

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

Szentmiklósi László,¹ Kis Zoltán,¹ Maróti Boglárka,¹ Szilágyi Veronika,¹ Gméling Katalin,¹ Len Adél,² Rosta László,² Kun Tibor,² Baranyai Rózsa,¹ Fábíán Margit,¹ Bottyán László,² Janik József¹

¹Budapesti Neutron Centrum, MTA Energiatudományi Kutatóközpont

²Budapesti Neutron Centrum, MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

2019. március 28-án az MTA dísztermében ünnepelhattük 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 Energiatudományi Kutatóközpont és az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont konzorciuma koordi-

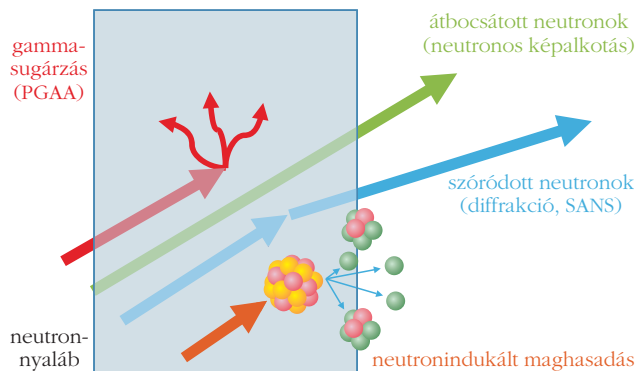
nálja a Budapesti Kutatóreaktor körül folyó tudományos és ipari K+F tevékenységeket. A Kutatóreaktor a köré települt mérőhelyekkel, tágabb értelemben pedig az MTA csillebérci kampusza az egyik legjelentősebb technikai és tudásközpontnak számít hazánkban. A neutronközpont a hazai és nemzetközi tudományos közösség, valamint az ipari szereplők számára is elérhető nyílt kutatási infrastruktúra, azaz a mérőhelyek kiválóság alapú felhasználói programok, illetve kétoldalú megállapodások révén az érdekeltek számára hozzáférhető (CERIC-ERIC, IPERION CH,



A szerzők a Budapesti Neutron Centrum munkatársai, ahol interdiszciplináris alap- és alkalmazott kutatásokat folytatnak roncsolásmentes elemanalitikai, szerkezetvizsgálati és képalkotási 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.

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 továbbá a Rogante Engineering Office, *Horváth László*, *Benyács Gábor* és *Gadó János* közreműködését.



1. ábra. A neutronok és az anyag kölcsönhatása.

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 ^{235}U magok szabályozott láncreakciójával szabad neutronokat keltünk. A neutronok semleges töltésű részecskékként képesek mélyen az anyag belsejébe hatolni és kölcsönhatásaik révén anyagösszetételei, -szerkezeti és strukturális információt szolgáltatni a vizsgált tárgyról. Míg a széleskörben használt röntgensugárzás az elektroneutrónnal, 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 a sugárzásos neutronbefogás, illetve urántartalmú minták esetén a neutronindukált maghasadás; utóbbi esetben megkülönböztethetünk például rugalmas és rugalmatlan neutronszórást (1. ábra).

Neutronok keltette magreakciók segítségével lehetőségünk van roncsolásmentes *elemösszetétel-meghatározásra*. Amennyiben a besugárzás kivezetett 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 neutroindiffrakció (TOF-ND) és a kisszőgű neutronszórás (SANS), amelyekkel 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 végelem-számolások, amelyekből ezek után sokkal megalapozottabb következtetések vonhatók le.

Az ipari, mérnöki gyakorlatban az egyik legkerekesebb neutronos technika a *képkötés* [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 úgynevezett 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 sugárzást (termikus, gyors vagy hidegneutron, gamma, röntgen, 3D optikai szkennelés) érdemes használni (multi-modality imaging) [7, 8]. A neutronos képkötés használata akkor előnyös, ha a tárgy túl nagy méretű, 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, amely utóbbiakra a röntgensugárzás a mindennapi gyakorlatban elhanyagolható érzékenységű.

