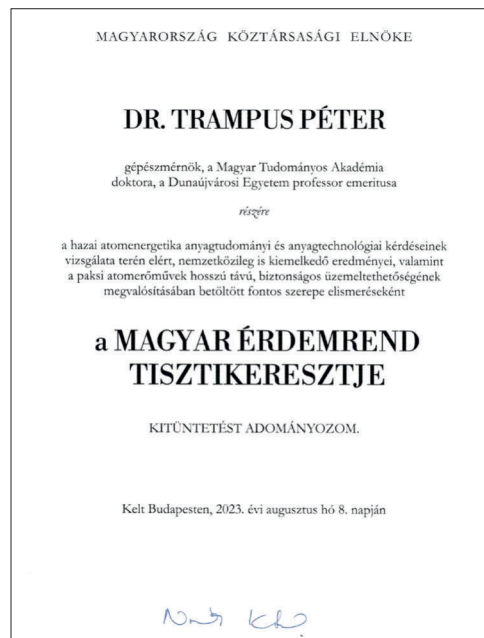
Igaznak találja-e a Tisztelt Olvasó, hogy Trampus Péter professzor úr neve, szakmai tevékenysége mindeddig egész életében hazai és nemzetközi szinten

- *a nukleáris energia biztonságos alkalmazásának problematikájához kötődik?*
- *a művelt szakmai területen hazai és nemzetközi szempontból kiemelkedő színvonalú munkát végzett és végez még napjainkban is?*

Meggyőződéssel hiszem és vallom, hogy a „két IGEN” válasz elsősoró többségét tapasztalhatnám egy nyilvános vagy titkos szavazáson is. (Zárójelben jegyzem meg: akinek válassza nem a „két IGEN”, nyugodtan küldje meg számomra indokával együtt). De térjünk vissza az eseményekre.

Hogy mivel is érdemelte ki Trampus Péter e kitüntetést? Olvassuk a köztársasági Elnök (hivatalos) indokát!

Az indok valós és teljes egészében olyannyira helytálló, hogy a nemzetközi és hazai szakmai élet egységesen visszaigazolja azt.



Tisztelt Professzor Úr, kedves Péter!

Tiszta szívből gratulálok a nemzetközi és hazai eredményeidhez, sikereidhez, valamint ezen elismeréshez is. További nagyon jó egészséget, örömeket és sok-sok kellemes pillanatot kívánok a szakmai közösség és jómagam nevében.

Tóth László

Beszélgetés Paczoly Győzővel

Interview with Győző Paczoly

Kérdező/Questioner: Skopál István

Győzőt az e riportban is említett vizsgálatminősítés kapcsán ismertem meg jó tíz évvel ezelőtt. Kitűnt számomra az új ismeretekre való fogékonyságával és a megbízhatóbb vizsgálatokra való törekvésével. Együttműködési készsége jól megmutatkozott az ultrahangos Leonardo-tankönyv megújítása során is. Remélem, az alábbi beszélgetésből kiderül, hogy helyesek voltak a korábbi benyomásaim.

Elsőként adódik a kérdés: Miért választottad szakmádnak éppen a roncsolásmentes anyagvizsgálatot és munkahelyednek a Paksi Atomerőművet?

Az igazság az, hogy az anyagvizsgálat választott engem, és nem én az anyagvizsgálatot. Az ok, amiért most itt vagyok az, hogy amikor életemnek abba a szakaszába jutottam, hogy megállapodjak és találjak egy fix munkahelyet, akkor egy ismerősön keresztül értesültem róla, hogy az Atomerőműbe éppen anyagvizsgálót keresnek. Korábban azt sem tudtam, hogy mi fán terem az anyagvizsgálat, így elképzeléseim sem voltak ezzel kapcsolatban. Mivel Pakson élek és nem volt szándékomban az ország másik végében munkát keresni, logikus döntés volt. Akkoriban sem bővelkedett és most sem bővelkedik ez a környék hasonlóan stabil munkalehetőségekben. Korábban nem feltétlenül itt képzeltem el a jövőmet, annak ellenére, hogy a szüleim is dolgoztak ennél a cégnél. Nekem sem volt ismeretlen a terep, hiszen az erőmű Energetikai Szakképzési Intézetében végeztem a középiskolai tanulmányaimat, és ezáltal a nyári gyakorlatokat is itt töltöttem. Aztán később egy másik helyen is dolgoztam az atomerőmű területén részmunkaidőben. Ez alatt az idő alatt fejeztem be az egyetemi tanulmányaimat. Ez semmiben nem kapcsolódott a mostani munkámhoz, mert a szállítási részlegnél a cég személyszállító autófloottájával foglalkoztam, de rálátásom lett az itteni életre. Fontos szempont volt az egzisztenciális és anyagi biztonság, ami atomerőműves dolgozóként rám várhat.

Milyen tanulmányok után kezdted el anyagvizsgálóként dolgozni?

Amint említettem, a Paksi Energetikai Szakképzési Intézetben végeztem a középiskolát, amit a Paksi Atomerőmű a saját munkaerőigényeinek kielégítésére hozott létre nem sokkal korábban. Paksi gyerekként adta magát, hogy itt folytassam a tanulmányaimat. Amikor én 1988-ban megkezdtem ott az első évemet, még érettségiző diákok nem is voltak, csak harmadévesek. Akkoriban a szakmai tanári gárda nagy része az erőműben dolgozó szakemberekből állt, így valamennyire mindennapi kapcsolatunk volt az atomenergiával. Abban az időben számítástechnikát,



erőmű-gépészetet, gyengeáramú műszerészetet lehetett ott középiskolai szinten tanulni, valamint volt hároméves oktatás géplakatosoknak és erősáramú műszerészeknek. Én az erőmű-gépész szakirányt választottam, habár a másik két középiskolai szakirány is érdekelt. Ebben az időszakban működött ugyanitt egy főiskolai szintű, hároméves képzés, amely a Budapesti Műszaki Egyetemmel karöltve felsőfokú diplomát adott energetikus képesítéssel.

Nyilvánvaló lett volna itt folytatnom, én mégis elkanyarodtam kicsit, és az akkori győri Széchenyi István Főiskolát választottam, mert ott a Közlekedésmérnöki Karon volt tengerhajózási szakirány. Érdekes, hogy egy tengerrel nem ren-

delkező országban miért oktatnak ilyesmit, de akkor még létezett a MAHART tengerhajózás, és ezzel párhuzamosan a tengerészképzés is. Számomra ez azért volt vonzó, mert édesapám is a MAHART-nál dolgozott fedélzeti tisztként, bejárta a világot, és ez engem is érdekelt. Utána dolgoztam is egy amerikai tulajdonú tengerjáró hajón közel egy évig, majd hazatérve beiratkoztam a Budapesti Műszaki Egyetem Közlekedésgépész Karának Hajóépítő Szakára. Ebben az időben még hajógyártás is létezett Magyarországon, így voltak reményeim ezzel kapcsolatban. Aztán a diploma megszerzése után a család került előtérbe, így nem tértem vissza a hajózáshoz. Az anyagvizsgálattal pedig a korábban említett módon kerültem kapcsolatba. Egyébként érdekes, hogy egy nagy tengerjáró hajó és egy erőmű között a gépészeti berendezéseket és szerkezeteket nézve, mennyi hasonlóság van.

Az anyagvizsgálói képesítéseimet a 2001. évi munkába állásom óta folyamatosan szereztem meg. Nem állíthatom, hogy mindegyikre napi szinten van szükségem, de így rálátásom van mindazokra a dolgokra, amivel az osztályunk foglalkozik. Emiatt szereztem meg néhány éve a hegesztőmérnöki képesítésemet is. Bár konkrétan hegesztéssel soha nem foglalkoztam, de úgy éreztem, ez mindenképpen kell ahhoz, hogy teljes rálátásom legyen arra, amit csinálok.

Hogyan alakult a pályád az erőműben?

Amikor ide kerültem, éppen megkezdődött az a mindmáig tartó folyamat, aminek során az általunk végzett

anyagvizsgálatokat minősíteni kellett. Ezt röviden úgy tudnám leírni, hogy minden egyes tevékenységet, amit végzünk, a gyakorlatban is be kell mutatni egy arra akkreditált testületnek, és igazolni, hogy az megfelel bizonyos elvárásoknak. Ők aztán erről egy tanúsítványt állítanak ki részünkre, amit mi, más dokumentumokkal együtt, benyújtunk az Országos Atomenergia Hivatalnak. Ez a valóságban sokkal hosszabb és bonyolultabb folyamat, semhogy azt itt részletezni lehetne. Hogy mégis érzékeltessem a fontosságát, ahhoz megemlítem, hogy a nyugati világ összes nukleáris létesítményében hasonlóképpen járnak el, legalább a nukleáris szempontból kritikusnak minősített berendezések esetében. Európai szinten egy munkacsoport is alakult, ami ennek úgymond a „szabványosításával” foglalkozik, ennek a munkájában én is részt veszek. Egyébként az ezzel kapcsolatos dokumentumok nyilvánosak, és – ha valaki a 'NUGENIA' honlapján rákeres a TA8 munkacsoportra – elérhetőek. Érdemes beletekinteni, esetleg más területen dolgozók számára is hasznos lehet.

