

TUDOMÁNY AZ INNOVÁCIÓ SZOLGÁLATÁBAN: NEUTRONOS ANYAGVIZSGÁLATI MÓDSZEREK IPARI ALKAMAZÁSAI A BUDAPESTI NEUTRON CENTRUMBAN

Szentmiklósi László¹, Kis Zoltán¹, Maróti Boglárka¹, Szilágyi Veronika¹, Gméling Katalin¹, Len Adél², Rosta László², Kun Tibor², Baranyai Rózsa¹, Fábíán Margit¹, Bottyán László², Janik József¹

¹Budapesti Neutron Centrum, MTA Energiatudományi Kutatóközpont

²Budapesti Neutron Centrum, MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

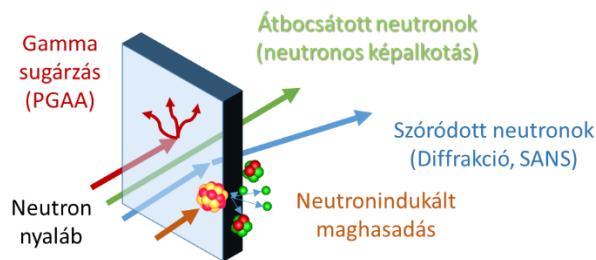
Bevezetés

2019. március 28-án az MTA dísztermében ünnepelhattuk a Budapesti Kutatóreaktor fennállásának 60. évfordulóját, hiszen az akkor még csak 2 MW-os reaktor 1959. március 25-én lépett először működésbe. Jelenleg a Budapesti Neutron Centrum (BNC) [1], az MTA EK és az MTA Wigner FK konzorciuma, koordinálja a Budapesti Kutatóreaktor körül folyó tudományos és ipari K+F tevékenységeket. A Kutatóreaktor a köré települt mérőhelyekkel, tágabb értelemben pedig az MTA csillebérci kampusza az egyik legjelentősebb technikai és tudásközpontnak számít hazánkban. A neutronközpont a hazai és nemzetközi tudományos közösség, valamint az ipari szereplők számára is elérhető nyílt kutatási infrastruktúra, azaz a mérőhelyek kiválóság-alapú felhasználói programok, ill. kétoldalú megállapodások révén az érdekeltek számára hozzáférhetők (CERIC-ERIC, IPERION CH, E-RIHS, SINE 2020). A BNC ipari nyílt napokon [2,3], valamint az Automotive kiállításon is rendszeresen bemutatja hazánkban egyedülálló K+F potenciálját.

A kutatóreaktorban ²³⁵U magok szabályozott láncreakciójával szabad neutronokat keltünk. A neutronok semleges töltésű részecskékként képesek mélyen az anyag belsejébe hatolni és kölcsönhatásaik révén összetételei, anyagszerkezeti és strukturális információt szolgáltatni a vizsgált tárgyról. Míg a széleskörben használt röntgensugárzás az elektronhéjjal, a neutronok az atommagokkal lépnek kölcsönhatásba, így a kémiai, anyagtudományi, régészeti alkalmazások mellett az ipari roncsolásmentes anyagvizsgálatban sem konkurens, hanem egymást kiegészítő és támogató eljárásokról beszélhetünk. Neutronok segítségével a röntgenvizsgálatok méret és szelektivitás-korlátai sokszor átléphetők és a keresett anyagszerkezeti információ ilyen esetekben is megszerezhető.

Módszerek

A neutronok kölcsönhatása a mérendő tárggyal alapvetően kétféle: magreakciók és szóródás. Előbbire példa az ún. sugárzásos neutronbefogás, illetve urán tartalmú minták esetén a neutronindukált maghasadás; utóbbi esetben megkülönböztethetünk pl. rugalmas és rugalmatlan neutronszórást.



1. ábra. A neutronok és az anyag kölcsönhatása

Neutronok keltette magreakciók segítségével lehetőségünk van roncsolásmentes *elemösszetétel-meghatározásra*. Amennyiben a besugárzás kivetett neutronnyalábban történik és a spektrumot a besugárzás közben vesszük fel, prompt-gamma aktivációs analízisről (PGAA) beszélünk [4], míg a kutatóreaktor aktív zónájában történő besugárzással keltett radioaktivitás besugárzás utáni mérésén alapuló technikát műszeres neutronaktivációs analízisnek (NAA) nevezzük [5].

