

Komputertomográfia alkalmazása a gyakorlatban

Application of computer tomography in practice

Kazup Ágota^a, Bubonyi Tamás^b, Filep Ádám^c, Gácsi Zoltán^d

^{a, b, c, d}Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, Miskolci Egyetem

^atudományos segédmunkatárs, femagota@uni-miskolc.hu; ^btudományos segédmunkatárs, fembubo@uni-miskolc.hu;

^ctudományos segédmunkatárs, femfilep@uni-miskolc.hu; ^d egyetemi tanár, zoltan.gacsi@uni-miskolc.hu

Kulcsszavak

komputertomográfia, duál röntgensöves komputertomográfia, porozitás analízis, képelemzés, 3D finomszerkezet vizsgálat

Keywords

computed tomography, dual x-ray tube computed tomography, porosity analysis, image analysis, 3D fine microstructure examination

Absztrakt

A technológiai fejlődés olyan roncsolásmentes anyagvizsgáló módszereket kíván, melyek gyorsan és pontosan kivitelezhetőek. A komputertomográfia az anyagokban lévő fázisok 3D-s szerkezetének széleskörű jellemzésére alkalmas módszer, amelynek gyakorlati alkalmazhatóságát mutatja be ez a cikk. Bemutatjuk a kompozit fémhabok, az alumínium ötvények, a poliuretán habok és közetek vizsgálati lehetőségeit, kitérve a képelemzés alkalmazására.

Abstract

Technological advances require non-destructive material testing methods that can be performed quickly and accurately. Computed tomography is a method for the broad characterization of the 3D structure of phases in materials, the practical applicability of which is presented in this article. We present the possibilities of testing composite metal foams, aluminum castings, polyurethane foams and rocks, including the application of image analysis.

1. Bevezetés

A komputertomográfia (CT) és a mintadarabokról készült 3D-s röntgenfelvételek kvantitatív elemzése egyre népszerűbb a mikroszkópos vizsgálatok mellett. A módszerrel információ kapható a tárgyak szerkezetéről, azok károsítása nélkül. Mind a geometria, mind pedig a különböző fázisok, köztük az anyaghiányosságok is vizsgálhatóak az anyag rendszámának és vastagságának függvényében. A próbadarabok CT felvételei átemelhetőek CAD és véges-elemes szimulációs szoftverbe (FEM) [1, 2]. Az alkalmazott gyorsító feszültség szerint a komputertomográfoknak több típusa ismert. Meghatározó, hogy a keletkeztetett röntgensugarak mekkora anyagvastagságon és intenzitással képesek a darabokon áthaladni. A CT-be helyezhető in-situ berendezéssel a tárgyak 3D leképezésekor egyéb vizsgálatok is végezhetőek a környezeti terhelések az anyag szövetszerkezetére való hatásainak részletes megismerése érdekében. Terhelés közben a felvétel történhet folyamatosan vagy szakaszosan [3].

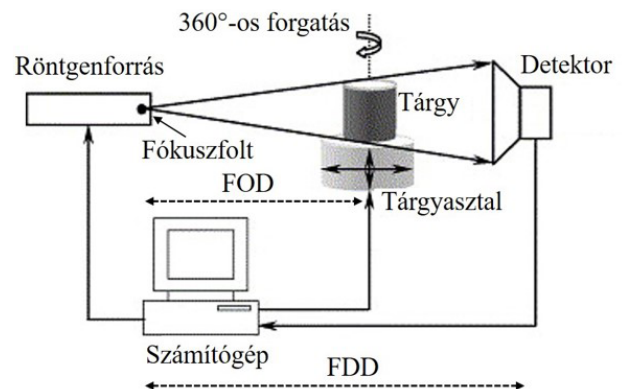
A vizsgálati technológiát mind egyetemi laboratóriumok (pl. a Miskolci Egyetem 3D finomszerkezet vizsgálati laboratóriuma), mind nagyobb vállalatok (pl. az Audi Hungaria Zrt. és a NEMAK Győr Alumíniumöntöde Kft.) egyaránt alkalmazzák, hiszen alkalmazási területe rendkívül széles. Mintadarabok és kész termékek egyaránt vizsgálhatóak. Többek között biológiailag kompatibilis, kovácsolt Ti6Al4V és acél implantátumokban lévő pórusok mennyiségére és méretére vonatkozóan [2], illetve AlSi10Mg porból lézeres technológiával előállított próbatestekben lévő pórusok mennyiségének, méretének és alakjára vonatkozóan [4] végeztek CT vizsgálatokat. Vallabhaneni és munkatársai [5] 7075 (T651) típusú alumínium ötvözet korróziós hajlamát vizsgálták szakító próbatest geometriai változásának vizsgálatával. Wang és társai [6] AlSi10Mg porból szelektív lézeres olvasztással előállított próbatestben mesterségesen létrehozott furatok alakváltozását és az anyag károsodását figyelték meg szakítóvizsgálat közben. Dong

és társai Al-Zn ötvözet szilárd/olvadék fázishatárának morfológiáját vizsgálták kristályosodás közben [7].