Visszakanyarodva a napi szinten végzett munkámhoz, főképpen a primerköri főberendezések vizsgálatával foglalkozunk, ezen belül is a roncsolásmentes anyagvizsgálatok körében „legnépszerűbb” ultrahangos vizsgálatokkal, ha lehet így fogalmazni. Habár minden eljárás folyamatosan fejlődik – leginkább a számítástechnika lehetőségeinek kihasználása révén – talán ebben van még mindig a legnagyobb potenciál. Rendkívül sok, relatíve új módszert fejlesztettek ki az elmúlt húsz év során, és ez a lendület még mindig tart. Természetesen ezek jó része még inkább csak laboratóriumi körülmények között életképes, de ez változhat a jövőben. Mivel az atomerőmű az anyagvizsgálatok minden válfajában érdekelt, ezért ezek az újdonságok valamilyen módon eljutnak hozzánk, és sokszor alkalmazzuk is őket. Én személyes kihívásnak tekintem, hogy ezeket megismerjem, még ha nem is tartozik a feladataim közé az alkalmazásuk. Sok személyes kapcsolat van olyan kollégákkal, vállalkozásokkal, akik/amelyek az anyagvizsgálatok különböző módozataival foglalkoznak, esetleg itt nálunk is végzik azokat. Ezért elmondhatom, hogy műszaki oldalról van rálátásom a szakmára hazai és valamennyire nemzetközi szinten is. Többször kerestek már meg szakmai témákban kívülről, pl. Paks II. vagy egyéb projektek kapcsán; ilyenkor jól esik, hogy ismernek minket, és mi segíthetünk.

Volt-e olyan érdekes vagy tanulságos vizsgálati munkád, amire szívesen emlékszel vissza?

Egy konkrét dolgot nem tudnék kiemelni. Minden alkalommal, amikor egy kritikusabb feladatot zökkenőmentesen sikerül végrehajtani, én boldog vagyok. A mi csoportunk gépi anyagvizsgálattal foglalkozik, amelyeket különböző berendezéseken kell végrehajtani. Ennek az atomerőműben az a sajátossága, hogy a vizsgálandó berendezésekhez igen korlátozottan lehet csak hozzáférni: kizárólag a blokkok főjavításának alkalmával, és az időtartam akkor is többnyire szinte percre ki van számolva. Ezért bármit csinálunk, annak elsőre sikerülnie kell.

A vizsgálóeszközöket, ideértve a vizsgáló mechanikát és a kapcsolódó berendezéseket, sok esetben egyedileg kell előtte kitalálni, legyártani, a körülményekhez adaptálni. Ez igényel egy kis kreativitást, de pont ez a szépsége is. Ha nem így lenne, már lehet, hogy nem is dolgoznék itt. Nekem szükségem van arra, hogy időről időre új feladatokkal találjam magam szembe, az egyhangúság nem nekem való.

Az atomerőmű Kísérleti Gyakorló Központjában, némi túlzással, egy egész primerkör áll a rendelkezésükre. Ez mennyiben segít a felkészülésben és van-e szerepe az említett vizsgálatminősítésekben?

Igen. Itt van egy saját laborunk, itt tudjuk reprodukálni azokat a munkákat, amire üzemelő blokkok mellett nincs a helyszínen lehetőségünk, ráadásul biztonságos sugárzásmentes környezetben. A Karbantartó és Gyakorló Központban található berendezések, eszközök egyébként főként a karbantartó személyzet számára nyújtanak segítséget, valamint a látogatók ismerkedhetnek a technológiával.

Mi, elég komoly anyagi ráfordítással, itt halmoztunk fel olyan vizsgálati próbadarabokat, amelyek modellezik a valóságban vizsgált komponenseket, és a megfelelő, bemunkált folytonossági hiányokat is tartalmazzák. Ezeknek a próbadaraboknak a biztosítása egyébként nemzetközi szinten is az egyik legproblematisabb feladat. Általában nem egy kis lemezdarabot kell elképzelni néhány centi hegesztési varrattal, hanem akár többtonnás makettekről is szó van. Ezek gyártástechnológiáját ipari titokként kezelik az erre szakosodott gyártók – már amennyiben nem saját magunk készítjük azt. Szerencsére több külföldi erőművel és egyéb roncsolásmentes vizsgáló szervezettel is jó a kapcsolatunk, sokszor használjuk egymás próbatest-infrastruktúráját, már amennyiben az adott feladathoz megfelelnek a speciális egyedi igényeket tekintve. Egy vizsgálatminősítés lebonyolításába ennek a szervezése is beletartozik, így egy konkrét minősítéskor legalább egy év átfutási idővel számolunk, a minősítő tanúsítvány kiadásával bezárólag.

Régóta behatóan foglalkozol az ultrahangos vizsgálatok modellezésével, ami a CIVA szoftverén alapul. Milyen problémákat sikerült ezzel már megoldanod? Mennyire egyeznek a számítások és a mérések a tapasztalatod szerint? És mire képes ma az egyébként folyamatosan fejlesztett ultrahangos szoftver?

Valóban már jó pár éve használjuk a franciák által fejlesztett CIVA programot, amely az én tudomásom szerint a jelenleg elérhető legnépszerűbb és széleskörűen alkalmazott, roncsolásmentes vizsgálatokat modellező szoftver. Korántsem csak ultrahangos területre szorítkozik, a radiográfiai és az örvényáramú eljárásához is rendelkezik modulokkal, továbbá különböző valószínűségi számítások is végezhetőek vele, valamint integrálható valós vizsgálatokkal begyűjtött adatok feldolgozásához és elemzéséhez.

Az igazat megvallva gyorsabban fejlődik, mint azt én követni tudnám. Mi is használtuk több alkalommal a vizsgálatminősítések teljesítőképességének kiegészítő igazolásához. Az előző kérdésednél említett próbatestek hiányának vagy hiányosságainak kiküszöbölésében is volt szerepe, de a vizsgálóberendezés eltérő beállításait, rendelkezésre nem álló szondákat stb. is lehet vele modellezni. Ezenkívül vizsgálati technológiák tervezéséhez, optimalizálásához is alkalmas, ebben is segítségünkre van. Nagyon körültekintőnek kell lenni a használatával, mert sok változóval kell optimalizálni, hogy a létrehozott modellt elfogadható szintre hozzuk. Hogy mennyire kell vagy lehet megközelíteni a valóságot egy modellel, arra nincs szabály, de ha a szükséges statisztikát elkészítjük, és az összevetés után legalább 80%-os egyezőséget tapasztalunk, akkor azzal már használható következtetéseket tudunk levonni.

Ez egyébként egy olyan terület, ahol érdemes lenne hazai szinten is időnként workshopokat tartani, mert tudom, hogy rajunk kívül is vannak olyan intézetek, ahol használják ezt a szoftvert.

Egy másik dolog, amit a szimulációs szoftverek kapcsán megemlítenék, az a mesterséges intelligencia, amellyel egyébként a mindennapokban is már lépten-nyomon találkozunk. A gépesített, adatgyűjtő ultrahangos területen már tesztelés alatt van az a technika, amely segít modelleket létrehozni és vizsgálati eredményeket értékelni. Ez pár év múlva, szerintem, általános lesz a mi szakmánkban is. Az atomerőműben a technikai eszközök végfelhasználójaként nem foglalkozunk ilyen irányú fejlesztésekkel, de ha a K+F-fel foglalkozók elmennének ebbe az irányba, akkor mi biztosan partnerek lennénk valamilyen formában. Azért gondolom, hogy ez nálunk is lehetséges lenne, mert itt alapvetően szoftverfejlesztésben kell gondolkodni, a meglévő hardveres erőforrások és tudás felhasználásával.

Ennyi év után már bizonyára kialakult valamilyen képed a szakma magyarországi helyzetéről. Milyennek látod azt?

Bár én magam csak az atomerőműben végzek anyagvizsgálati tevékenységet, vannak ismeretségeim a kollégák körében. Nem mondhatnám, hogy kifejezetten látok az anyagvizsgáló szakmára nézve olyan specifikus dolgokat – akár pozitív, akár negatív oldalon – amelyek más szakmákra ne lennének jellemzőek. Ha valaki jól csinálja, annak biztos megélhetést nyújtó szakma, főleg vállalkozóként. Az alkalmazottak között sokan vannak, akik inkább bízzák magukat a külföldi munkaadók által nyújtott anyagi biztonságra, még ha csak időlegesen is. Akiiket ismerek, megbecsülésnek örvendenek külföldön, köszönhetően a felkészültségüknek és a kitartásuknak.

Valamelyest kitekintést is nyertél más országokban folyó anyagvizsgálati munkákra. Mi az, amit jobban csinálunk idehaza, illetve mi az, amit tanulhatnánk a külföldi kollégáktól vagy laboroktól?

Összességében nem tudnám azt mondani, hogy az

határozza meg a munka minőségét, hogy azt itthon vagy külföldön végzik, vagy hogy hazai vagy külföldi személy az, aki elvégzi. Sokkal inkább arról van szó, hogy mi az, amit elvár a megrendelő. Ami nálunk kicsiben történik, az nyugaton sokszor nagyban, ez nyilván a lehetőségeket is meghatározza, de még ez sem feltétlenül van így. Jártam több külföldi, főként a nukleáris iparhoz köthető, vagy részben vagy egészben anyagvizsgálattal is foglalkozó cég, illetve kutatóintézet műhelyében. Ami első látásra szembetűnő, az itthoniakhoz képest általában jobb munkakörülmények mellett, az a fegyelem és szervezettség, és nem utolsósorban a lelkesedés, amivel az ottani dolgozók a munkájukat végzik. Hogy a kérdésedre konkrét választ adjak: ez az, amit kiemelnék.

További probléma a nyelvtudás hiánya. Emiatt rengeteg szakmai anyag, újítás nem jut el hozzánk, amelyekből legalább értesülnénk arról, hogy merre halad a világ. Így viszont nem tudjuk követni a fejlődést, még akkor sem, ha lenne rá igény. Pedig a szakmai anyagok jó része online elérhető.

Miben, hogyan kellene javítani a képzést véleményed szerint? Melyek az erősségei és a gyengeségei a hazai anyagvizsgáló képzéseknek?