A neutronszóráson alapuló módszerek a *szerkezetvizsgáló eljárások* közé tartoznak, ahol a kapott szórásnépből számítással vezetjük le az anyagszerkezeti információt. Két fontos technika a neutrontdiffrakció (TOF-ND) és a kisszögű neutronszórás (SANS), melyekkel az anyagok kristályszerkezetét, fázisait, zárványait, textúráját, nanoszerkezetét lehet feltárni, így az anyag belső feszültségviszonyait, fáradását jellemezni. Fontos kiemelni, hogy az így nyert kísérleti adatokkal ellenőrizhetők a numerikus végelelem-számolások, amelyekből ezek után sokkal megalapozottabb következtetések vonhatók le.

Az ipari, mérnöki gyakorlatban az egyik legkeresettebb neutronos technika a *képalkotás* [6]. A radiográfia olyan direkt roncsolásmentes leképezési eljárás, ahol a tárgyon átbocsátott neutronsugárzás gyengülésének mérésével a neutronok és a tárgy anyagának kölcsönhatását az emberi szem számára is megjeleníthető képpé alakítjuk. Amennyiben ezt a vetületet több irányból is elkészítjük, matematikai algoritmusok (az ún. Radon-transzformáció és a szűrt visszavetítés) segítségével előállíthatjuk a tárgy háromdimenziós képét; ezt nevezzük tomográfiának. A vizsgált tárgyak belső szerkezetének minél informatívabb roncsolásmentes ábrázolásához esetenként többféle, az anyaggal másként kölcsönható sugárzástípus (termikus, gyors vagy hidegneutron, gamma, röntgen, 3D optikai szkennelés) érdemes használni (multi-modality imaging) [7,8]. A neutronos képalkotás használata akkor előnyös, ha a tárgy túl nagyméretű, nagy sűrűségű, vagy nehéz elemekből áll, és így a röntgensugárzás nem képes áthatolni rajta, illetve ha a leképezendő tárgy fémes és szerves részeket is egyaránt tartalmaz, mely utóbbiakra a röntgensugárzás a mindennapi gyakorlatban elhanyagolható érzékenységgel.

A Budapesti Neutron Centrum 16 anyagvizsgáló mérőállomása közül kettő szolgál roncsolásmentes képalkotásra (RAD [9], NORMA [10]), három elemösszetétel-mérésre (PGAA [11], NIPS [12], NAA [13]), kettő a sugárzás hosszútávú roncsoló hatásának tanulmányozására (BAGIRA, BIO), a többi pedig atomi léptékű, vagy nanométer-skálájú szerkezetvizsgálata.

Esettanulmányok

Roncsolásmentes elemösszetétel-mérés

A neutronos elemanalitikai módszerek roncsolásmentesen képesek pontos és precíz tömbi-összetétel mérésre, akár felszíni bevonat vagy korróziós réteg jelenlétében is. Kiválóan alkalmasak referencia módszernek az ipari anyagvizsgáló laborok mérési protokolljainak validálására, illetve olyan minták mérésére, ahol nem áll rendelkezésre az adott mátrixra vonatkozó, az elterjedtebb műszeres analitikai módszerek (pl. XRF, ICP-OES) által megkívánt hitelesített anyagminta (*certified reference material, CRM*).

A neutronos mérés nem igényel mintaelőkészítést, a minta eredeti állapotában mérhető, majd igény szerint a tulajdonos számára, vagy további vizsgálatok céljára visszaadható. A PGAA és az NAA módszer kiegészíti egymást a mérhető elemek és a kimutatási határok tekintetében

egyenként. A két módszer kombinációjával a periódusos rendszer csaknem egésze lefedhető.

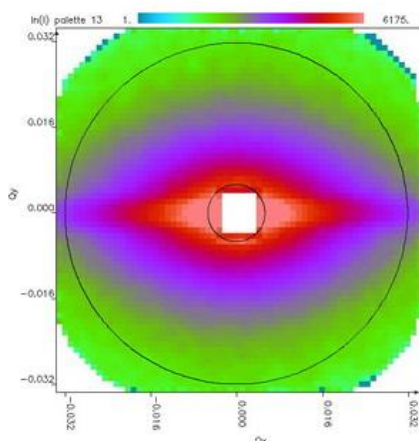
Az egyik legkedvezőbb mátrix az elemösszetétel-mérésre a félvezetőipar és a fotovoltaiikus alkalmazások szempontjából fontos szilícium. A gyártási folyamatba bevitt nyersanyagok tisztaság-ellenőrzését a gyárban rutinszerűen végzik, azonban az ottani protokollt validálni kell számos elemre, kiemelten a bór analizisre. PGAA-val a Si, Fe, Mg főelemek mellett Ca, Mn, La, Ce, Cr, Ni, Cu, Ti, Sb, Zn mellékalkotókat és H, B, Cl, Nd, V és Gd nyomszennyezőket lehetett kimutatni, míg az NAA módszer az As, Ba, Ce, Co, Cr, Cu, Eu, Fe, Ir, La, Lu, Mn, Mo, Nd, Sc, Sm, Tb, Th, U, W, Yb, Zn és Zr elemeket képes tipikusan már ppm mennyiségben is kimutatni. Az egyik vizsgálatunkban tapasztalat eltérések nyomán a USA mérésügyi intézete (NIST) – részben a BNC-ben mért adatokra támaszkodva – felülvizsgálta a SRM 57B anyagminta börtartalmát [14].