Cikkünk célja, hogy szélesebb körben ismertté tegyük a vizsgálati módszert és a benne rejlő lehetőségeket gyakorlati példákon keresztül. Ismertetjük az általunk működtetett CT berendezést és felhasználási területeit.

2. A komputertomográf működési elve, módszertana

A komputertomográf működése a fény-árnyék keletkezésének elvén alapul. Ahogyan a fényforrás-vetületi hely távolságának és a fényforrás-tárgy távolságának aránya megadja az árnyék nagyságát, úgy a röntgenforrás-vetületi hely (detektor) távolságának (FDD) és a röntgenforrás-tárgy távolságának (FOD) aránya megadja a tárgy röntgenképének nagyítását (M). Ezt jelzi az (1) és a (2) egyenlet, valamint mutatja az 1. ábra. A pixel térbeli megfelelője az úgynevezett „voxel”. Méretét a 3D-s egységnyi kocka élének hosszúsága adja, és amiből felépül a 3D-s röntgenfelvétel. Minél kisebb, annál jobb a felbontás. Ennek meghatározásakor a detektor felbontóképességének (d), (hány μm -nek felel meg egy pixel) is szerepe van. Fontos paraméter még a röntgenső fókuszfolt (S) mérete [3].



1. ábra: A komputertomográf működési elve (a [8] publikáció nyomán)

$$M = \frac{FDD}{FOD} [-] \quad (1)$$

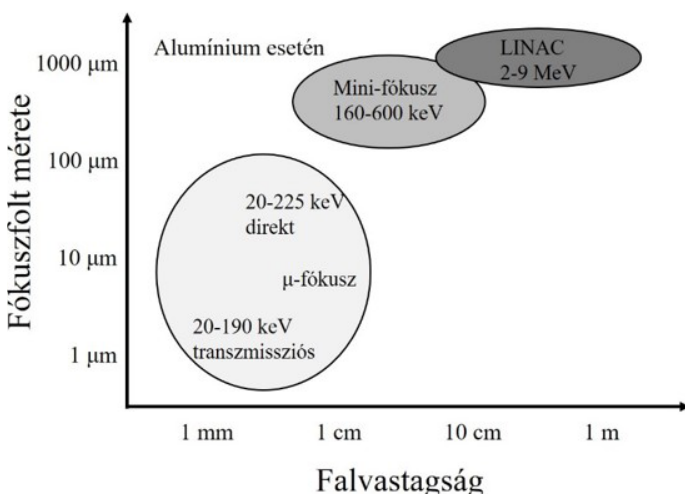
$$\text{Voxel méret} = \frac{d}{M} + \left(1 - \frac{1}{M}\right) s \quad [\mu\text{m}] \quad (2)$$

A vizsgálat során a röntgensugár a röntgenső kilépő ablakán keresztül jut a vizsgálati tárgyhoz. A tárgy anyagminősége és vastagsága befolyásolja a rajta átjutó röntgensugarak mennyiségét. Minél nagyobb az anyag rendszáma és minél nagyobb a falvastagság, annál inkább csökken az átjutott sugár intenzitása, melynek mennyiségét a detektor érzékeli. Kisebb intenzitás esetén halványabb képet kapunk. A (3) Lambert-Beer törvény írja le mindezt, ahol a detektor által érzékelt röntgensugarak intenzitása (I) a kezdeti röntgensugár intenzitástól (I_0), a lineáris csillapítási együtthatótól (μ) és a minta vastagságától függ (X). A lineáris csillapítási együttható a vizsgált anyag sűrűségétől, atomszámától és az alkalmazott röntgensugár energiájától függ [3].

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu X} [-] \quad (3)$$

A röntgensöveket teljesítményük szerint csoportosítjuk. Vastagabb tárgyak vizsgálatakor nagyobb gyorsító feszültséget kell alkalmazni annak érdekében, hogy a röntgen fotonok megfelelő mértékben átjussanak a darabon, nagyobb kontrasztot adva. A mikrofókuszú röntgensövek 20-225 keV, a minifókuszú 160-600 keV, az orvosi célra alkalmazott nagy energiájú röntgensugárzást létrehozó LINAC (Linear Accelerator) típusú csövek [9] pedig már 2-9 MeV gyorsító feszültséggel dolgoznak (2. ábra).

A darabok vastagságának növekedésével a röntgenkép felbontása csökken (nagyobb az alkalmazott fókuszolt), kevésbé részletes információt tudunk kinyerni a felvételekből. Különböző típusú CT berendezések más és más mintaméretekkel dolgoznak, így felbontóképességük eltér. Az ipari CT-nek 5-150 μm , mikro-CT-nek 1-100 μm , illetve a nano-CT-nek 0,5 μm körüli a felbontóképessége. Röntgenmikroszkóppal akár kisebb, mint 100 nm felbontás is elérhető [3].



2. ábra: A komputertomográfok típusai gyorsító feszültség szerint [10]

A vizsgálat során a tárgy 360°-ban való körbeforgatásakor adott, egyénileg megválasztható lépésként röntgenfelvételek készülnek. Megadható, hogy egy-egy felvételhez mennyi ideig tegyük ki a tárgyat sugárzásnak [3]. Ha nagyobb mennyiségű röntgen foton éri a darabot, akkor kontrasztosabb röntgenképet kapunk. A vizsgálat alatt több lehetőség is rendelkezésre áll a minta mozgatására a lehető legpontosabb felvételek elkészítésének érdekében.