Nekem a legtöbb, általánosan alkalmazott roncsolásmentes eljárásból van 2-es vagy 3-as szintű képesítem, és több oktatással és vizsgáztatással foglalkozó szervezetenél jártam. Összességében nagyon pozitív, hogy azoknak az embereknek, akik vállalkoznak az oktatásra, a túlnyomó része igen lelkes és elméleti szinten felkészült. A gyakorlati rész az, ami kívánni valót hagy maga után, és tudom, hogy ezt nem csak én látom így. Ennek feltételeit egyes szervezetek nagyon nehezen tudják kielégítően megteremteni, mert ehhez a jó szándék már nem elég. Persze a tudást és a gyakorlatot is össze lehet hozni így vagy úgy, de nem egyszerű. Ha a vizsgáztatásról van szó, akkor is elmondhatom, hogy a pályám során már rengetegszer találkoztam a múltban „ragadt” vizsgafeladatokkal, tesztekkel. Nem feltétlenül azért, mert önmagában volt rossz egy kérdéssor, hanem mert nem találtam nyomát a XXI. századnak. Ez persze változhatott az utóbbi időben, és látom a törekvést. Azt hiszem egyébként, hogy ez közös felelősségünk is, hiszen, ha akarnánk, sokunknak meg lenne a lehetősége, hogy szakmai szervezeteken keresztül javítsunk a helyzeten. Jelenleg csak viszonylag kevés lelkes kollégán múlik mindez.

Mit lehetne, kellene tenni azért, hogy vonzóbb legyen az anyagvizsgálói pálya? Hogyan látod a szakmánk magyarországi jövőjét?

Ha megkérdeznék egy gyereket, hogy mi szeretne lenni, ha nagy lesz, akkor egészen biztosan nem fogja rögtön rávágni, hogy anyagvizsgáló. De ha engem kérdeznék egy társaságban a foglalkozásomról, akkor is általában visszakérdeznak, hogy 'és az mit csinál'. Aki az iparban dolgozik, az már másként látja, hiszen nemigen létezik

olyan termelőüzem, ahol manapság ne lenne jelen ez a szakma valamilyen formában. Ha minden rendben van, és mi is jól végezzük a dolgunkat, akkor viszont szinte láthatatlanok vagyunk, csak jövünk, megyünk és kész. Ez egyébként rendben is van így, persze az ismertségnek és elismertségnek nem használ.

Kifejezetten erre irányuló felsőfokú képzés kevés helyen van az országban, nekem a Dunaújvárosi Egyetemről vannak részleges információim. Annyit tudok, hogy nincs könnyű dolgom, mert az anyagtudományok – ideértve az

anyagvizsgálatot is – spektruma elég széles, a hazai felvevőpiac viszont kicsi és bizonytalan. Ettől függetlenül, szükség van rá, így nem aggodom miatta. Az Európai Unió tagjaként remélhetőleg előbb-utóbb nem lesz probléma, hogy valaki itt született, a megfelelő tudást megszerezheti a megfelelő helyen, és bárhol kamatoztathatja. Erre most is van lehetőség, de a gyakorlatban korlátozottan működik. Így aztán nem is a szakmánk magyarországi, hanem európai jövőjéről beszélhetünk majd, amivel kapcsolatban szerintem nem lesz gond.

Köszönöm a beszélgetést. Kívánok Neked további számos sikeres munkát, vizsgálatminősítést és modellezést! Külön köszönöm a vizsgálatok modellezése kapcsán a hazai szakemberek összefogására tett javaslatodat. Bízom benne, hogy megvalósul, mert együttműködés híján nehéz a magyarországi anyagvizsgálóknak szebb jövőt jósolni.

STRUMAT-LTO projekt

Szerkezeti anyagok kutatása az LWR atomerőművek hosszú távú biztonságos üzemeltetése érdekében

A STRUMAT-LTO projekt célja a nikkel, a mangán és a szilícium (Ni-Mn-Si) szinergikus hatásának vizsgálata az reaktortartályok ridegtörésére, valamint a ridegtörékenységi trendegyenletek (ETE) és a mestergörbe vizsgálati módszerek alkalmazhatósága a 60 éven túl előforduló, LTO szempontjából releváns, nagy fluenciák során. A projekt célja továbbá annak vizsgálata, hogy a termikus lágyítás mennyire hatékony a VVER-1000 és a PWR RPV acélok mechanikai tulajdonságainak helyreállításában a nagy fluenciájú sugárzást követően. A STRUMAT-LTO keretében kitűzött célok megvalósítása érdekében a LYRA-10 kísérletben besugárzott reaktortartályok egyedi mintáinak széleskörű, besugárzás utáni vizsgálati programja valósul meg.

Eddigi főbb eredmények:

- 15 cikk és konferencia-előadás készült az aktuális STRUMAT-LTO eredményekről.
- Sikeresen lezárult egy kisebb önkéntes körvizsgálati program a kisméretű próbatestek vizsgálatáról.
- Az összes vizsgálat több mint 80%-a befejeződött (szakító, KLST, Charpy, FT és SPT vizsgálatok).
- Az összes adat a jövőbeni felhasználás céljából elérhető lesz a JRC MatDB adatbázisában.

STRUMAT-LTO 
Structural Materials for Nuclear Safety and Longevity



18

Partner



12

Ország



48

Hónap

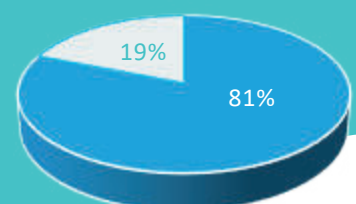
Konzorciumvezető: HUN-REN EK
Szakmai vezető: NRG

2024-ben várható események:

- 2. Disszeminációs Workshop
- Nyári iskola

Strumat anyagvizsgálatok
(2023 augusztus)

■ Befejezett ■ Még nem befejezett



This project has received funding from the Euratom research and training programme 2019-2020 under grant agreement n°945272. The content of this presentation reflects only the author's view. The European Commission is not responsible for any use that may be made of the information it contains.

Milan Brumovsky (1935 – 2023)

Milan Brumovsky – a nukleáris anyag-tudomány és a szerkezeti integritás elemzés világszerte ismert nagysága – a Nyitra megyei Léva járásban található Bát községben (szlovákul: Bátovce) született az egykori Csehszlovákiában. Elemi és középiskolai tanulmányait Teplicén végezte, majd a prágai Károly Egyetem Matematika és Fizika Karán tanult, ahol 1958-ban kapott atomfizikus diplomát. 1970-ben megszerezte a fizikai tudomány kandidátusa címet.

Diplomájával a kezében a pilzeni Škoda Energetikai Gépgyárban helyezkedett el. Kezdetől fogva az atomerőművek szerkezeti anyagainak a tulajdonságaival foglalkozott; eleinte az A1 (csehszlovák fejlesztésű reaktor) tartályának mechanikai tulajdonságaival, később a VVER-440 és VVER-1000 reaktorok gyártásával. Ezeken a területeken egyre meghatározóbb elméleti és kísérleti tudományos tevékenységet folytatott. Lehetősége volt teljes léptékű, reaktortartály acél törésmechanikai próbatestek vizsgálatára. E tevékenysége eredményeként elmélyítette tudását a nukleáris energia olyan interdiszciplináris területein, mint a szilárdtest fizika, fizikai metallurgia és a szilárdsági, törési határállapotok. Ez az összetett tudása hasznosult az atomerőmű nagyberendezéseinek gyártása és az erőművek létesítése terén az egykori Csehszlovákiában. Jelentős mértékben járult hozzá a törésmechanika kutatásához és alkalmazásához a berendezések szerkezeti integritásának elemzése és biztonságos üzemidejük meghatározása terén. 1993-tól az ÚJV Řež munkatársa (Csehország és Európa egyik vezető kutató és mérnöki szolgáltató intézete az energia ipar területén), ahol továbbra is az üzemelő atomerőművek berendezéseinek öregedési kérdéseivel foglalkozott.

Milan Brumovsky egyike a Temelin Atomerőmű (VVER-1000) két blokkja reaktortartályában elhelyezett, megújított sugárkárosodás felügyeleti program megalkotóinak. A programot a reaktortartály szerkezeti anyagai sugárkárosodásának legújabb tudományos eredményeire alapozták. Lehetővé tették az anyagtulajdonságok változásának (elrögzedés, szívósság veszteség) folyamatos követését, amely folyamatok igen szoros összefüggésben vannak a reaktortartály biztonságával és az egész atomerőmű biztonságos üzemeltetésével, lényegében az atomerőmű műszakilag lehetséges üzemidejével. A megújított felügyeleti program koncepcióját átvették, egyebek mellett, az orosz szakemberek is az új VVER reaktorok tervezésénél.



Egész életútja folyamán Milan Brumovsky nemzetközi szinten is hasznosította magas szintű tudását. 1980-tól ő képviselte országát a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) „Atomerőművek Élettartam Gazdálkodása” nemzetközi munkacsoportban. Hosszú éveken keresztül dolgozott az Amerikai Gépészmérnökök Egyesületében (ASME), és ebben a minőségében nem egy nemzetközi tudományos konferenciát szervezett. Tagja volt az Amerikai Anyagvizsgálók Társasága (ASTM) „Reaktor anyagok bizottságának”, ahol részt vett a miniatürizált próbatestekkel foglalkozó új szabvány sikeres bevezetésében. Szerzője vagy társszerzője volt számos egyéb, az atomerőművek biztonságos üzemidejének a meghatározásával foglalkozó szabványnak. Kezdeményezője volt a VERLIFE európai projektnek, amelynek eredményeként készült el a VVER atomerőművek berendezései és csővezetékei integritásának és üzemidejének elemzésével foglalkozó, hiánypótló útmutató. Vezette a Cseh Gépészmérnökök Egyesületének szabványalkotó bizottságát, továbbá állandó szakértője volt a cseh nukleáris hatóságnak.

Karrierje során Milan Brumovsky több mint 300 tudományos cikket, könyvfejezetet és jelentést publikált, ennek többségét nemzetközi szinten. Társszerzője a NAÜ számos, sugárkárosodással, öregedéskezeléssel és élettartam gazdálkodással foglalkozó kiadványának. Figyelmet fordított tudása átadására, így a NAÜ szakértőjeként kurzusokat tartott a világ sok, a nukleáris energiát bevezetni szándékozó országa fiatal szakembereinek.