Technológiafejlesztési vizsgálatok neutronsórásal

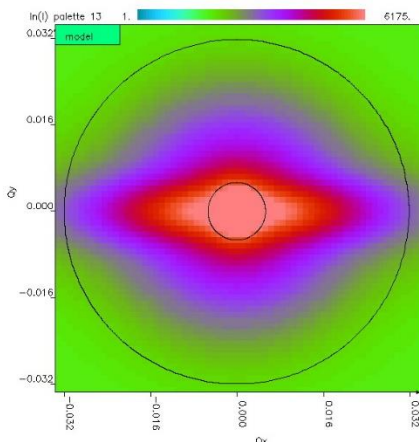
A BNC egyik legkiterjedtebben használt módszere a kisszögű neutronsórás (*Small angle neutron scattering, SANS*). Az alábbiakban egy komplex ipari kísérlet-sorozatot mutatunk be a világítástechnika köréből. Izzószálak élettartam-növelése céljából kálium-alumínium-szilícium adalékolt volfrám huzalokat vizsgáltunk. Ez egy tipikusan kisszögű neutronsórásal vizsgálható kétfázisú rendszer. Bár a volfrámszálas izzólámpák technológiai kérdései ma már háttérbe szorultak, ez az anyag egy kiváló, tiszta modellanyagnak tekinthető nagymennyiségű kisméretű buborékkal – tehát lágy második fázisokkal – keményített, magas hőmérsékleten megnövelt szilárdságú anyagok viselkedésének tanulmányozásához. A tanulmány mind anyagtudományi, mind metodikai eredményeket is szolgáltatott [15].

A gyártása során az adalékokból a kálium az, amelyik az úgynevezett szinterelést követően kisméretű buborékok formájában benne marad a volfrámban. Ez felel a volfrámhuzal magas hőmérsékleti tulajdonságaiért, ill. élettartamáért, ugyanis a feltételezés szerint az izzószál szakadása a szemcseméret növekedésével függ össze, amit viszont a buborékok gátolnak. A kisszögű neutronsórásos mérések segítségével sikerült a kálium buborékok volfrámban való viselkedését leírni a gyártás különböző fázisaiban valamint a kálium, buborékon belüli viselkedését vizsgálni magas, a volfrámszál használati hőmérsékletéhez közeli hőmérsékleten. A volfrám izzószál gyártás

utolsó fázisa váltakozó szálhúzási és hőkezelési lépésekből áll. Az itt bemutatott minták ezen gyártási fázis különböző lépéseiből valók. A neutronszórás a volfrám mátrixban levő kálium buborékokról származik, amelyek mérete a kisszögű szórással vizsgálható mérettartományba esik. A buborékok elnyúltságának, valamint a buborékok méretének meghatározására egy olyan mérést végeztünk, amely lehetővé tette a hőkezeléssel egyidejű kisszögű neutronszórás detektálását is. Egy kétdimenziós adatkiértékelési módszerrel sikerült olyan modellt illeszteni a mérési adatsorozatra, amely kellőképpen leírja a hőkezelés folyamatát, így bizonyítást nyert a feltételezés, hogy a hosszú, elnyúlt buborékok hőkezelés hatására felszakadoznak, majd a rövidebb buborékok gömbösödnek. 1200°C-on már megjelennek a gömb alakú buborékok, de még mindig vannak a mintában 7-es elnyúltsági aránnyal rendelkező kálium buborékok is. A 2. és 3. ábrák a mért és illesztett kétdimenziós szórástérképeket mutatják be.