A Budapesti Neutron Centrum 16 anyagvizsgáló mérőállomása közül kettő szolgál roncsolásmentes képkötésre (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 nanométerskálájú szerkezetvizsgálata.

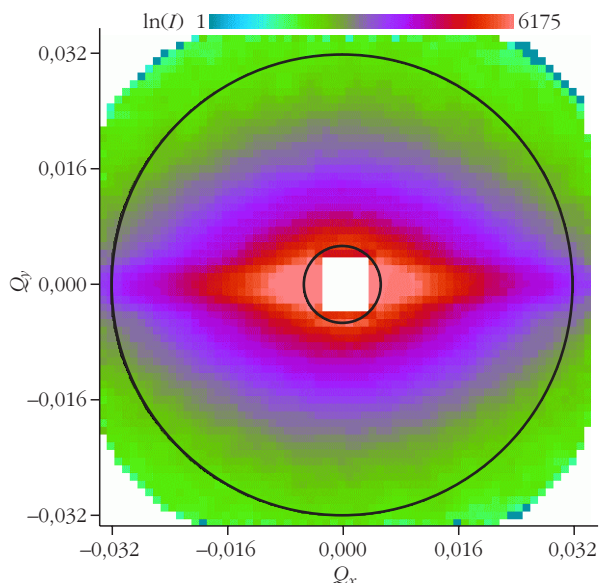
Esettanulmányok

Roncsolásmentes elemösszetétel-mérés

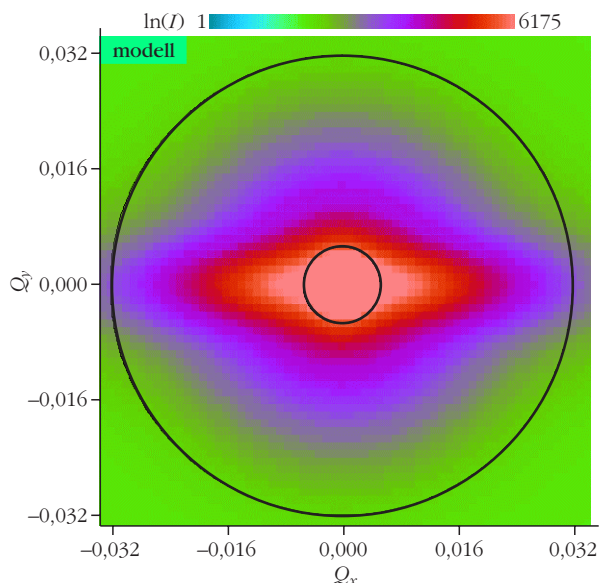
A neutronos elemanalitikai módszerek roncsolásmentesen képesek pontos és precíz tömbösszetétel-mérésre, akár felszíni bevonat vagy korróziós réteg jelenlétében is. Kiválóan alkalmasak referenciamódszernek az ipari anyagvizsgáló laborok mérési protokolljainak validálására, illetve olyan minták mérésére, ahol nem áll rendelkezésre az adott mátrixra vonatkozó, az elterjedtebb műszeres analitikai módszerek (például 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 – a mérhető elemek és a kimutatási határok tekintetében – kiegészíti egymást. A két módszer kombinációjával a periódusos rendszer csaknem egésze lefedhető.

Elemösszetétel-mérésre az egyik legkedvezőbb mátrix a – félvezetőipar és a fotovoltaiikus alkalmazások szempontjából fontos – szilícium. A gyártási folyamatba bevitt nyersanyagok tisztaság-ellenőrzését a



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



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

gyárban rutinszerűen végzik, azonban az ottani protokollt számos elemre, kiemelten a bór analízisére validálni kell. 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].