Eredményeiért több rangos nemzetközi kitüntetésben részesült. Ilyenek voltak például a volt Szovjetunió Tudományos Akadémiájának a kitüntetése, a Francia Atomenergia Bizottság kitüntetése, valamint az ASME kitüntetése. Természetesen hazájában is kapott elismeréseket, így a Szlovák Villamos Művek vagy a CEZ Csoport (Cseh Villamos Művek Csoport) kitüntetéseit.

Én 1982-től ismertem személyesen és voltam munkakapcsolatban Milannal. Egyrészt a Pízenben gyártott paksi reaktortartályok tették szükségessé rendszeres konzultációinkat. Később a NAÜ nemzetközi munkacsoportjában, amelyben 2005 és 2013 között magyar delegátusként, majd később megfigyelő státuszban dolgoztam, tartottunk szoros kapcsolatot. Meghívottként, paksi kollégák kíséretében részt vehettem a nyolcvanadik születésnapjára rendezett prágai ünnepségen



(a fényképen a magyarok ajándékát, egy reaktor-tartály makettét ad át Rátkai Sándor Milannak).

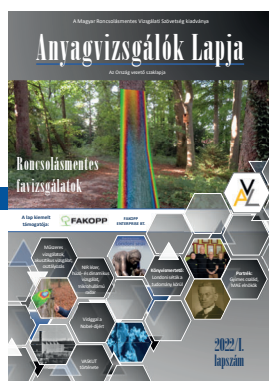
A nyolcvanötödik születésnapján video üzenetben köszöntöttem. Legutóbb, ez év áprilisában találkoztam vele személyesen Budapesten, ahol egy európai kutatási projekt rendezvényén vett részt. Munkatársai elmondása szerint élete utolsó napjáig aktívan dolgozott.

Kiemelkedő tudóst, jó gyakorlati szakembert és barátot tisztelhettem benne. Számomra megtiszteltetés, hogy több évtizeden át együttműködhettem vele, és minden személyes találkozásunkkor hallhattam, ahogy mosolyogva, magyarul köszöntött. Kedves Milan, nyugodj békében.

Trampus Péter

Nyomtatott lapszámaink

2022



2023



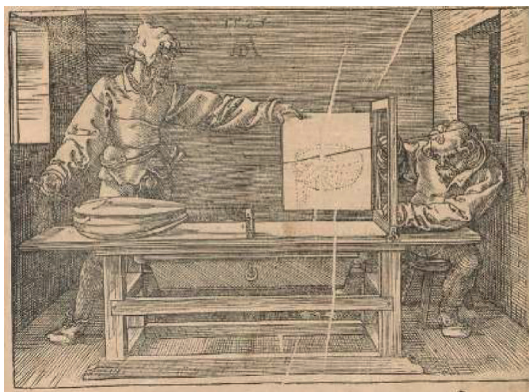
Megvásárolhatók a MAROVISZ-nál.

marovisz@marovisz.hu

Valós és képzelt masinák

Real and imaginary machines

Az ősi barlangrajzoktól kezdve megannyi rajzon, festményen, szobron látunk ballagó, futó, ugró állatfigurákat. Az [1] tanulmány szerzői alaposan elemezték a mozgó jószágokat megjelenítő alkotásokat, és meglepő következtetésre jutottak. A híres, nagyra értékelt művészek gyakran hibásan ábrázolták az állatokat. A képek, szobrok túlnyomó többsége a járás mechanikája¹ szempontjából téves volt. A paripák, szarvasok, oroszlánok nagyokat zuhantak volna, ha a híres alkotók képei szerint mozognak. A korrekt, a valósághű megjelenítés legnagyobb részt az ősi barlangi képeken fordult elő. Az ábrázoló geometria, a műszaki rajzolás egzakt alapvetései Albrecht Dürer (1471-1528) sok érdekes, önálló gondolatot művészi szépséggel bemutató² matematika könyvében [1] jelentek meg. A középpontos vetítést alkalmazó szerkezete bár lassan, ám elvileg hibátlanul működik.

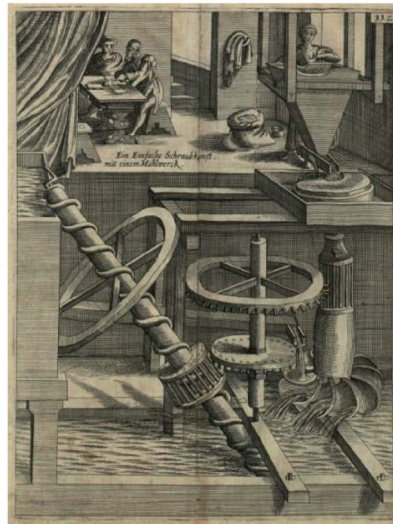


Dürer centrális perspektográf készüléke [1]

A ma használatos műszaki ábrázolás alapvető rendszerét, az egymásra merőleges képsíkokra, párhuzamos vetítő sugarakkal leképező technikát a különösen sokoldalú, színes életutat bejár³ Gaspard Monge (1746-1818) dolgozta ki. A modern géprajz kanonizált rendszerének kialakulása előtt a tervezők szerkezeteiket látványképekkel szemléltették. Hajdani kollégáink csodálatos térlátását dicsérik a remekbe készült képek. A komplikált szerkezetek ábráin valamennyi alkatrész megmutatkozik, alak sajátosságai és kapcsolataik a többi résszel világosan látszanak. A lapokon szinte mindig találunk az ábrázolt masinától független díszítéseket, emberi, állati, olykor allegorikus figurákat, gondosan rajzolt tájkép részleteket.

Az örökmozgók feltalálói különös aprólékossággal dokumentálták gépeiket. A felirat szerint malom hajtására szolgáló „Egyszerű csavarmű” alkotója olyannyira bízott

konstrukciója sikerében, hogy a sikeres vállalkozás nyeregségét könyvelő tulajdonosokat is a képre rajzolta.



Örökmozgó gépezettel hajtott malom
(1629, ismeretlen alkotó műve) [2]

A fizikai alapelvekkel nem ütköző gépezetek sokkal érdekesebbek. Az egyes alkatrészek, a jól látható, és a többé-kevésbé részletesen elmagyarázott mechanikus kényszer elemek szabatosan kapcsolódnak – az egész masina gyakran valószínűtlennek hat. Lehet, hogy a fellépő hatások, nyomatékok, erők, helyzeti és mozgási energiák számítása nélkül a nagyszerű szerkezetek csupán a hajdanvolt mérnök szárnyaló fantáziájában működtek?

A szépséges régi műszaki könyvek új és még újabb kiadásainak olvasói között vajon akadt-e, aki megépítette a csodálatos masinákat? És a későbbi korok szakembereinek vajon adtak-e ihlető ötletet a sok-sok töprengéssel kiagyalt, de talán soha meg nem épült masinák?

Úgy tűnik, olykor éppenséggel a szépirodalom szerzői kaptak ihletet a furcsa gépezetektől. Gustave Lefebvre (1879-1957) francia régész 1919-ben a közép-egyiptomi Hemenu mellett egy különösen érdekes sírt tárt fel. A sírban nyugvó Petosiris, valamint Petosiris családjának férfi tagjai sok generáción át Egyiptom legfontosabb szentélyének, Thot ősi templomának főpapjai voltak. Petosiris az i.e. 4. században élt, amikor a fáraók országa már elvesztette korábbi, sok évezredes hatalmát. Egyiptom előbb a perzsák, majd a világhódító makedón Nagy Sándor birodalmának részévé lett.

¹ A talajon éppen támaszkodó és a járáshoz, ugráshoz felemelt első vagy hátsó, jobb vagy bal oldali lábak ismétlődő ritmusa alapján megállapítható az ábrázolt mozgás valószerűsége.

² A szögharmadolás ókori, klasszikus feladat. Pierre Wantzel (1814-1848) bizonyította be, hogy a megoldás nem lehetséges, a csupán körzőt és vonalzó használatú euklidészi szerkesztésekkel nem állítható elő tetszőleges szög harmada. A századok során a közelítő szerkesztések számos módszerét publikálták. Dürer, a német reneszánsz legkiválóbb művésze, a rézkarc csodálatos virtuóza a szögharmadolás egy olyan egyszerű, helyettesítő eljárását ismertette, amelynek hibája mindmáig a legkisebb.

³ Az alacsony származású, de nagyon tehetséges Monge a modern francia mérnökképzés megszervezője, valamennyi gépészmérnöki tárgykör tankönyveinek szerzője és a tárgyak előadója. Tengerészeti miniszterként XVI. Lajos francia király lefejezését szervezte meg, Napóleon egyiptomi expedíciójának résztvevője volt. A császár különösen kedvelte, grófi címmel is kitüntette. Monge neve a legnagyobb alkotókat felsoroló, az Eiffel-torony első emeletén elhelyezett listán is szerepel.

A sír két, föld feletti épületből és egy, a föld alatt kialakított, az elhunyt múmiáját őrző, teljességgel díszítetlen kamrából áll. A föld feletti falakon rendkívül gazdag felirat és domborműrendszer látható. A hieroglifák az ősi Egyiptom végső hanyatlásának és a főpap családjának fordulatos történetét mesélik el. A feliratokból kitűnik, hogy Petosiris egyik, ugyancsak magas egyházi méltóságot betöltött bátyját valamilyen titokzatos, főbenjáró bűnnel megvádolták, elítélték és kivégezték. Nem derül ki, miképpen történt az elítélt későbbi rehabilitációja, a sírkápolna mágikus felirata azonban a halálon túli megbocsátásról szól.

Petosiris az országát meghódító Nagy Sándor és annak utódai, valamint az egyiptomi papi elit közötti kiegyezés vezéralakja volt. Az idegen hatalommal megbékélés teológiai alapon igazoló, bonyolult okfejtése a sírkamra falán olvasható.