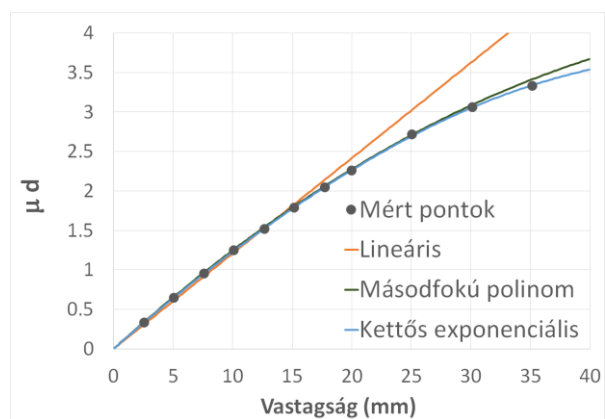
2. ábra 1200°C-on, in-situ hőkezelt minta 2D szórási képe



3. ábra 1200°C-on, in-situ hőkezelt minta 2D illesztett modellje

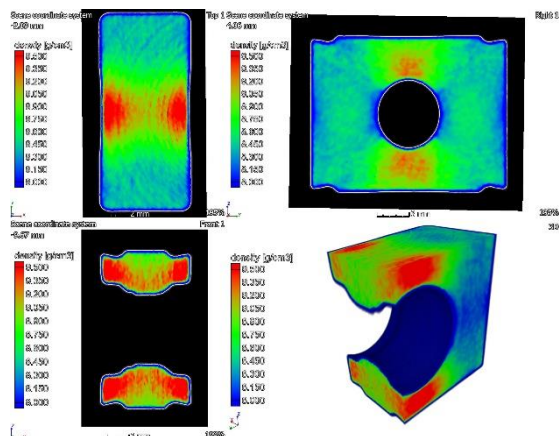
3D anyagsűrűség-térképezés neutrontomográfiával

A RAD mérőhelyen tárgyak statikus vagy dinamikus leképezése végezhető neutron és röntgensugárzással, akár 20 cm-es látómező és számítógép-vezérelt minta-manipulátor segítségével [9]. A világhírű svéd Sandvik Coromant szerszámgépgyártó céggel együttműködésben porkohászati úton előállított wolfram-karbid vágóélek térbeli homogenitását vizsgáltuk [16]. A vizsgálat célja a gyártástechnológia fejlesztése, a gyártási lépések végelem-szimulációinak kísérleti validálása, végső soron a mintadarabok tökéletesebb homogenitásának biztosítása, amely hatással van az élettartamára. A mintadarabok akár 4 cm-es méretük és a nagy-rendszámú összetevőik (W, Co) miatt sem röntgensugárzással, sem hideg neutronokkal nem voltak átvilágíthatók. A RAD mérőhelyen a neutronok energiaeloszlása a meV-től a MeV-ig terjed, amely nyalábszűrők alkalmazásával széles körű optimalizációt tesz lehetővé a behatolási mélység, az időbeli és a térbeli felbontás paraméterterében, minden egyes mérendő minta esetén. Egy adott alapanyag esetén, kalibrációs görbe segítségével az anyagon átbocsátott neutronsugárzás gyengülését közvetlenül összefüggésbe hozhatjuk a lokális sűrűséggel. A neutronnyaláb energiaeloszlása az egymást követő anyagrétegeken megváltozik, így a kalibrációs összefüggés nagy vastagságok esetén jelentősen eltér az egyenestől; ezt nevezzük nyalábkeményedésnek (*beam hardening*, 4.ábra).



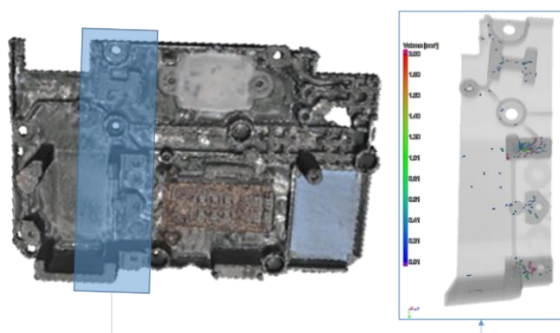
4. ábra. Polikromatikus neutronnyaláb gyengülése különböző vastagságú anyagrétegeken történő áthaladás során

A mért (5. ábra) és a végelem-szimulációival számolt sűrűség-eloszlás igen jó egyezést mutatott [16].



5. ábra. Egy vágószerszám mért sűrűségeloszlása. Piros színnel jelöltük a nagyobb, késsel a kisebb sűrűségű területeket.