Az elkészült 2D röntgenfelvételeket számítógépes program segítségével rekonstruálni szükséges. A 3D-s kép megalkotásához a röntgenképeket a felvételük pozíciója szerint ($^\circ$) fűzi össze [3]. A kontrasztkülönbségek révén az egyes fázisok láthatóvá válnak, illetve alakjuk és méretük is jellemezhető.

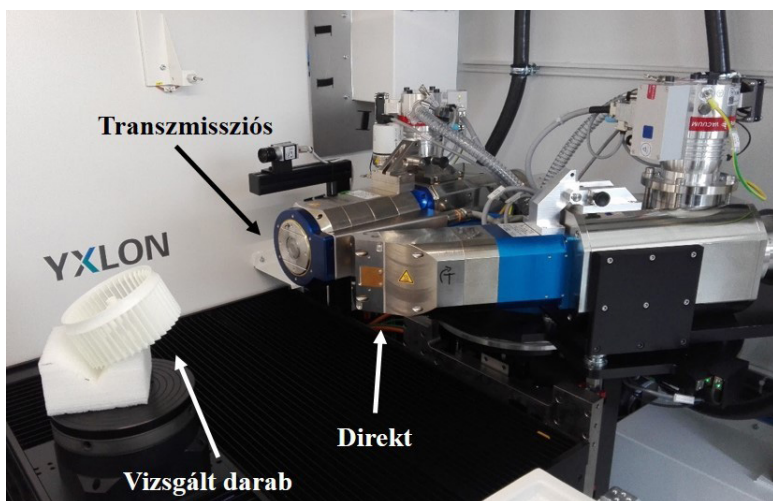
3. Az YXLON FF35 duál röntgensöves komputertomográf

A Miskolci Egyetem Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetének 3D finomszerkezet vizsgálati laboratóriuma 2018-tól működtet két röntgensövel – transzmissziós és direkt – felszerelt, 2D és 3D képalkotásra alkalmas komputertomográfot. Az YXLON FF35 berendezéssel (3. ábra) $\varnothing 300 \times 500$ mm nagyságú, maximálisan 30 kg tömegű (metrológia esetén 15 kg) tárgyak vizsgálhatóak, a transzmissziós cső esetében 20-190 keV (max. 15 W), a direkt röntgenső esetén pedig 20-225 keV gyorsító feszültséggel (max. 280 W). Mindkét cső katódjának és antikatódjának anyaga volfrám. A direkt csővel 4 μm , a transzmissziós csővel 3D-ben 0,6 μm , 2D-ben 0,15 μm felbontás is elérhető. A röntgensöveket a 4. ábra mutatja be. A klimatizált berendezésnek 7 tengelyes manipulációs, valamint antivibrációs rendszere van. A detektor 249x300 mm nagyságú 1792x2176 felbontással. A mérési hibaérték maximálisan 3,5 $\mu\text{m} + L/75$.

A berendezéssel a tárgyak geometriájának és a mérés gyorsaságának függvényében több típusú szkennelési eljárás használható: gyors-, normál-, szélességében növelt (széles tárgyak vizsgálatára)-, helikális (magas tárgyak vizsgálatára) szkennelés, valamint „duál”, azaz szélességben növelt helikális szkennelés. A képalkotás során előfordulhat, hogy a felvétel zajossá válik. Ennek oka egyrészt a gyorsító feszültség ingadozása és a minta vastagság-különbségeinek következtében bekövetkező



3. ábra: Az YXLON FF35 típusú CT berendezés [11]



4. ábra: A FIEK által fejlesztett vékonyfalú műanyag járókerék[12,13] vizsgálata az YXLON FF35 berendezés transzmissziós röntgenscövével

megtekinthető. A felvételeken a szkennelés közben kialakult zajok szűrhetőek, szükség szerint szűrkekép átalakítások végezhetőek rajtuk. A test térfogatából eltávolíthatóak a szükségtelen vagy a kiértékelés szempontjából zavaró térfogati részek. A kontraszt beállításával jobban kiemelhetők a vizsgálni kívánt részletek, de bináris kép is létrehozható. A darab geometriai eltérései, a fázisok elhelyezkedése és hozzávetőleges méretei szűrkeségi szintek szerint meghatározhatóak. A kvantitatív elemzéshez a szerkezet jellegének megfelelő kiértékelő algoritmust kell alkalmazni, például porozitás vagy habszerkezet analízist. A vizsgálandó fázisok felülete a szűrkeségi szintek (kontraszt) alapján detektálható, ami szerint a szoftver a jellemzőket számítja, mint az egyedi objektumok térfogata, felülete, vagy a gömbszerűségük, azaz a gömb alakhoz való hasonlóságuk mértéke.

helyi sugárintenzitás esések lehetnek. Másrészt a detektoron előfordulhat néhány hibás, inaktív pixel, amelyek a képkalkotáskor a darab forgatásának hatására „gyűrű” alakot rajzolnak a felvételen. Az egyes hatások kialakulásának csökkentésére képkalkotást segítő alkalmazások használhatóak, mint például pixelhiba-redukció vagy zajcsökkentés.