Az egyiptomi hagyományokat, kultúrát és vallást sikeresen megmentő, remek diplomata főpap nyughelye az ősi egyiptomi és a hódító görög civilizáció találkozásának és egymásra hatásának különleges dokumentuma. A szövegek az ősi egyiptomi írásjeleket, a szövegekbe ágyazott képek az évezredek, merev ábrázolási kánont használták. A falak aprólékosan kidolgozott, színezett reliefjei azonban már a „modern” görög képzőművészet realista eszközeivel ábrázolták a mindennapi élet jeleneteit [3].

A domborművek megkapó részletességgel mutatják be a Thot templomát kiszolgáló földművesek és iparosok munkáját. Az egyik relief a technikatörténet számára különösen érdekes, az esztergálás eddig ismert legkorábbi ábrája.

Az írott történelem kezdetétől indult egyiptomi kultúra csodálatosan gazdag régészeti leletanyagában sok olyan fa és csont tárgy található, amelyeknek alaksajátosságai és felületi érdességei egyértelműen az eszterga jellegű megmunkálást bizonyítják. A sírleletekben talált ágyak, székek, asztalkák lábai, a különféle téglák, dísz tárgyak, kézi eszközök gyakran igen szabályos kör keresztmetszetű, finom felületű darabok. Petosiris sírjának egyik domborműve éppenséggel az efféle tárgyak megmunkálását szemlélteti.



Esztergálás ábrázolása Petosiris sírjának egyik reliefjén [3]

Az esztergálást két ember végzi. A függőleges tengelyű munkadarabot a jobb oldalon térdelő személy forgatja.

A darab palástját körülölelő, állandóan feszített szíj vagy zsinór végeinek előre-hátra mozgatásával a tárgy jobbra-balra forog. A bal oldali, ülő alak a kezében tartott, és a kis szerkezet keretének támaszkodó szerszámmal végzi a forgács leválasztást.

A „Tizenkét testvér könyve” című összeállítás a késő középkortól századokon át folyamatosan vezetett kézírásos német krónika. 1388-ban egy gazdag nürnbergi kereskedő, Konrad Mendel egy tucatnyi rászoruló öreg kézművesnek élethosszig ellátást biztosító otthont alapított. 1425-26-tól valamennyi „Mendel-testvért” a menház krónikájában rövid szöveges leírás és kép örökíti meg.

Az ábrákon a testvérek jellegzetes gyártási eljárásaikkal, a korabeli, tipikus szerszámokkal, műhely felszerelésekkel, anyagokkal és termékekkel újízták mesterségüket. A finom rajzú, gondosan színezett képekhez kezdetben csak a testvérek nevét és életrajzi adatait, később munkásságuk hosszabb-rövidebb krónikáját is csatolták. A menház 1806-ban szűnt meg.

A Deutschen Forschungsgemeinschaft 2005-2007 között a „Die Hausbücher der Nürnberger Zwölfbrüderstiftungen: Digitale Erschließung und Edition von Handwerkerdarstellungen des 15.-19. Jahrhunderts” című programban digitalizálta, feldolgozta és korlátozás nélkül elérhetővé tette a csodálatos technikatörténeti gyűjteményt [4].

Az 1425-ös dátumú képen Lienhard (vagy Leonhard) esztergályosmester látható.



Esztergálás a XV. században [4]

A – modern szakmai terminológiával – két csúcspont között megtámasztott darab jobbra-balra forgatása a Petosiris sírkamrájából ismert módon történik. A lábpedál lenyomásával a darabot körülölelő zsinór lefelé mozdul. A pedál felengedésével a ferdén megtámasztott rugalmas kar visszahúzza a mozgató elemet. A szépen rajzolt és színezett ábrát alaposan megvizsgálva kitűnik, hogy a megfelelő irányú, a forgács leválasztást biztosító forgást a rugalmas elem visszahúzó mozgása hozza létre. A lassan lenyomott

pedált elengedve a visszarántott zsinór néhány gyors fordulattal perdítette meg a darabot. Ezalatt kellett a szerszámot a munkadarabhoz szorítani. A lábpedált forgattyúval összekapcsoló, a munkadarabot folyamatosan forgató eszterga csak a XVII. századtól ismeretes.

Jacques Bessont (?-1573) Svájcban született protestáns mérnököt az 1572-ben megjelent *Theatrum Instrumentorum et Machinarium* című könyve [5] tette nevezetessé. Besson kezdetben szülőföldjén, később Franciaországban tevékenykedett. IX. Károly (1550-1574) francia király 1569-es orléans-i látogatása során fogadta kegyeibe a sok ötletes szerkezet mellett szivattyúk és csillogászati műszerek tervezésével foglalkozó ezermestert.

IX. Károly rövid uralkodása idején tetőzött a katolikusok és a protestáns hugenották között kibékíthetetlen viszály. A fiatal katolikus király sikertelenül próbált békét teremteni; a mindinkább fanatizált vallási türelmetlenség 1572. augusztus 24-i „Szent Bertalan éjen” a hugenották rettető tömegmészárlásához vezetett.

Besson műve a korabeli gépészet első nyomtatott összefoglalása volt. A könyvet Jacques Androuet du Cerceau (cca. 1511-1586), a XVI. század egyik legkiválóbb építésze illusztrálta. A francia építészet történetének kiemelkedő személyisége saját könyveiben gyönyörű rézmetszetekkel mutatta be kora fontos épületeit és építészeti technológiáit. Cerceau művei a mai restaurátorok számára is fontos, jól használható útmutatásokat tartalmaznak.

Besson könyvének szép kivitelű ábráihoz fűzött latin nyelvű magyarázatok azonban igen elnagyoltak. A szöveg hézagosságában talán szerepe volt annak, hogy a könyv megjelenése előtt a szerző az életét mentve Nagy-Britanniába menekült.

A Petosiris sír esztergájának és a nürnbergi testvér masinájának hitelessége aligha vitatható. A francia Guédelon várának építése 1997-ben kezdődött. A sok országból verbuválódott lelkes közreműködők kizárólag a középkorban ismert technológiákat használnak. A famunkások a hajdanvolt német mester rekonstruált esztergájával dolgoznak [6]. Besson szerkezeteinek működőképessége azonban gyakran kételyt ébreszt.

Úgy tűnik, hogy a gépek többsége csak a szerző szárnyaló fantáziájában működhetett.

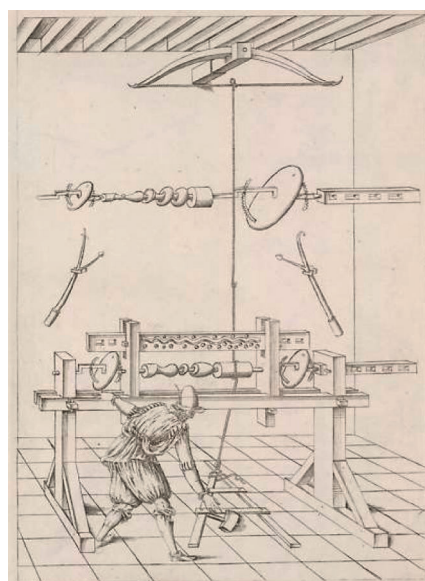
Besson könyvében több eszterga szerepel. Valamennyi gép a munkadarabot körülölelő, lábpedállal mozgatott zsinóros meghajtást alkalmazza. A visszatérítést a gép fölött rögzített íj alakú rugalmas elem végzi.

Az egyik, különösen bizarr masina nem kör keresztmetszetű darabokat készít. A munkadarab két végén, azzal együtt forog két, fogas ívekkel ferdére beállított tárcsa. A tárcsák a gép függőleges vezetékeiben emelik-süllyeszti a megmunkáló szerszámot támasztó és vezető vízszintes

deszkát. A vezető deszka közepén hullámos vonal jelzi a munkadarab hosszmetstetét. A vonal alatt és fölött elhelyezett szögek biztosítják a kézzel támasztott esztergakést. A darab forgása közben a vezető deszka le-fel mozgatja az ovál keresztmetszetű darabot előállító szerszámot⁴.

A rendszer összes munkavégző képességét a pedálra nehezedő személy testsúlya szolgáltatja. A megfeszített íjban tárolt rugalmas energiát a szerszámot vezető deszka fordulatonkénti emelgetése, és a forgács leválasztás emészt fel. A zsinóron, a vezető deszkán és a ferde tárcsákon fellépő súrlódási veszteségeket ugyancsak a pedál mozgása fedezi.

A több nyelvre lefordított könyv számos kiadásban jelent meg. Konkrét hatásáról, a bemutatott szerkezetek hasznosításáról azonban – eddig legalábbis – nem került elő adat.



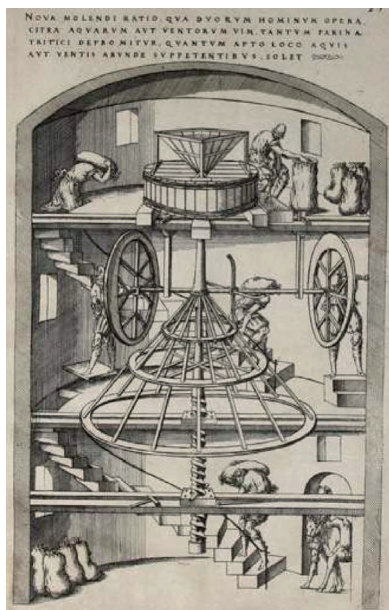
Besson nem kör keresztmetszetet készítő esztergája [5]

Besson teljességgel működésképtelen szerkezete az emberi erővel hajtott malom. A konstrukcióban teljességgel félreértett mechanikai elvet Szőke Béla⁵ [7] tanulmánya tárta fel.