Az anyagsűrűség-változásának másik, mondhatnánk nem folytonos esete, ha egy ipari öntvény repedéseket, vagy légbuborékokat tartalmaz. A neutronnyaláb nagy áthatolóképessége lehetővé teszi ezeknek a nagyméretű, komplex alakú pl. alumínium, bronz és acél-öntvény részeknek vagy azok egészének roncsolásmentes vizsgálatát. A kapott (akár többféle modalitással felvett) adatokból megalkothatjuk a tárgy digitális modelljét, amelyet tetszőlegesen elmetszhetünk, részeket átlátszóvá tehetünk és a 3D voxel adatokat numerikusan is analizálhatjuk.

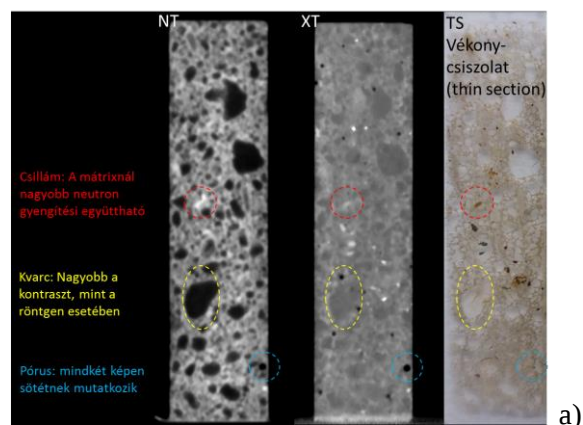


6. ábra. A 3D optikai szkenneléssel nyert digitális modellen a késsel kiemelt részre vonatkozó neutrontomográfiás adatokból 3D pórus- és zárvány-vizualizációt készítettünk

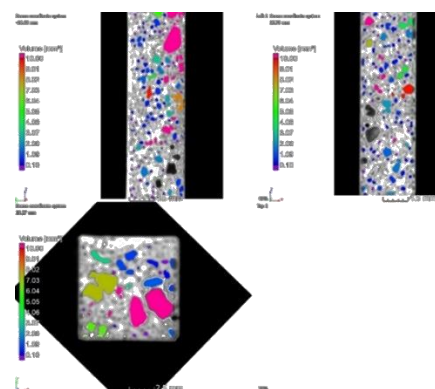
Pórusos építőanyagok vizsgálata

A szilikát alapú porózus anyagok (pl. kerámia, beton, habarcs) széleskörű mérnöki alkalmazása ezen összetett/kompozit anyagok részletes jellemzését teszi szükségessé. Különösen építőipari alkalmazás során van jelentősége a roncsolásmentes vizsgálatoknak, ahol a finomszemcsés alapanyag homogenitása, a pórus

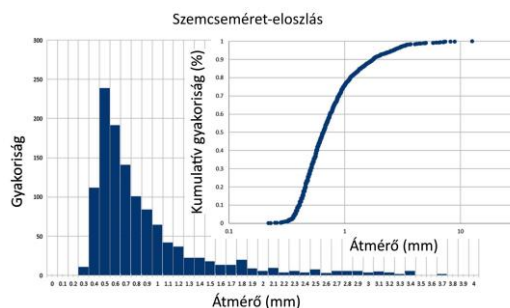
és szemcseeloszlás változásai, illetve a szerkezeti elemekkel való kapcsolat meghatározza az építőanyagok szilárdságát és hosszútávú tartósságát. A szerkezet mikroszkopikus (néhány száz μm – néhány mm) térbeli (3D-s) megismerését teszi lehetővé a képalkotási technikák kombinált alkalmazása. A 7. ábra a neutron- és röntgentomográfiát, illetve a hagyományos, roncsolásos optikai mikroszkópi szöveti vizsgálatot veti össze és bizonyítja a képalkotó technikák hatékonyságát mind a felbontás, mind az alkotók beazonosíthatóságának tekintetében.



a)



b)



c)

7. ábra. a) neutron (NT) és röntgentomográfia (XT) roncsolásmentes, ill. optikai mikroszkóppal felvett roncsolásos metszeti képei (TS) egyazon betonmintáról. b) a numerikus pórusanalízis eredménye színekkel és c) hisztogram formában megjelenítve

A neutron és röntgen elnyelési képek kombinált feldolgozásával lehetővé válik az alkotórészek (alapanyag, pórus, aggregátum szemcsék) elkülönítése (7. ábra). A szegmentációt követően a pórus- vagy szemcseeloszlás, méreteloszlás, alak vagy orientáció önállóan vizsgálható és számszerűsíthető (7. ábra). A kompozit építőanyagok valós térszerkezetének mikroszkópikus léptékű, kvantitatív analizisével valóságosabb bemeneti adatokat szolgáltatathatunk komplex problémák és folyamatok előrejelzéséhez (pl. törésmechanika, folyadék vagy repedés terjedése, különféle beágyazási technológiák okozta orientálódás, szerkezeti elemek határán kialakuló öntési hibák). A képképzés térbeli felbontásának korlátait ugyanakkor figyelembe kell venni, mivel az itt kapott pórusméret-eloszlás számszerűen különbözik a higany porozimetriával kapott adatoktól.