A röntgenberendezés vizsgálati lehetőségeinek palettáját jelenleg is bővítjük húzó, nyomó és hajlító in-situ anyagvizsgáló berendezéssel. A terhelések alatt így közvetlenül, valós időben vizsgálhatjuk az anyag szerkezetének változását, a törési folyamat kialakulását és a tönkremenetel mechanizmusát.

4. Az YXLON FF35 berendezés gyakorlati alkalmazásai

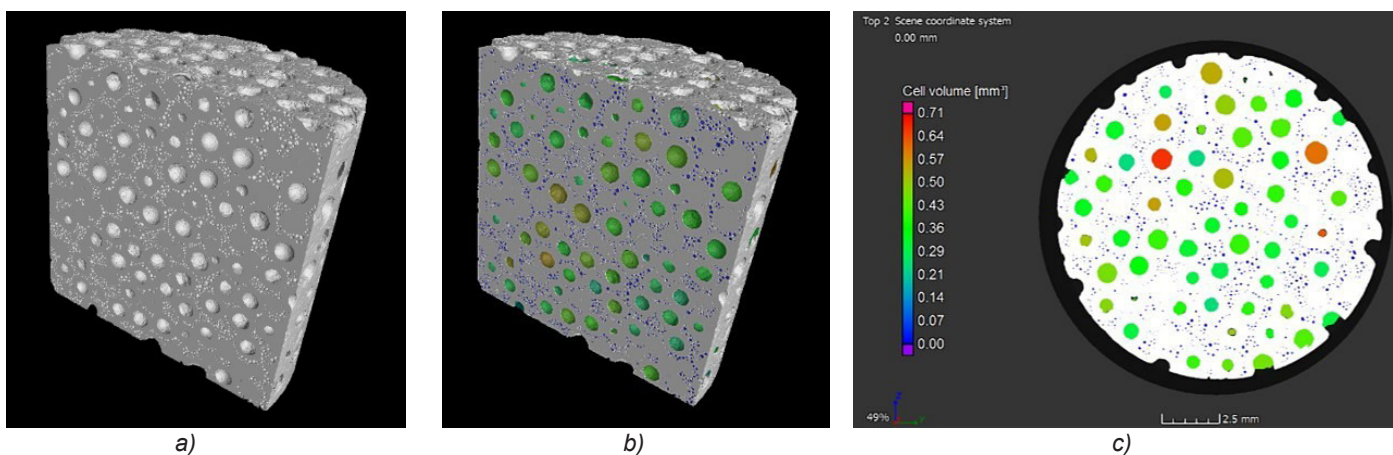
A kiértékelés VGStudio Max 3.2 szoftverrel, külön munkaállomáson nagyteljesítményű számítógéppel történik. A 2D röntgenfelvételek rekonstrukciója után létrejön a vizsgált tárgy 3D-s leképezése. A virtuálisan létrehozott test forgatható, nagyítható és metszeti nézetekben is

4.1 Kompozit fémhab

A CT-vel történő vizsgálat gyakorlati példaként az 5. ábra egy porozitás analízist mutat be kerámia gömbhéjakkal erősített alumínium (AlSi12) mátrixú szintaktikus kompozit fémhabon ($D=15\text{ mm}$), ahol a pórusok térfogathányadának megállapításában vettünk részt [14]. A c) ábrarész bal oldalán lévő színskála a detektált fázisok térfogatát adja meg. A vizsgálat transzmissziós röntgenscövvel történt, a felbontás pedig $5,35\text{ }\mu\text{m}$ (voxelméret) volt. A kis és nagyméretű gömbhéjak belső üreges szerkezete, azaz a pórusok az elemzés során elválaszthatóvá váltak egymástól. A kisebb méretű kerámia gömbhéjak a nagyobb méretűek között helyezkednek el hálószerűen.

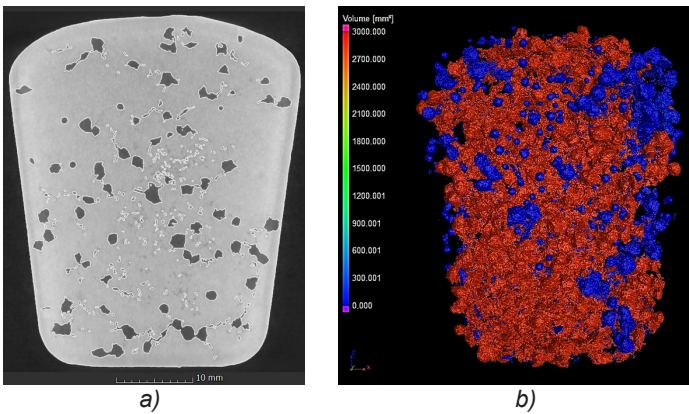
4.2 Alumínium öntvény

A 6. ábrán 80 mbar nyomás alatt kristályosodott alumínium ún. sűrűség-index (DI) próbatest látható ($D_{\text{max}}=4\text{ mm}$), melyet a fémolvadék gáztartalmának meghatározására használnak az öntödék [15]. Baloldalon, az a) ábrán a