A toronyépület belsejében egy csodálatos gépezet működik. A gabonát befogadó garat és az őrlőkövek a legfelső szinten találhatók. Az őrlőművet a középső szinten, a vízszintes tengely két végén lévő kerekeket forgató személyek (az ábrán kényszerűen takart) csavarkerék hajtással mozgatják. A lépcsőkön felfelé igyekvő, az őrlendő termény zsákjait cipelő teherhordók a középső szintre felérve belekapaszkodhatnak a kúpos ráccszerkezetbe. A két személy forgatva vízszintes tengely kereszt alakú rúdjaiba is lehet kapaszkodni, mindkét mozzanat a függőleges tengelyt és az őrlőművet gyorsítja.

⁴ A körtől eltérő keresztmetszetet készítő szerszám vezérlésben felsejlik az alakos marók gyártásában mindmáig alapvető hátraeszterga gép (Hinterdrehmaschine, relieving lathe...) alapeszméje. A hornyos, szöges vezető deszka pedig akár a klasszikus egyetemes esztergapad másoló berendezésének példája is lehetne.

⁵ Szőke Béla (1894-1980) gépészmérnök a magyar ipar és technikatörténet napjainkra méltatlanul feledett alkotója. Szerteágazó tevékenysége az élelmiszer ipari gépektől a szerszámgépekig, a mechanizmusok elméletétől a bonyolult geometriájú forgácsoló szerszámok tervezéséig számos területen hozott létre nagyszerű eredményeket. Idős korában különösen sokat foglalkozott a technikatörténettel. Kezdeményezésére indult a sajnálatosan megszakadt „Műszaki nagyjainak I. – VI.” című, a Gépipari Tudományos Egyesület kiadásában, 1967-1986 között megjelent, a jelentős magyar mérnököket bemutató könyvsorozat.



Besson emberi erővel meghajtott malma [5]

Besson malmát idézi Jókai Mór „Bálványosvár” című regényének fantasztikus szerkezete. A nagy mesélő élvezetes részletességgel ír le egy bizzar taposó malomban sanyargatott emberek működtette, legyőzhetetlen, forgó erődítményt, a Fergettyúvárat. Jókai vélhetőleg erdélyi utazásai során ismerte meg – az Orbán Balázs „A Székelyföld leírása” című könyvében is szereplő, sok századon át mesélt – fatorony legendáját. És talán Jókai találkozott Besson pokoli malmának ábrájával is?

Besson elvileg talán működőképes, ám használhatóságát illetően erősen aggályos gerenda fűrészelő gépe további szépirodalmi asszociációkat ébreszt.

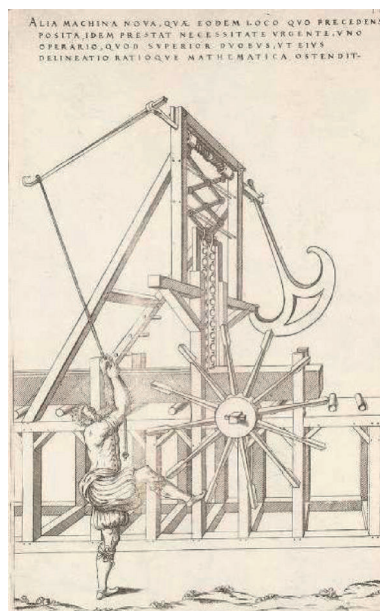
Besson gépeit legtöbbször emberi erő hajtotta. A kézi forgattyúval létrehozott forgást azonban hamar megszakítja a működtető személy kimerülése. A felsőtest, a váll és a kar izmaival nem lehet hosszasan működtetni a forgattyúkart.

Az emberi test felépítéséhez jobban igazodik a vázizomzat több elemét használó mozgásegység. A lábak, a törzs és a karok együttesével huzamosabb ideig, nagyobb teljesítmény fejthető ki⁶.

A gerendát hosszában vágó fűrészgép kezelője teljes testsúlyát használja a kezébe fogott kötéllel mozgásba hozott fűrészlapok függőleges működtetéséhez.

A szerkezet ötletes megoldása a hosszában vágott gerendát előtoló rész. A fűrészpengékhez közelítő mozgást a gépállvány elülső oldalán látható, hosszú küllős tárcsa szakaszos forgatása biztosítja. A tárcsához kapcsolt, az ábrán nem látható henger továbbítja a vízszintes állványon szabadon mozgó görgőkre támaszkodó gerendát.

A fűrészgép jellegzetes eleme a Besson számos más gépén is alkalmazott, felül elhelyezett, ellentétes emelkedésű menetekkel kialakított orsó. A felváltva jobbra-balra forgó orsón a menetekre illesztett, elfordulásukban gátolt anyák egymáshoz közelednek, vagy ellenkezőleg, egymástól távolodnak. Az orsó a kötélen lengetésének



Besson ingás fűrészgépe [5]

megfelelően azonban csak részlegesen fordulhat el, teljes körülfordulást bizonyosan nem végez. Az ábrát alaposan megvizsgálva felismerhetők a különösen nagy emelkedésű, több bekezdésű menetek – a probléma szabatos megoldásának elvileg hibátlan gépelemei!

Az anyákhoz Besson másik, kedvelt konstrukciója, a klasszikus magyar szakirodalomban „nürnbergi olló” elnevezésű mechanizmus kapcsolódik. A szerkezet páros darabszámú, azonos kialakítású csuklós karelemei közepén és a karok két végén kapcsolódnak a lánc további tagjaival.

A menetes orsó egyik részfordulatánál az egymástól távolodó anyák mozgatta mechanizmuslánc összezáródó karjai felfelé húzzák a függőleges gerenda vezetékek között mozgó fűrészlapokat. A másik részfordulat során az egymáshoz közeledő anyák a mechanizmus láncot nyitják, a fűrészpengék lefelé haladnak.

A középkortól ismert, manapság kézi szegecshúzóban, teheremelő platformokban, sőt az ürtechnikában is elterjedten alkalmazott ollós szerkezet Jókai Mór „Névtelen vár” című regényében is felbukkan. A szövevényes történet főhőse egy holdfogyatkozás távcsöves megfigyelése során, véletlenül fedezi fel a birtokszomszédja megtámadására készülő álarcos gazfickókat.

„Ezek rablók.

A hátul jött férfiak egyike egy sajátos eszközt hozott magával, melyet a kisvárosi gyermekek használnak a „három királyok csillaga” játéknál. Rövid, egymáson keresztülfektetett pálcák sorozata ez, melyek csavarszegekkel a közepeiken és a végeiken egymáshoz vannak kapcsolva, s ha a két végső pálcát széthúzza az ember, akkor összelapulnak, ha pedig összehúzza, akkor hosszúra kinyúlik az egész, mint egy hágcsó.

Azt az eszközt a lappangók egyike odaakasztotta az erkély vasrácszatához, s aki legkönnyebb legény volt, az felmászott rajta.”

⁶ A guruló pados csónakokban megszakítás nélkül, órákon át lehet húzni az evezőket.

A fűrészgép különösen bizarr eleme a menetes orsó hátsó végére szerelt hatalmas inga. Besson több gépén is felfedezzük a furcsa, íves formájú, a helyzeti és mozgási energiát oda-vissza alakítani hivatott elemet. A jellegzetes alakú ingák mintha tökéletes előképei lennének Edgar Allan Poe (1809-1849) „A kút és az inga” című klasszikus horror históriájában megálmodott rémületes eszköznek. A novella hőseit gonosz ellenségei gúzsba kötötték, és egy hatalmas, lengő ingával próbálták felszeletelni.

„...az inga szemmel láthatólag lejjebb ereszkedett.

Most azt is láthattam - fölösleges mondanom, milyen borzalommal -, hogy alsó széle csillogó acél félholdat formált, melynek egyik szarva a másiktól körülbelül egy lábnyi távolban volt, a szarvak fölfelé görbültek, s a félhold alsó éle láthatóan oly éles volt, mint a borotva. Amellett tömörnek és súlyosnak is látszott, mint egy borotvakés, élétől fölfelé szilárd és széles acélmasszává vastagodva. Nehéz bronzrúdon függött, s az egész alkotmány szíszeggett, amint lengve szelte a levegőt.

...Az inga lengésiránya testem hosszával derékszöget adott. Láttam, hogy a pengének szívem környékét kell átmetszeni...”

A történet hőse szerencsére megmenekül. Ám az már aligha derül ki, vajon ismerte-e a sötét fantáziájú Poe a lendítő tömeg Besson-féle változatát?

Laczik Bálint

Irodalomjegyzék

- [1] Albrecht Dürer: Unterweysung der Messung mit dem Zirckel und Richtscheit..., 1525
<https://www.e-rara.ch/zut/doi/10.3931/e-rara-8271>
- [2] Meisterdrucke Kunstreproduktionen - Fine Art Prints: A Mill als Perpetuum mobile, 1629: <https://www.meisterdrucke.ie/fine-art-prints/Unbekannt/716997/A-mill-ah-Perpetuum-Mobile%2C-1629.html>
- [3] Török L.: Egy félreismert remekmű – A Petosiris-sír és az egyiptomi-görög kiegészítés, Ókor, 16. évf. 2017/2, Gondolat Kiadó Bp. ISSN 1589-2700
https://okorportal.hu/wp-content/uploads/2018/02/2017_2_Torok.pdf
- [4] Die Hausbücher der Nürnberger Zwölfrüder-Stiftungen, <https://www.nuernberger-hausbuecher.de>
- [5] Besson, Jacques, Dauphinois; Bérolde de Verville: Theatrum instrumentorum et machinarum Iacobi Bessoni, Apud Barth. Vincentium, 1578
<https://doi.org/10.5479/sil.269182.39088000339796>
- [6] MaryAnne France: Guedelon – Building a Medieval Castle in Burgundy: <https://maryannesfrance.com/things-to-do/attractions/chateaux/guedelon-building-a-medieval-castle-in-burgundy/>
- [7] Szőke B.: Példák a tévesen használt elméletre, mint műszaki hibaforrásra, Az MTA MŰSZAKI TUDOMÁNYOK OSZTÁLYÁNAK KÖZLEMÉNYEI 56. KÖTET, 1978, 3-4. szám, 315-322 o.
- [8] Farkas E., Horváth G., Boncz I., Kriska Gy.: Az ősemlék helyesebben ábrázolta a négy lábúak járását, mint a modern művész, Fizikai Szemle 2012. 1. szám 12-20 o.