Visszamodellezés (Reverse-engineering) és 3D nyomtatás

A *Reverse Engineering* (visszamodellezés) eljárással lehetőség nyílik régi alkatrészek, elhasznált szerszámok újra gyártására vagy módosítására olyan esetekben is, ha nem, vagy csak részben áll rendelkezésre műszaki dokumentáció. Az ipari gyakorlatban erre a célra bevált 3D optikai szkenneléssel ellentétben a neutron- és röntgensugárzás nemcsak a tárgy felszínét, hanem belső szerkezetét, üregeit, a benne lévő alkatrészek összességét is képes láttatni. A voxel adatokból ún. szegmentációt is végezhetünk, azaz digitálisan szétválaszthatjuk a tárgy alkotórészeit a gyengítési együtthatók alapján, és végül STL formátumba konvertálhatjuk a geometriát (pl. VGStudio MAX Advanced Surface Determination), amely így CAD programokban már közvetlenül felhasználható.



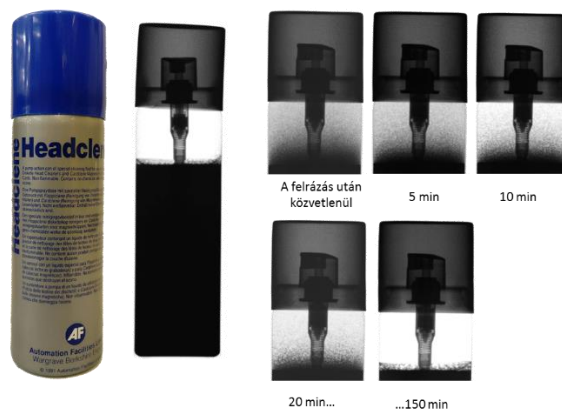
8. ábra. Egy bronz lámpakar és a visszamodellezett digitális modellje

Amennyiben az elkülönített részek anyagi minősége sem ismert, a NIPS-NORMA berendezés [10] kínál megoldást, melyben egy neutronos képképzési és egy sugárzásos neutronbefogáson alapuló elemanalitikai berendezés egy készülékbe van integrálva, és a kiválasztott pontokban meghatározható a lokális elemösszetétel.

A kapott geometriai és összetételi adatokból immár CNC-vel vagy 3D nyomtatással előállíthatjuk a mintadarab pontos másolatát. A modell digitális „negatívját” felhasználva kapható meg az öntőforma. Neutronos méréseink beállításához ezzel a technológiával létrehozhatjuk a vizsgálandó tárgy 1:1 méretarányú másolatát, illetve egyedi mintatartókat, amelyek biztosítják a szabálytalan alakú tárgyak biztos rögzítését a mintamozgatóhoz [17].

Dinamikus folyamatok vizsgálata

A mérendő mérnöki tárgyak egy része időben változik. Ilyenkor hasznát vehetjük a dinamikus radiográfiának, amely leginkább a pár másodpercestől a pár napos folyamatok vizsgálatára alkalmas. Áramló közegek, fluidumok felszívódása pórusos anyagokon [18], fázisátalakulás [19], kondenzáció, mozgó gépelemek vizualizációja, lezárt tartályban történő szintmérés (9. ábra) a legjellemzőbb alkalmazások.



9. ábra. Egy felrázott tisztító sprayben kialakult hab ülepedése az idő függvényében

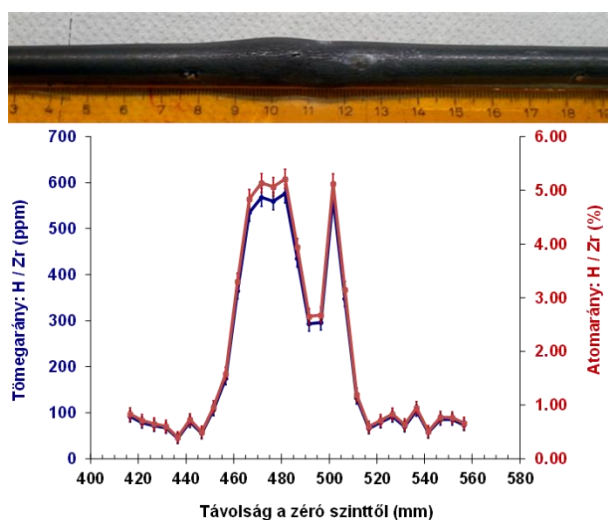
Cirkónium fűtőelemburkolat ridegedésének vizsgálata