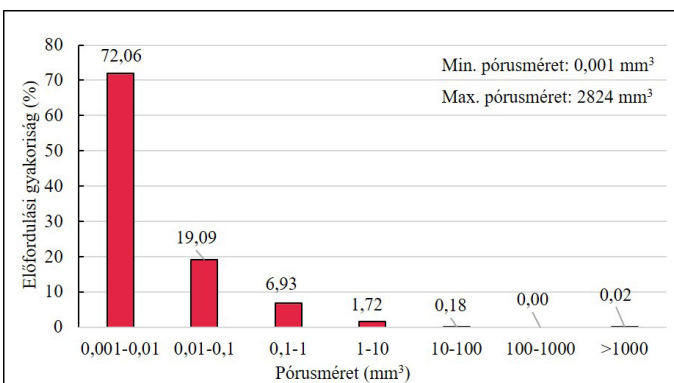


5. ábra: Kerámia gömbhéjakkal erősített alumínium mátrixú kompozit minta CT felvétele és a benne található bimodális eloszlású pórusok vizsgálata [14]

- a) 3D-s hosszmetseti nézetben, elemzés előtt;
b) 3D-s hosszmetseti nézetben, elemzés után;
c) 2D-s felülnézetű metsetben, az elemzés után



6. ábra: Porozitás analízis DI próbatesten (alumínium)
a) A 2D-s hosszszelzeti röntgenfelvétel a pórushatárok definiálásával,
b) A 3D-s pórusszerkezetet a pórusméretekkel – mm³



7. ábra: A DI próbatestben lévő pórusok térfogat szerinti eloszlása

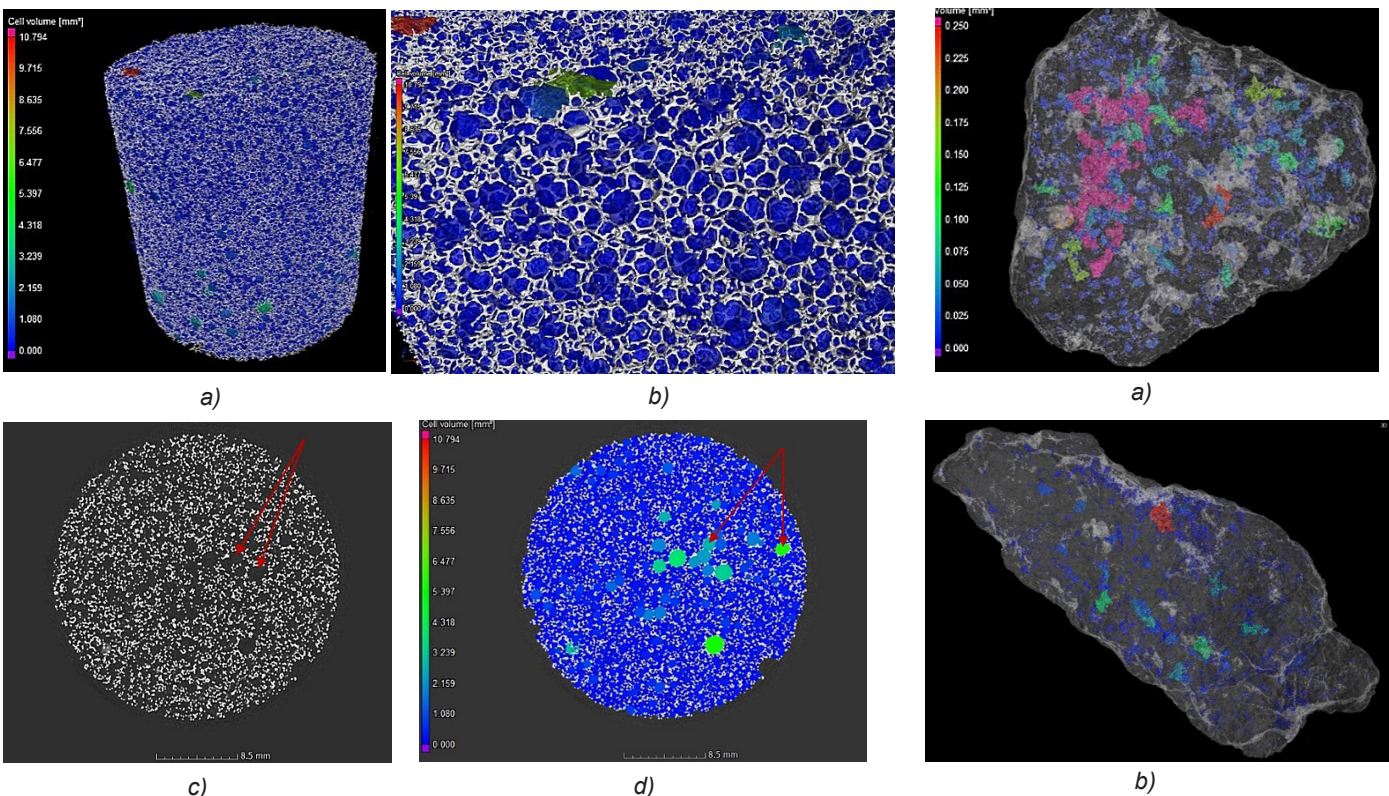
próbatést 2D-s hosszszelzeti röntgenfelvétele látható a pórusok határfelületének jelölésével, míg a jobb oldalon, a b) ábrán pedig a próbatest 3D-s pórusszerkezete figyelhető meg azok térfogatának jelölésével. A pórusok térfogat szerinti eloszlása a 7. ábrán látható. A vizsgálatkor ebben az esetben is a transzmissziós röntgensövet használtuk, a voxelek pedig 21 µm méretűek voltak. A vizsgálat során egyértelművé vált, hogy helyileg hogyan oszlanak el a pórusok, illetve mekkora nagyságúak. A pórusok nagyságából az olvadék oxidos szennyezettségére is lehet következtetni [16].