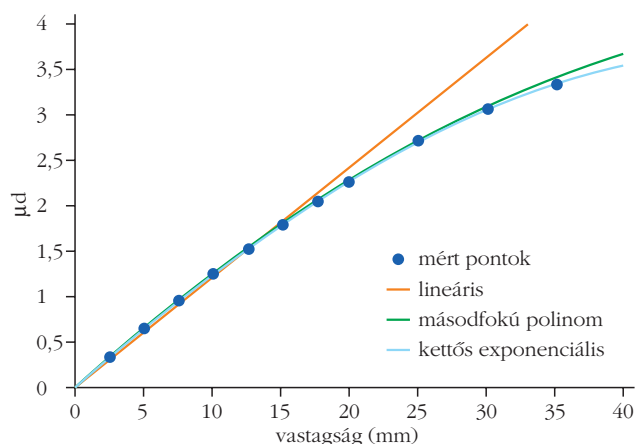
Technológiafejlesztési vizsgálatok neutronszórással

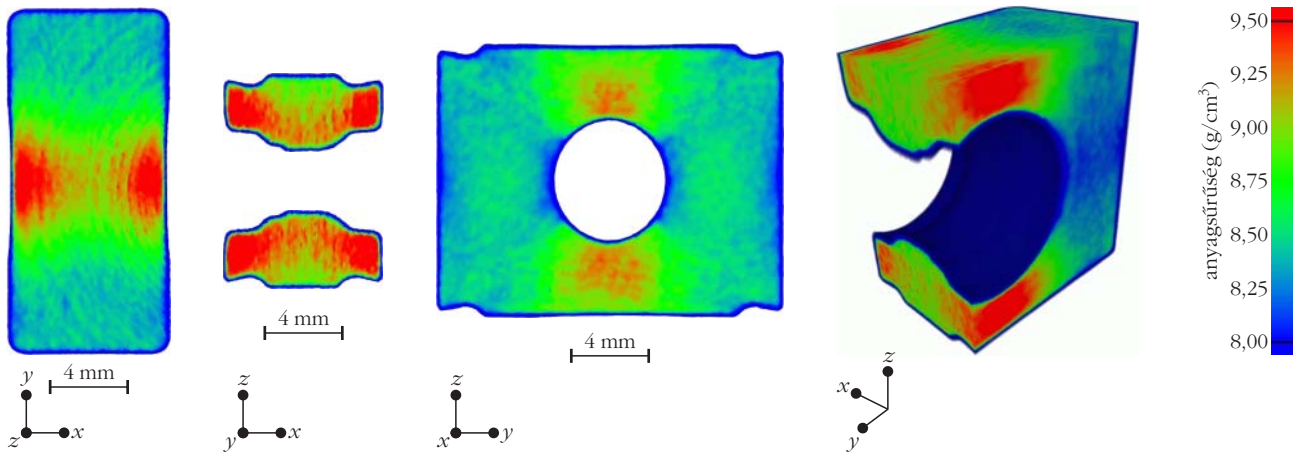
A BNC egyik legkiterjedtebben használt módszere a kisszögű neutronszórás (*small angle neutron scattering*, SANS). Az alábbiakban egy komplex ipari kísérletsorozatot mutatunk be a világítástechnika köréből. Izzószálak élettartam-növelése céljából kálium-alumínium-szilícium adalékolt volfrámhuzalokat vizsgáltunk. Ez egy tipikusan kisszögű neutronszórással vizsgálható kétfázisú rendszer. Bár a volfrámszálak 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 gyártás során a kálium az az adalék, amelyik a szinterelést követően kisméretű buborékok formájában benne marad a volfrámban. Ez felel a volfrámhuzal magas hőmérsékleti tulajdonságaiért, illetve élettartamáért, ugyanis – a feltételezés szerint – az izzószál szakadása a szemcseméret növekedésével függ össze, amit viszont a buborékok gátolnak. A kisszögű

neutronszórásos mérések segítségével sikerült a káliumbuborékok 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 volfrámmátrixban levő káliumbuborékokról 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 neutronszórás detektálását a hőkezelés hőmérsékletének függvényében. Egy kétdimenziós adatkiértékelési módszerrel olyan modellt sikerült illeszteni a mérési adatsorozatra, amely kellőképpen leírja a hőkezelés folyamatát, így bizonyítást nyert a feltételezés, hogy a hosszú, elnyúlt buborékok hőkezelés hatására felszakadnak, majd a rövidebb buborékok gömbösöd-

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





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

nek. 1200 °C-on már megjelennek a gömb alakú buborékok, de még mindig vannak a mintában 7-es elnyúltsági aránnyal rendelkező káliumbuborékok is. A 2. és 3. ábrák a mért és illesztett kétdimenziós szórástérképeket mutatják be.