A Paksi Atomerőmű reaktorblokkjaiban is használt cirkónium fűtőelemburkolatokban szélsőséges, baleseti körülmények között kialakulhat a szekunder hidridizáció, amely az anyagot rideggé, törékennyé teszi, csökkentve annak mechanikai ellenállóképességét, így az esetlegesen

inhermetikussá válhat [20]. A jelenség összefüggésbe hozható a hidrogén fokozott jelenlétével a burkolat felfűvódott szakaszában.

A burkolatok hidrogéntartalmának meghatározása általában roncsolásos módszerrel, ún. forró extrakciós eljárással történik. Az mért értékek az éppen vizsgált (általában kisméretű) anyagdarabra vonatkoznak, ezért a minta nagyobb térfogatának átlagos koncentrációjára, főként inhomogén hidrogén-eloszlás mellett, nehezen általánosíthatók. A neutronos képalkotás és elemanalízis kombinációjával (PGAI-NT) azonban roncsolásmentesen, szelektíven és helyfüggő módon mérhettük a hidrogéntartalmat.

Egy – az MTA EK által üzemeltetett CODEX-LOCA berendezéssel szimulált – baleseti helyzet során megrongálódott E110G fűtőelem burkolat lokális hidrogéntartalmát mutatjuk be a 10. ábra a minta hossz tengelye mentén [21]. A magasabb hidrogéntartalom és a mechanikai károsodás bekövetkezésének helye a várakozásoknak megfelelően jó egyezést mutatott.



10. ábra. Egy, a CODEX-LOCA berendezéssel szimulált baleseti helyzet során megrongálódott E110G fűtőelem burkolat lokális hidrogéntartalma a hossz tengelye mentén, PGAI-NT módszerrel mérve.

Összefoglalás

A Budapesti Neutron Centrumban a nemzetközileg is jegyzett, roncsolásmentes neutronos anyag- és szerkezetvizsgáló mérőhelyek állnak rendelkezésünkre. Nyílt kutatási infrastruktúráként felhasználói programok, ill. kétoldalú megállapodások révén a neutroncentrum kutatási és innovációs potenciálja hozzáférhető a magyar és

a nemzetközi kutatói közösség, valamint az ipari szereplők számára.

Köszönetnyilvánítás

A felsorolt eredmények a SINE 2020 (EU H2020 Grant No. 654000), a V4-Korea RADCON (NKFIH NN17 127102), az NKFIH K17 124068 és a CAK (NVKP_16-1-2016-0014) projektek, továbbá az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíj anyagi támogatásával jöttek létre. Köszönjük a Rogante Engineering Office, Horváth László, Benyács Gábor és Gadó János közreműködését.

Irodalom

- [1] Budapesti Neutron Centrum, www.bnc.hu.
- [2] SYNERGI2018 konferencia, www.sine2020.eu/industry/synergi2018.html.
- [3] Science, innovation, competitiveness konferencia, www.bnc.hu/ind4con19/en/overview.
- [4] G.L. Molnár, Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis, (2004) Kluwer Academic Publishers. doi:10.1007/978-0-387-23359-8.
- [5] I. Salma, Elemanalitikai koszerű módszerei, in: G. Záray (Ed.), Elemanalitika Korszerű Módszerei, Akadémiai Kiadó, 2006: pp. 417–506.
- [6] I.S. Anderson, R.L. McGreevy, H.Z. Bilheux, Neutron imaging and applications : a reference for the imaging community, Springer (2009).
- [7] L. Szentmiklósi, Z. Kis, T. Belgya, B. Maróti, L.Z. Horváth, M. Papp, Roncsolásmentes képalkotás neutronokkal és röntgensugárzással, Fizikai Szemle 67 (2017) 240–244.
- [8] J. Banhart, A. Borbély, K. Dzieciol, F. Garcia-Moreno, I. Manke, N. Kardjilov, A.R. Kaysser-Pyzalla, M. Strobl, W. Treimer, X-ray and neutron imaging – Complementary techniques for materials science and engineering, Int. J. Mater. Res. 101 (2010) 1069–1079. doi:10.3139/146.110382.
- [9] Z. Kis, L. Szentmiklósi, T. Belgya, M. Balaskó, L.Z. Horváth, B. Maróti, Neutron Based Imaging and Element-mapping at