4.3 Poliuretán hab

A 8. ábrán bemutatott nyílt cellás poliuretánhab mintán (D=30mm) a cellaszerkezet vizsgálatában vettünk részt [17]. A direkt röntgensóvel kb. 15µm voxelmérettel képeztük le a darabot. A kisméretű celláktól jól elkülöníthető és jellemezhető a néhány nagyobb méretű szabályos cella.

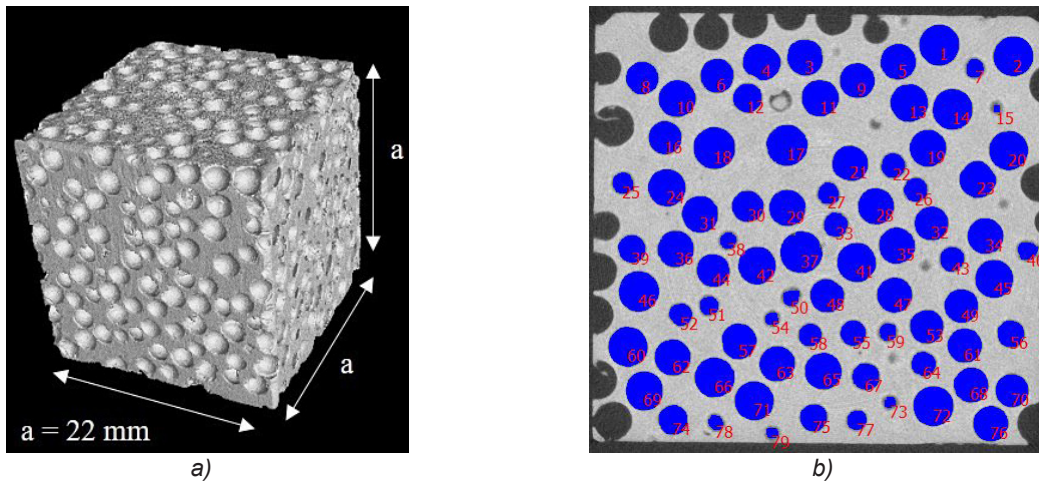
4.4 Andezit kőzet

A 9. ábra pedig aszfaltkeverékekben felhasznált, különböző magyarországi lelőhelyekről származó andezit kőzet-szemcsék porozitás elemzését szemlélteti, amely során a zárt pórusok mennyiségének (térfogathányadának) meghatározásában működünk közre. A kőzetek átmérője kb. 16mm volt, amit a direkt röntgensóvel szkenneltünk be. A felvételek felbontása 6 µm volt [18].



8. ábra: Poliuretánhab szerkezetének vizsgálata
a) A 3D-s pórusszerkezet, b) A 3D-s pórusszerkezet nagyított felvétele,
c) A cellaszerkezet metszeti képe, d) A nagy és szabályos cellák jellemzése

9. ábra: Különböző lelőhelyekről származó andezit kőzetek zárt porozitásának vizsgálata CT-vel
a) Andezit minta-1, b) Andezit minta-2 [18]



10. ábra: a) Fémhab mintáról készült CT felvétel és b) a CT felvétel egy metszetén a pórusok detektálása CProb képelemző programmal 2D-ben

5. Képelemzés

A 3D röntgenfelvételek metszeti képei ugyanakkor egyéb képelemző programokkal, például a Leica QWin, ImageJ vagy az intézetünkben fejlesztett CProb szoftverrel is elemezhetőek [19-21]. A 10. ábra egy fémhab 3D röntgenfelvételét (a) és metszeti pórusszerkezetét (b) ábrázolja. A vizsgálat tárgyát képező fázisok jellemzői – pl. a méretük, alakjuk, illetve mennyiségük (1. táblázat) – a 3D-s kiértékeléshez hasonlóan meghatározhatóak. Jelen esetben egy képpont 51,3 μm -nek adódott. A CT felvételen a voxelméret 11 μm . Ezen felül az eloszlásuk is számszerűen jellemezhető különböző mérési módszerekkel [22]. A 2D röntgenfelvételek képelemzése lehetővé teszi a csiszolati próbatestek készítése nélküli vizsgálatot, amennyiben a 3D elemzésre nincs mód.