3D anyagsűrűség-térképezés neutrontomográfiával

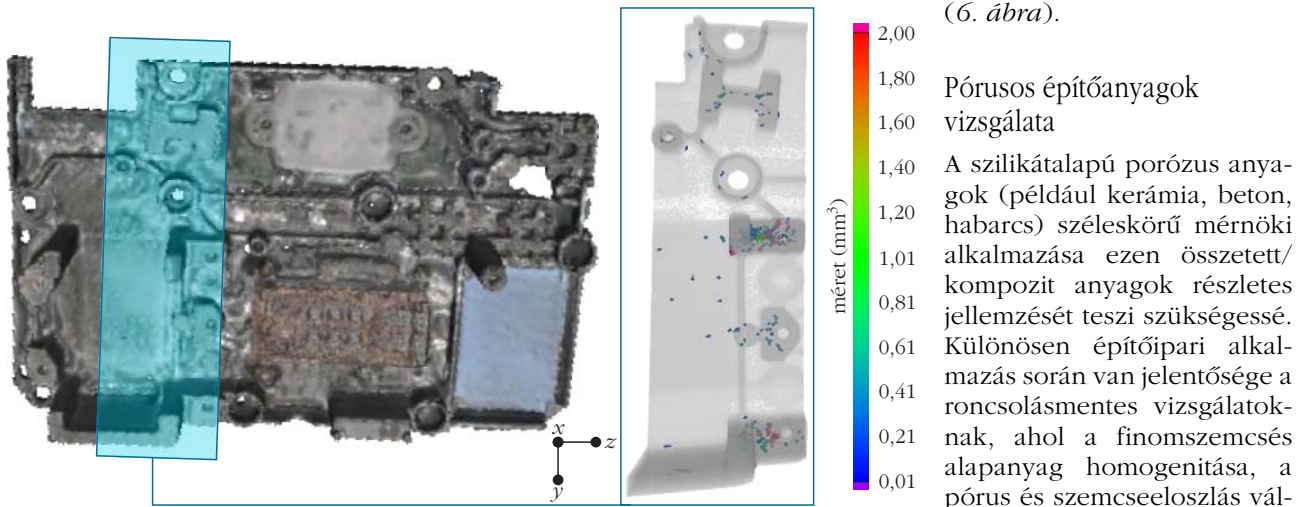
A RAD mérőhelyen tárgyak statikus vagy dinamikus leképezése végezhető neutron- és röntgensugárzással, akár 20 cm-es látómező és számítógép-vezérelt mintamanipulátor segítségével [9]. A világhírű svéd Sandvik Coromant szerszámgyártó céggel együttműködésben porkohászati úton előállított wolfram-karbid 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 átvilághatók. A RAD mérőhelyen a neutronok energiael-

oszlása a meV-től a MeV-ig terjed, amely nyalábszűrők alkalmazásával széles körű optimalizációt tesz lehetővé a behatolási mélység, az idő- 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).

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

Az anyagsűrűség-változás másik, mondhatnánk nem folytonos esete, ha egy ipari öntvény repedéseket vagy légbuborékokat tartalmaz. A neutronnyaláb nagy áthatolóképesége lehetővé teszi ezen nagyméretű, komplex alakú – például alumínium-, bronz- és acélöntvény – részeknek vagy azok egészének roncsolásmentes vizsgálatát. A kapott (akár többféle modalitással felvett) adatokból megalkothatjuk a tárgy digitális modelljét, amelyet tetszőlegesen elmentszhetünk, részeket átlátszóvá tehetünk és a 3D voxeladatokat numerikusan is analizálhatjuk (6. ábra).

6. ábra. A 3D optikai szkenneléssel nyert digitális modellen a kékkel kiemelt részre vonatkozó neutrontomográfias adatokból 3D pórus- és zárványvizualizációt készítettünk.