- the Budapest Neutron Centre, Phys. Procedia. 69 (2015) 40–47.
doi:10.1016/j.phpro.2015.07.005.
- [10] Z. Kis, L. Szentmiklósi, T. Belgia, NIPS–NORMA station—A combined facility for neutron-based nondestructive element analysis and imaging at the Budapest Neutron Centre, Nucl. Instruments Methods A 779 (2015) 116–123.
doi:10.1016/j.nima.2015.01.047.
- [11] L. Szentmiklósi, T. Belgia, Z. Révay, Z. Kis, Upgrade of the Prompt-Gamma Activation Analysis (PGAA) and the Neutron Induced Prompt-gamma Spectroscopy (NIPS) facilities at the Budapest Research Reactor, J. Radioanal. Nucl. Chem. 286 (2010) 501–505.
doi:10.1007/s10967-010-0765-4.
- [12] L. Szentmiklósi, Z. Kis, T. Belgia, A.N. Berlizov, On the design and installation of a Compton-suppressed HPGe spectrometer at the Budapest neutron-induced prompt gamma spectroscopy (NIPS) facility, J. Radioanal. Nucl. Chem. 298 (2013) 1605–1611. doi:10.1007/s10967-013-2555-2.
- [13] L. Szentmiklósi, D. Párkányi, I. Sziklai-László, Upgrade of the Budapest neutron activation analysis laboratory, J. Radioanal. Nucl. Chem. 309 (2016).
doi:10.1007/s10967-016-4776-7.
- [14] NIST SRM 57b - Silicon Metal, www-s.nist.gov/srmors/view_detail.cfm?srm=57B.
- [15] A. Len, Volfrám huzalok vizsgálata kisszögű neutronszórással, PhD értekezés, http://teo.elte.hu/minosites/ertekezes2009/en_a.pdf. (2009)
- [16] H. Staf, Z. Kis, L. Szentmiklósi, B. Kaplan, E. Olsson, P.-L. Larsson, Determining the density distribution in cemented carbide powder compacts using 3D neutron imaging, Powder Technology 354 (2019) 584–590
- [17] L. Szentmiklósi, B. Maróti, Z. Kis, J. Janik, L. Zoltán, Use of 3D mesh geometries and additive manufacturing in neutron beam experiments, J. Radioanal. Nucl. Chem. 320 (2019) 451–457
doi:10.1007/s10967-019-06482-0.
- [18] V. Crupi, B. Fazio, A. Gessini, Z. Kis, M.F. La Russa, D. Majolino, C. Masciovecchio, M. Ricca, B. Rossi, S.A. Ruffolo, V. Venuti, TiO₂–SiO₂–PDMS nanocomposite coating with self-cleaning effect for stone material: Finding the optimal amount of TiO₂, Constr. Build. Mater. 166 (2018) 464–471.
doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.172.
- [19] A. Kiss, M. Balaskó, L. Horváth, Z. Kis, A. Aszódi, Experimental investigation of the thermal hydraulics of supercritical water under natural circulation in a closed loop, Ann. Nucl. Energy. 100 (2017) 178–203. doi:10.1016/j.anucene.2016.09.020.
- [20] E. Slonszki, Z. Hózer, I. Groma, A. Gémes György, G. Lajtha, Az atomerőművekben használt cirkóniumötvözetek anyagszerkezeti vizsgálata, Nukleon. 11 (2018) 212.
https://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/11_1_212_Slonszki.pdf
- [21] E. Kozsda-Barsy, K. Kulacsy, Z. Hózer, M. Horváth, Z. Kis, B. Maróti, I. Nagy, R. Nagy, T. Novotny, E. Perez-Feró, A. Pintér-Csordás, L. Szentmiklósi, Post-test examinations on Zr-1%Nb claddings after ballooning and burst, high-temperature oxidation and secondary hydriding, J. Nucl. Mater. 508 (2018) 423–433.
doi:10.1016/j.jnucmat.2018.05.072.

A szerzők a Budapesti Neutron Centrum munkatársai, ahol interdiszciplináris alap- és alkalmazott kutatásokat folytatnak roncsolásmentes elemvizsgáló, szerkezetvizsgáló és képalkotó technikák felhasználásával. A BNC műszerparkjában több unikális berendezés is található, így máshol nem megvalósítható kísérleteket is végezhetünk, jellemzően nemzetközi együttműködések, EU-támogatott projektek, illetve ipari kutatás-fejlesztési feladatok formájában.