A 43. Balatoni Ankétról

Az igen sikeres, 186 résztvevővel (!!!) megszervezett rendezvény központi témája a **mesterséges intelligencia** széleskörű ipari alkalmazásaihoz kötődött, a lehetséges szabadalmi jogoktól a karbantartás témakörén át a diagnosztikai képfeldolgozásig. A hatodik alkalommal megítélt „**Nyomástartó rendszerek biztonságáért Díj**” elismerésben Wiegand Krisztina részesült.

Lapunk 2023/IV. számában az elhangzott előadásokból válogatunk – ha a Szerzők partnereink lesznek!!!

Tóth László



A 43. Balatoni Ankét Szervezőbizottsága:

Iliny János, Wiegand Krisztina, Németh János, Dobránszky János, Székely Orsolya, Fodor Olivér, Kutasi Zsuzsanna, Kurucz Botond

Könyvismertetés

Kiválóságaink a száműzetésben

Magyar tudósaink diaszpórája Neumann Jánostól Karikó Katalinig

Hargittai István, Hargittai Balázs

Book review: Brilliant in Exile, The Diaspora of Hungarian Scientists from John von Neumann to Katalin Karikó

A Central European University Press 2023 őszén lepte meg a tudományos világot a Hargittai család „férfi szárnyának” igazán kiváló könyvével, az elmúlt évszázad magyar diaszpórába szakadt kiváló tudósainak átfogó bemutatásával, népszerűsítésével. Engedje meg a Tisztelt Olvasó, hogy mielőtt a részletekbe bocsátkoznék, kiemeljem a könyv három jelentőségét kristálytiszta hangsúlyozó tény:

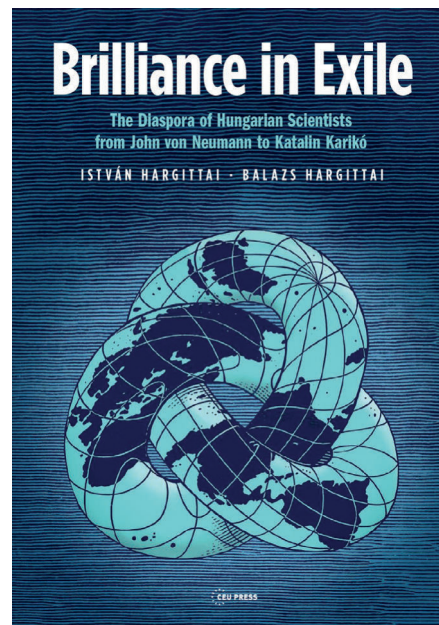
1. A könyv angol nyelven jelent meg, Budapest – Bécs – New York jegyzéssel, következésképpen egyidejűleg „beég” az egész világ kulturális életébe, történelmi tudatába.
2. Az a tény, hogy az idei egyik Nobel-díjasunk, Karikó Katalin rövid életrajzát is olvashatjuk az összeállításban, egy zseniális előrelátás, a tudományos világ élvonalának biztos ismeretét tükrözi, hiszen a könyv maga feltehetően a COVID-19 világjárvány tombolásának kezdetén indulhatott útjára.
3. A mű harmadik jelentőségét közvetlenül azon mondatok igazolják, amelyek a világ tudományos életét meghatározó egyéniségek, tudósok, szakemberek szájából hangzottak el a könyv olvasását követően. Ezekből egy igazán „szép csokrot” olvashatunk a könyv elején és a fedőlap hátsó oldalán. A Nobel-díjas (kémia, 2004) Avram Hershko pl. így fogalmaz:

“A fascinating book. It is remarkable how much talent originated from a small country, and especially from its very small Jewish community. Very interesting and highly readable”.

Igaz, hogy az 1937-ben Karcagon született Herskó Ferenc kiválóan használta közös nyelvünket is, hiszen mintegy 13 évet töltött el az anyanyelvi közösségünkben is. E kettősség „alakította, formálta, hengerelte” mindegyik – a könyvben bemutatott – személy életét.

„A huszadik századot Budapesten csinálták” írta a Kanadába emigrált Vaclav Smil egyik Nature folyóiratban megjelent cikkében¹. A képzeletbeli éremnek ez volt az egyik oldala. A másik pedig az, hogy az adott történelmi és politikai korszak el- és megindított egy olyan kivándorlást, amely igencsak megnyírbálta a tehetséges emberek, tudósok hazai tevékenységének lehetőségeit. A szerzők **hat kivándorlási periódust** azonosítanak. Ezek és e periódusokban hazánkat elhagyó szakemberek életrajza, tevékenysége került összefoglalásra a nemrég megjelent műben.

- **Indulás:** Galamb József és az első Nobel-díjasunk, Lénárd Fülöp
- **Az 1920-as évek elejétől** (az első zsidótörvények



1. ábra: A könyv címlapja (Orosz István munkája)

megjelenésétől) Bauer Ervin, Brunauer István, Farkas László, Gábor Dénes, Hevesy György, Kármán Tódor, Köstler Artúr, Kürti Miklós, Kuffler Vilmos, Lánosz Kornél, Neumann János, Orován Egon, Polányi Mihály, Pólya György, Róna Erzsébet, Szilárd Leó, Telkes Mária, Teller Ede, Wigner Jenő, Bródy Imre.

- **Az 1930-as évek vége és a '40-es évek eleje** (a megerősödő antiszemitizmus periódusa): Bálint Mihály és Aliz, Biró László, Erdős Pál, Kemény János, Kennard Olga, Lax Péter, Popják J. György, Telegdi Bálint, Tisza László.
- **A II. Világháború végét követően:** Balázs Endre, Bay Zoltán, Békésy György, Ernster László, Harsányi János, Herskó Avram, Klein György, Klein Éva, Szent-Györgyi Albert.
- **Az 1956-os forradalmat követően**²: Bitó László, Gróf András, Lengyel Péter, Nagyvári József, Oláh György, Somorjai Gábor.
- **1957-1989 közöttiek:** Buzsáki György, Fodor Gábor, Karikó Katalin, Simonyi Károly, Ullman Ágnes, Furka Árpád.

Nem kívánok a névsorban olvasható 52 név mögött meghúzódó életekkel, szakmai tevékenységekkel, a távozás okaival, indítékaival foglalkozni, azokat ismertetni. Inkább egy áttekintő képet szeretnék „festeni” a korról, az emberekről, a szakmákról. Aki az egyes személyekre kíváncsi, az többnyire magyarul megtalálhatja a keresett személy adatait a Wikipédia Lexikon magyar nyelvű

változatában (kivéve: Kuffler V., Róna E., Popják J.Gy., Lengyel P., Nagyvári J., de róluk is megfelelő mennyiségű információ gyűjthető kellően átgondolt internetes keresési stratégiával). A névsorban szereplők közül:

- még élő személy 9 fő,
- a még élő legidősebb személy Klein Éva (szül.: 1925),
- a legfiatalabb Karikó Katalin (szül.: 1955),
- a leghosszabb életet megélt személy Tisza László (1907- 2009),
- a legrövidebb életet megélt személy Farkas László (1904-1948).

A bemutatott személyek születési éveit szemlélteti a 2. ábra. A 3. ábrán pedig a halálozás évszámainak hisztogramja látható.

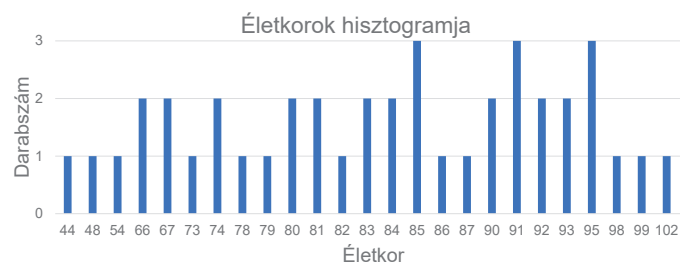


2. ábra: A könyvben olvasható életrajzok születési éveinek megoszlása



3. ábra: A könyvben olvasható életrajzok halálozási éveinek megoszlása

A megélt életkorok hisztogramját pedig a 4. ábrán követhetjük.



4. ábra: A könyvben olvasható személyek élethosszának megoszlása

Érdekes és elgondolkodtató az, hogy mely szakmák képviselői és milyen arányban távoztak hazánkból. Erre utal az 5. ábra. Megjegyzendő, hogy a biokémikus, vegyész, kémikus szakmák képviselőit „kémikus” csoportban, míg a biofizikus, asztrofizikus, geofizikus, atomfizikus stb. szakmák művelői „fizikus” kategóriában lettek figyelembe véve.



5. ábra: A könyvben olvasható személyek szakma szerinti megoszlása

Az 5. ábrára rápillantva „szívszorító” sommás megállapításra is juthatunk. Ez akár így is megfogalmazható: „*Itthon, Magyarországon rendkívüli tudást, hihetetlen energiával megszerző kiváló, zömmel természettudósok hagyták el hazánkat azért, mert a mindenkorai politikai vezetés nem teremtette meg minden arra érdemes szakembernek az alkotás kedvező feltételeit*”. Az előző mondat még árnyalható azzal is, hogy a társadalom javait bővítő, növelő új értékek létrehozására csupán a természettudományok (fizika, kémia, biológia, orvosi, agrárium, műszaki, matematika) képesek, így a hazánkban megszerzett tudás szerte a világban hasznosult, de nem itthon!

A bemutatott igazán kiváló könyv nem csupán az elmúlt, mintegy másfél évszázad politikai viszonyainak tükörképe, hanem az idén Nobel-díjban részesült Karikó Katalin és Krausz Ferenc életútja is egyenes folytatásának tekinthető.