Pórusos építőanyagok vizsgálata

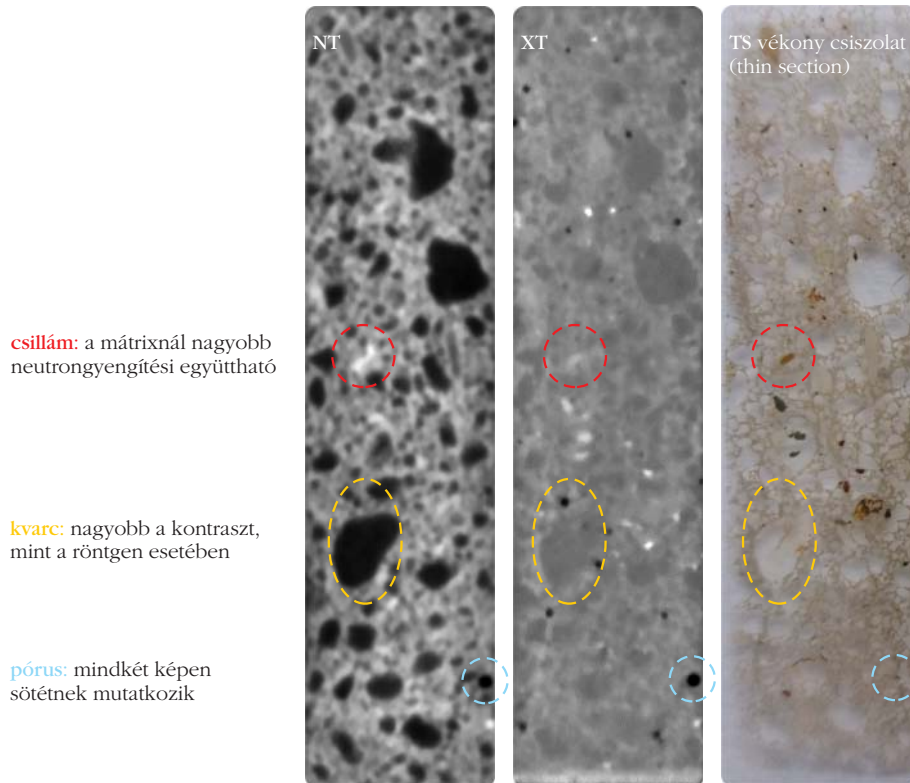
A szilikátalapú porózus anyagok (például kerámia, beton, habarcs) széleskörű mérnöki alkalmazása ezen összetett/kompozit anyagok részletes jellemzését teszi szükségessé. Különösen építőipari alkalmazás során van jelentősége a roncsolásmentes vizsgálatoknak, ahol a finomszemcsés alapanyag homogenitása, a pórus és szemcseeloszlás vál-

tozásai, 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 neutron- és röntgenfelvétel képek kombinált feldolgozásával lehetővé válik az alkotórészek (alapanyag, pórus, aggregátumszemcsék) elkülönítése (7. ábra). A szegmentációt követően a pórus- vagy szemcse- és méreteloszlás, alak vagy orientáció önállóan vizsgálható és számszerűsíthető (7. ábra). A kompozit építőanyagok valós térszerkezetének mikroszkopikus léptékű, kvantitatív analizisével valósághűbb bemeneti adatokat szolgáltatunk komplex problémák és folyamatok előrejelzéséhez (például törésmechanika, folyadék vagy repedés terjedése, különféle beágyazási technológiák okozta orientálódás, szerkezeti elemek határán kialakuló öntési hibák). A képalkotás 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