1. táblázat: A vizsgált pórusok jellemzőinek mért adatai

Pórusok: (79 db)	Területe [mm ²]	Kerülete [mm]	Átmérője [mm]	Körszerűsége [-] teljesen kör = 1
átlaga	2,02	5,13	1,57	1,12
+/- szórása	0,93	1,42	0,43	0,09
minimum mérete/értéke	0,10	1,15	0,39	1,00
maximum mérete/értéke	3,46	7,39	2,12	1,52

6. Összefoglalás

Cikkünk célja a komputertomográfias és képelemző vizsgálati technikák népszerűsítése, hogy a kutatók és a minőségellenőrzéssel foglalkozók számára hasznos és inspiráló ötleteket adjunk vizsgálati lehetőségeik kiegészítésére. A CT működési elvének ismertetésével reméljük, érthetőbbé tettük az eljárást a távolabbi szakterületen jártas olvasók részére is.

Az általunk működtetett YXLON FF35 CT berendezéssel 300 mm átmérő vastagságig vagyunk képesek képet alkotni a vizsgálati tárgyról. Meghatározzuk a szerkezetükben található fázisok elhelyezkedését és morfológiai

jellemzőiket. Ugyanakkor a tárgyak valós méreteinek meghatározása is nagyon népszerű laboratóriumunkban. A röntgenkép felbontása a tárgy mérete szerint változik: vastagabb vizsgálati darab esetén az elérhető maximális felbontás csökken.

Cikkünkben néhány gyakorlati példán keresztül bemutattuk a CT-vel történő vizsgálati lehetőségek egy részét – a teljesség igénye nélkül – így a porozitás elemzést, pórusok, illetve habszerkezetben lévő cellák méretének és eloszlásának meghatározását, valamint a metszeti röntgenfelvételek további felhasználásának lehetőségeit képelemző szoftverekkel.

Mind ipari, mind pedig kutatási oldalról számos megkeresés érkezik hozzánk különböző jellegű vizsgálatok elvégzésére. Ez is jelzi a berendezéssel történő vizsgálatok népszerűségét, igényét. Ipari partnereink között több neves céget is említhetünk, mint a Joyson Safety Systems Hungary Kft., a HILTI (Hungária) Kft., a Magyar Suzuki Zrt., a Prec-Cast Kft., az MDA Hungary Autóipari Kft., a Robert Bosch Energy and Body Systems Kft., a ZF Hungaria Kft., illetve a SEGA – Starters E-Components Generators Automotive Hungary Kft. A saját kutatási projektjeinken kívül egyéb kutatásokban való aktív részvételünknek köszönhetően a partnereink száma a kutatócsoportok terén is jelentős.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka az Információs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-21-3. kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

A publikációban példaként bemutatott műanyag járókerék mintadarab fejlesztése és vizsgálata a Felsőoktatási és Ipari Együttműködési Központ (FIEK) GINOP-2.3.4.-15-2016-00004 jelű „Korszerű anyagok és intelligens technológiák FIEK létrehozása a Miskolci Egyetemen” projektjének keretein belül történt. A darabról készült felvétel ismertető célú felhasználásának lehetőségét ezúton is köszönjük.