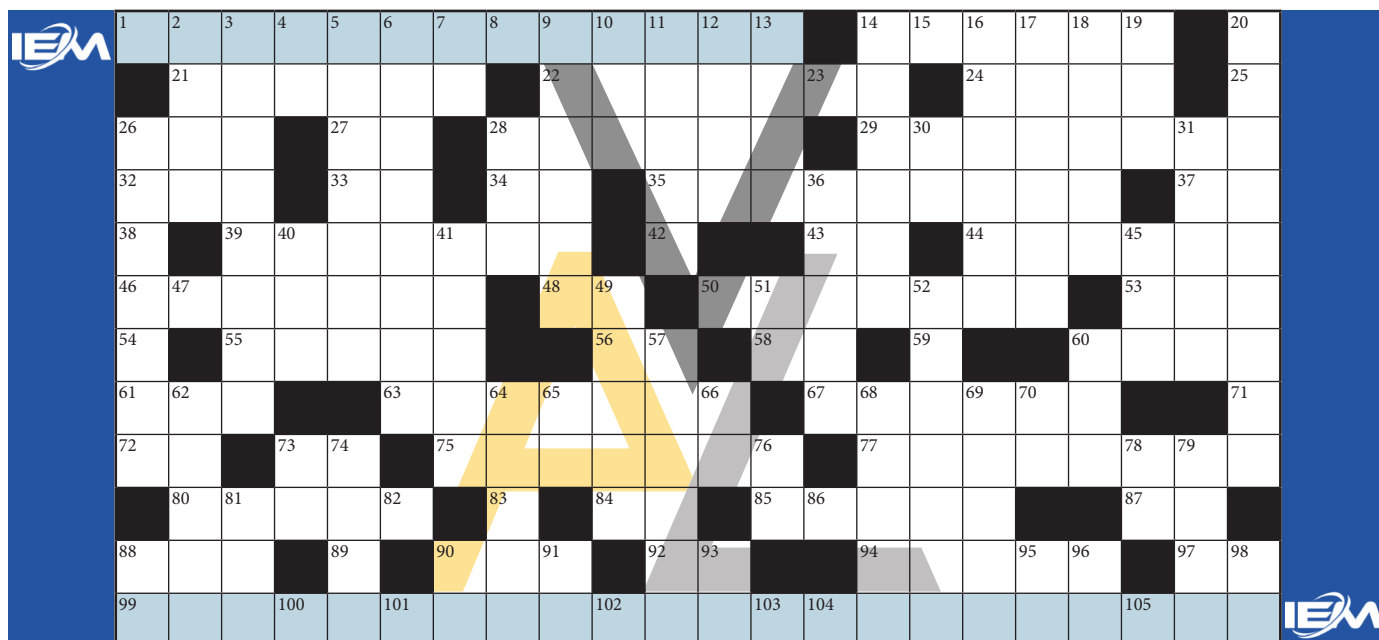
Hogy kiknek, kinek ajánlom jó szívvel e könyvet? Egyrészt a társadalmunk minden gondolkodó tagjának, másrészt az angolt tanulóknak és tudóknak, harmadrészt a könyvben érintett szakmai területek képviselőinek a múltjuk egyes részleteinek megismeréséhez.

Tóth László
ny. egyetemi tanár

¹ Fizikai Szemle, 2001/1 száma

² Engedje meg a Tisztelt Olvasó, hogy a névsort kiegészítsem Szabó Barna nevével, aki a vége-selemes számítások területén tett alapvető megfontolásaival vált nemzetközileg elismertté (<https://mek.oszk.hu/23700/23758/index.phtml>)

Anyagvizsgálók Lapja keresztrejtvény



Vízszintes

1. Az első fizikai Nobel-díjas
14. Szállító németül
20. Többesszám jele
21. Fáradság
22. közösségi oldal
24. Tó olaszul
25. Olasz autók jelzése
26. Öreg
27. Indíték
28. Taposás
29. Erőd bevétele
32. Idegen május
33. Cég forma
34. Részben korszerű!
35. Vallási irányzathoz tartozik
37. Elöl told!
38. Névelő
39. Orvostan hallgató
42. Római ötven
43. Szintén
44. Meggyőző
46. Pizza fajta
48. Zoo rész!
50. Jut neki, juttat
53. Nem mozog
54. Ez
55. Ember
56. Hangtalanul elér!

58. Sárgaréz röv.
59. Luxemburgi autó
60. Síkidom része
61. Nagy ország
63. Latin nyelv
67. Özön
71. Zárszó eleje!
72. Kettős betű
73. Növés része!
75. Régebben használt víz továbbító
77. Drogozó
80. Igyekvő
83. Római ötven
84. Parancsnok röviden!
85. Nem hall
87. Hazánk rövidítése
88. Kettős része!
89. Magánhangzó
90. Iráni uralkodó
92. Házi állat
94. Mosószer
97. Kérdőszó
99. Az első kémiai Nobel-díjas

Függőleges

1. Ábécénk második mássalhangzója
2. Női név
3. Nagyszülő
4. Radon

5. A vatikáni média dokumentum filmje
6. Időmértékes vessző
7. Érd része!
8. Öntés kezdete!
9. Vágás
10. Női ruhadarab
11. Gördül
12. Éghető gáz
13. Becézett női név
14. Lekopó
15. Római szám
16. Megijed
17. Záró elem
18. Afrikai étel
19. Róló része!
20. Apró szerszámmal vágó
23. Első mássalhangzónk
26. Mozart keresztnéve
28. Részben átruház!
30. Ellenérték
31. Másik helyre lép
36. Taposás vég nélkül
40. Idegen Éva
41. Virág tartó
45. Nyit
47. Ing eleje!
49. Ruházati márka
50. Kálium
51. Arzén
52. Kiindulópont

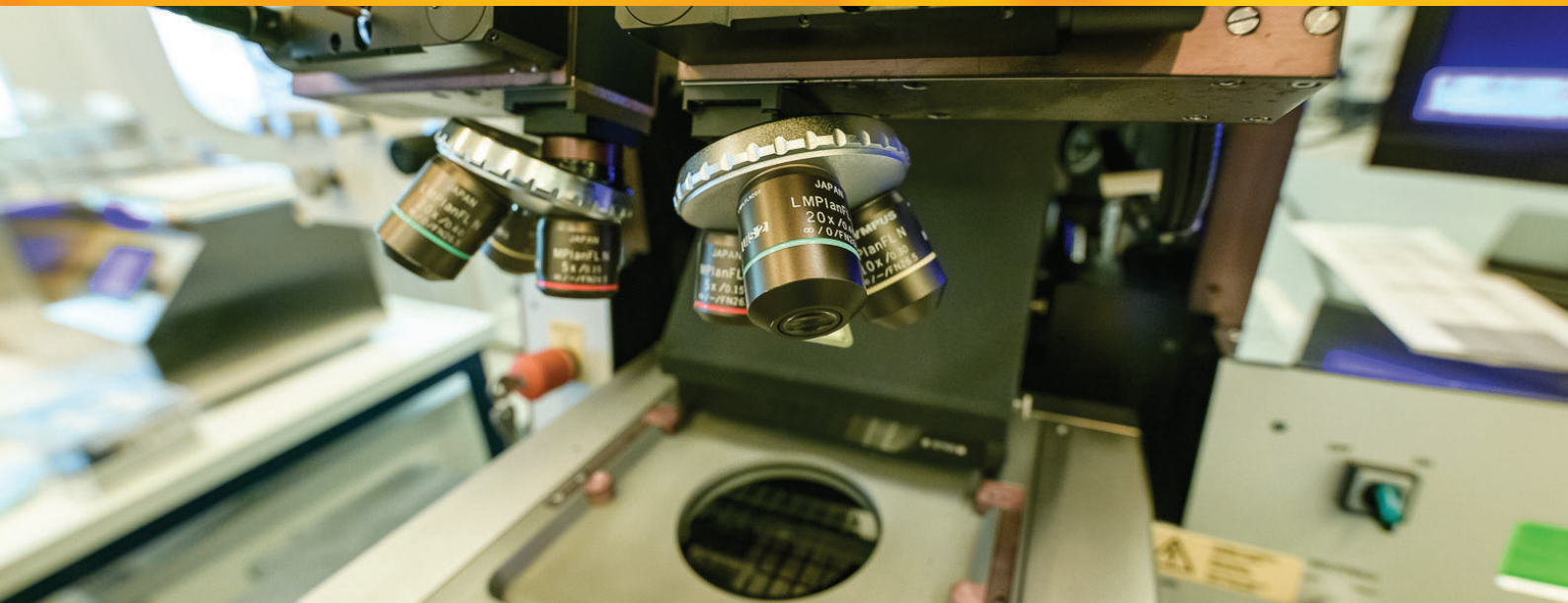
57. Könnyűzenei irányzat rajongója
60. Átmérő része!
62. Rosta
64. Isten arab megnevezése
65. Idegen nem
66. Felső közép!
68. Germán eredetű keresztnév
69. Becézett női név
70. Nemesfém vegyjele
73. Sűrítés
74. Kiskutya
76. Felmenő
78. Lom része!
79. Vég nélkül zokog!
81. Nerc egynemű betűi
82. Csodálkozás szava
86. Ügetni kezd
88. Indulatszó
90. Azonos mássalhangzók
91. Nemesgáz
93. Kettős, kettős idegen szavak elején
95. Barna közepe!
96. Hat kétharmada!
98. Sziget Franciaországban
100. A régies élellyel vegyjele
101. Nehéz fém vegyjele
102. A levegő egyik összetevőjének vegyjele
103. Karbon
104. Ugrás kezdete!
105. Magyar autók jele

A helyes megfejtők között a **IEM 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: **2024. január 5.**

A 2023/II. lapszám keresztrejtvényének nyertese: Ungár Péter



HUN
REN



Energiatudományi
Kutatóközpont





HUN
REN



Energiatudományi
Kutatóközpont