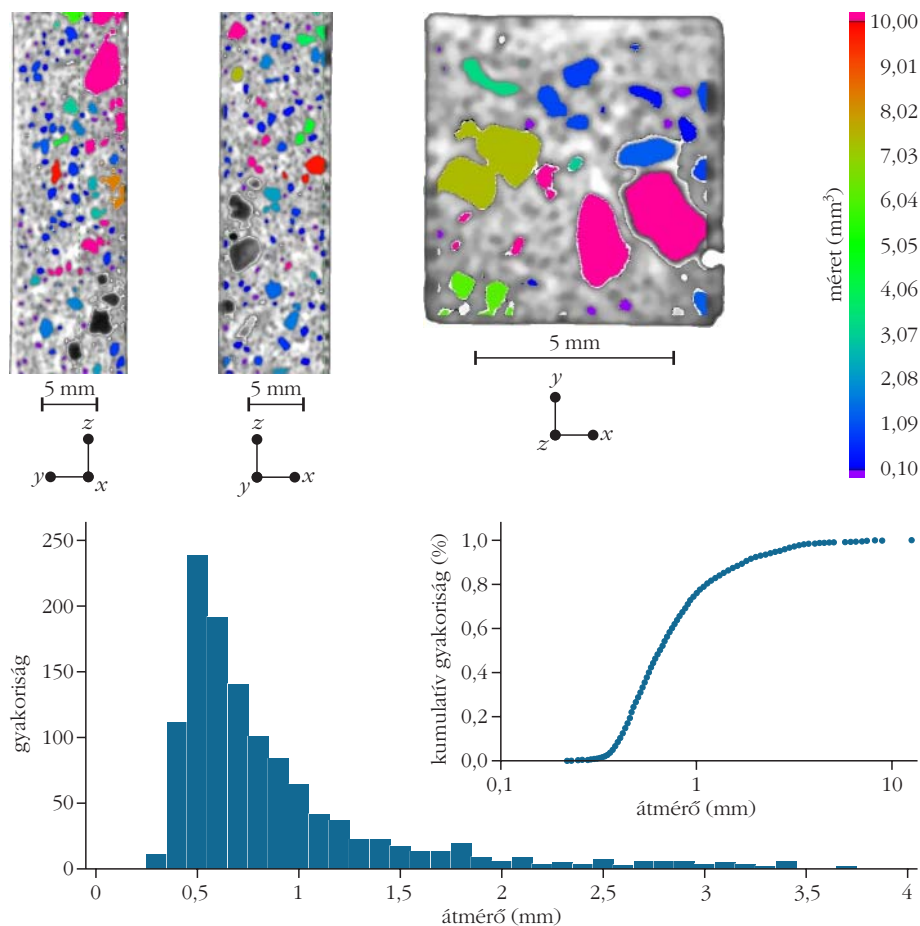
A *Reverse Engineering* (viszszamodellezés) eljárással lehetőség nyílik régi alkatrészek, elhasznált szerszámok újragyártására vagy módosítására olyan esetekben is,



csillám: a mátrixnál nagyobb neutrongyengítési együttható

kvarc: nagyobb a kontraszt, mint a röntgen esetében

pórus: mindkét képen sötétnek mutatkozik



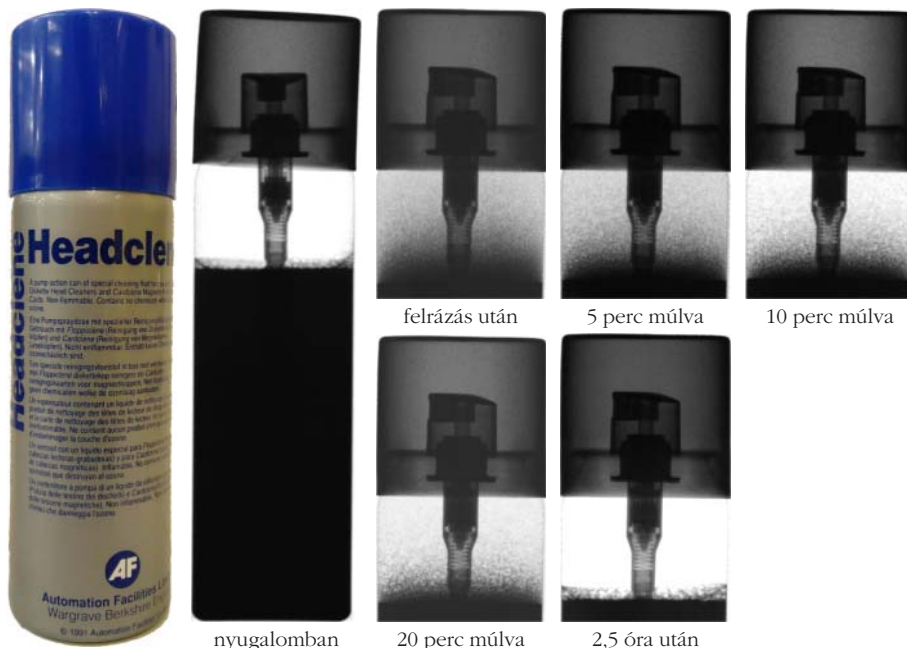
7. ábra. a) Neutron- (NT) és röntgentomográfia (XT) roncsolásmentes, illetve optikai mikroszkóppal felvett roncsolásos metszeti képei (TS) egyazon betonmintáról. b) A numerikus pórusanalízis eredménye színekódolva és c) histogram formájában megjelenítve.