Irodalom

- [1] Jiang, N. Li, Y. Li, Y. D. Yu, T. Li, Y. Xu, J. Li, N. Marrow, T.J.: 3D finite element modeling of water diffusion behavior of jute/PLA composite based on X-ray computed tomography. *Composites Science and Technology*, 199., 2020, pp. 108–313. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108313>, ScienceDirect
- [2] Lu, X.Z. Chan, L.C.: Micro-voids quantification for damage prediction in warm forging of biocompatible alloys using 3D X-ray CT and RVE approach. *Journal of Materials Processing Tech.*, 258., 2018, pp. 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.03.020>, ScienceDirect
- [3] Vásárhelyi, L. Kónya, Z. Kukovecz, Á. Vajtai, R.: Microcomputed tomography-based characterization of advanced materials: a review. *Materials Today Advances*, 8., 2020 pp. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100084>, ScienceDirect
- [4] Hastie, J.C. Kartal, M.E. Carter, L.N. Attallah, M.M. Mulvihill, D.M.: Classifying shape of internal pores within AlSi10Mg alloy manufactured by laser powder bed fusion using 3D X-ray micro computed tomography: Influence of processing parameters and heat treatment. *Materials Characterization*, 163., 2020, pp. 110–225. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110225>, ScienceDirect
- [5] Vallabhaneni, R. Stannard, T.J. Kaira, C.S. Chawla, N.: 3D X-ray microtomography and mechanical characterization of corrosion induced damage in 7075 aluminium (Al) alloys. *Corrosion Science*, 139., 2018, pp. 97–113. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.04.046>, ScienceDirect
- [6] Wang, P. Zhou, H. Zhang, L. Chen, H. Zhu, X. Lei, H. Fang, D.: In situ X-ray micro-computed tomography study of the damage evolution of prefabricated through-holes in SLM-Printed AlSi10Mg alloy under tension. *Journal of Alloys and Compounds*, 821., 2020, pp. 153–576. DOI:10.1016/j.jallcom.2019.153576, ResearchGate
- [7] Dong, Y. Shuai, S. Zheng, T. Cao, J. Chen, C. Wang, J. Ren Z.: In-situ observation of solid-liquid interface transition during directional solidification of Al-Zn alloy via X-ray imaging. *Journal of Materials Science & Technology*, 39., 2020, pp. 113–123. DOI:10.1016/j.jmst.2019.06.026, JMST
- [8] Lim, K.S. Barigou, M.: X-ray micro-computed tomography of cellular food products. *Food Research International*, Vol 37., Issue 10., 2004, pp. 1001–1012. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2004.06.010>, ScienceDirect
- [9] Chen, L. Ong, Y.S. Chen, S. O’Keeffe, S. Gillespie, S. Woulfe, P. Jiang, B. Grout, I. Lewis, E.: Advanced Characterization of an Optical Fibre Sensor System based on an MPPC Detector for Measurement of X-ray Radiation in Clinical Linacs. *Sensors and Actuators: A. Physical*, 2021, pp. 112-129. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112129>, ScienceDirect
- [10] Filep Á., Gácsi Z.: Szerkezetvizsgálat II. YXLON FF35 CT ismertető előadás. Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet. Miskolci Egyetem. 2018.
- [11] www.yxlon.com: Az YXLON FF35 CT berendezés fotója, Dátum: 2020. november 06.
- [12] Marosné Berkes M., Szilágyiné Biró A., László N., Fülöp F., Kelemen L.A.: Ipari együttműködés – Bosch - ME, ATI közös járműipari kutatások – a FIEK projekt keretében. *Multidiszciplináris tudományok*, 9. kötet, 4. szám, 2019, pp. 72-90. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.4.6>, <https://ojs.uni-miskolc.hu/index.php/multi/article/view/376>
- [13] Szabó, F.J. Várkuliné Szarka, Á.: Finite element study of rotating elements of a ventilator. *International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)*, Vol 13., 2019, pp. 1-6. <https://doi.org/10.15866/ireme.v13i6.17145>, PraiseWorthyPrize
- [14] Orbulov, I.N. Kemény, A. Filep, Á. Gácsi, Z.: Compressive characteristics of bimodal aluminium matrix syntactic foams. *Composites Part A*, 124., 2019, 105479. pp. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105479>, ScienceDirect
- [15] Bubenkó, M. Tokár, M. Fegyverneki, Gy.: Investigations to Reduce the Inclusion Content in Al-Si Foundry Alloys. *Materials Science and Engineering*, Volume 42., No. 1., 2017, pp. 13–20. HU ISSN 2063-6792
- [16] Gyarmati, G. Fegyverneki, Gy. Mende, T. Tokár, M.: Characterization of the Double Oxide Film Content of Liquid Aluminum Alloys by Computed Tomography. *Materials Characterization*, 157., 2019, 109925. pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109925>, ScienceDirect
- [17] Nabeel, M. Varga, M. Kuzsella, L. Filep, Á. Fiser, B. Viskolcz, B. Kollar, M. Vanyorek, L.: Preparation of Bamboo-Like Carbon Nanotube Loaded Piezoresistive Polyurethane-Silicone Rubber Composite. *Polymers*, Vol.13. Issue 13., 2021, pp. 2144. <https://doi.org/10.3390/polym13132144>, MDPI
- [18] Géber R., Kocserha I., Simon A., Udvardi B.: Porózus köanyagok anyagszerkezeti vizsgálata. *Az Aszfalt*, XXVII. évf. 2. 2020, pp. 51-58. ISSN 1217-7830, www.hapa.hu
- [19] Gábora A., Bubonyi T., Gyöngyösi Sz.: Zárt cellás alumíniumhabok pórusszerkezetének számítógépi képelemzéses vizsgálata. *Anyagmérnöki Tudományok*, 40/1 Miskolci Egyetemi Kiadó 2020, pp. 40–48. ISSN 2063-6784, <http://www.mak.uni-miskolc.hu/wp-content/uploads/2020/12/Közl-2020-Soki.pdf>
- [20] Bubonyi, T. Barkóczy, P. Gácsi, Z.: Comparison of CT and metallographic method for evaluation of microporosities of dye cast aluminum parts. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 903., 2020, 012038. pp. 1-7. doi:10.1088/1757-899X/903/1/012038, IOPScience
- [21] Zhang, Q. Niverty, S. Singaravelu, A.S.S. Williams, J.J. Guo, E. Jing, T. Chawla, N.: Microstructure and micropore formation in a centrifugally-cast duplex stainless steel via X-ray microtomography. *Materials Characterization*, 148., 2019, pp. 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.12.009>, ScienceDirect
- [22] Gácsi Z., Simon A., Pázmán J.: Fémkompozitok, Miskolci Egyetem kiadó, 2011, pp. 122-130.; 147-196. ISBN 978-963-661-979-4