8. ábra. Bronz lámpakar és a visszamodellezett digitális modellje.

amikor nem, vagy csak részben áll rendelkezésre műszaki dokumentáció (8. ábra). 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 úgynevezett szegmentációt is végezhetünk, azaz a gyengítési együtthatók alapján digitálisan szétválaszthatjuk a tárgy alkotórészeit, és végül STL formátumba konvertálhatjuk a geometriát (például VGStudio MAX Advanced Surface Determination), amely így CAD programokban már közvetlenül felhasználható.

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



Amennyiben az elkülönített részek anyagi minősége sem ismert, a NIPS-NORMA berendezés [10] kínál megoldást, amelyben egy neutronos képalkotási 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].

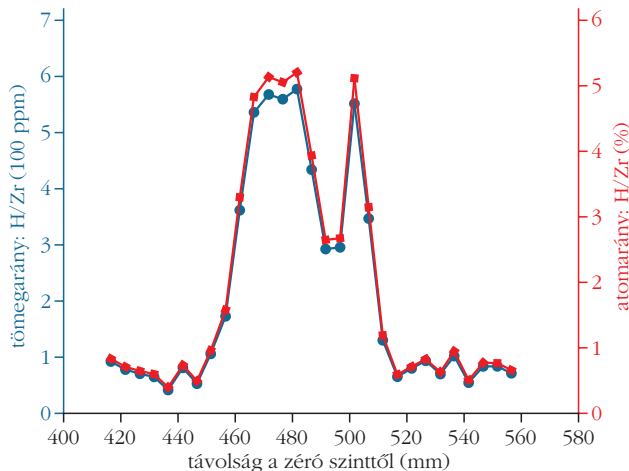
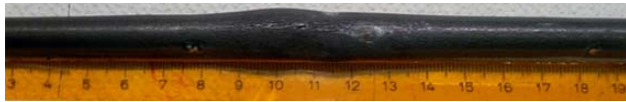
Dinamikus folyamatok vizsgálata

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.

Cirkónium fűtőelem-burkolat ridegedésének vizsgálata

A Paksi Atomerőmű reaktorblokkjaiban is használt cirkónium fűtőelem-burkolatokban szélsőséges, bal- eseti 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 felfűvödött szakaszában.

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



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

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

Összefoglalás

A Budapesti Neutron Centrumban a nemzetközileg is jegyzett, roncsolásmentes neutronos anyag- és szerkezetvizsgáló mérőhelyek állnak rendelkezésünkre. Nyílt kutatási infrastruktúráként felhasználói programok, illetve kétoldalú megállapodások révén a Neutroncentrum kutatási és innovációs potenciálja hozzáférhető a magyar és a nemzetközi kutatói közösség, valamint az ipari szereplők számára.

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*. Kluwer Academic Publishers (2004) doi:10.1007/978-0-387-23359-8.
5. Salma I.: Elemanalitikai koszerű módszerei. in: Záray G. (szerk.): *Elemanalitika Koszerű Módszerei*. Akadémiai Kiadó, Budapest, (2006) 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. Szentmiklósi L., Kis Z., Belgya T., Maróti B., Horváth L. Z., Papp M.: 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. Belgya: 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. Belgya, 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. Belgya, 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?srn=57B.
15. Len L.: Völgfrám huzalok vizsgálata kisszögű neutronszórással. PhD értekezés (2009), http://teo.elte.hu/minosites/ertekezes2009/len_a.pdf.
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. Venuiti: 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. Slonszki E., Hózer Z., Groma I., Gémes Gy. A., Lajtha G.: 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.