

Két- és háromdimenziós szerkezetvizsgálati eredmények összehasonlítása

Kazup Ágota^{1*}, Bubonyi Tamás¹, Mádi Laura² és Gácsi Zoltán¹

¹*Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, Miskolci Egyetem, Miskolc, HU*

²*Öntészeti Intézet, Miskolci Egyetem, Miskolc, HU*

e-mail*: femagota@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A háromdimenziós kvantitatív vizsgálati technológiák jól kiegészíthetik a kétdimenziós csiszolatokon történő vizsgálatokat. A darabok geometriája, anyagiánosságai és fázisai az anyagminőségük és falvastagságuk függvényében vizsgálhatóak az adott vizsgálatra legmegfelelőbb típusú komputertomográfia (CT) és azok mérési paramétereivel. Kutatómunkánk a 3D-s komputertomográfias szerkezetvizsgálat alkalmazására épül, ugyanis AlSi ötvözetben található porozitást jellemeztük a térben, majd 2D-s röntgenképeken mért adatokkal hasonlítottuk össze.

Kulcsszavak: CT; képelemzés; szerkezetvizsgálat; porozitás

1. Bevezetés

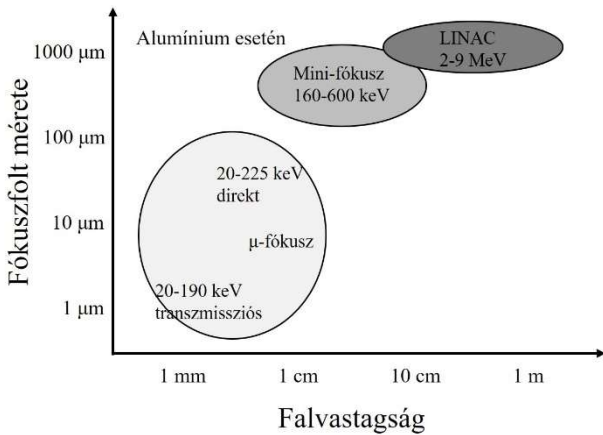
Napjainkban kiemelt szerepet kap a minél gyorsabb és pontosabb mérési és kiértékelési módszerek fejlesztése. A 2D és 3D szerkezetvizsgálati eljárások mérésének vizsgálatával az a célunk, hogy elősegítsük az ipari minőség-ellenőrzés javítását, fejlesztését, valamint lehetőséget kínáljunk a komplex szerkezetvizsgálati eljárások használatára. Különböző ötvözetek szövetszerkezetének – pl. öntvények porozitás analízise – jellemzésével feltárjuk a 2D és 3D szerkezetvizsgálat eredményei közötti kapcsolatot, meghatározzuk azok pontosságát, alkalmazásuk feltételeit.

A komputertomográfiaának köszönhetően információt kaphatunk a késztermék szövetszerkezetének, anyagiánosságainak térbeli állapotáról. Az alapvetően csiszolatból történő 2D-s minősítő vizsgálatot így nagyon jól

kiegészítheti, akár helyettesítheti is. Figyelembe kell venni a vizsgálat célját, ugyanis ahhoz mérten szükséges kiválasztani a berendezés típusát. Előfordulhat, hogy optimalizálni szükséges a mintadarabok méretét. Adott technikai paraméterekkel – mint pl. a röntgenszó típusa, vagy az alkalmazható gyorsító feszültség – rendelkező berendezéssel a nagy felbontású röntgenképhez egészen kis falvastagságú (5-10 mm) minták szükségesek annak érdekében, hogy minél pontosabban lehessen meghatározni a vizsgálandó részecskék jellemzőit. A vastagabb, illetve nagyobb rendszámú tárgyak vizsgálatakor nagyobb gyorsító feszültséget kell alkalmazni a röntgen fotonok anyagon történő megfelelő mértékű átjutása miatt. Ekkor a fókuszfolt mérete nagyobb. A gyorsító feszültség és a falvastagság kapcsolatát az 1. ábra szemlélteti [1]. A nagyobb

menyiségű foton áthaladása kontrasztosabb felvételt eredményez, ami a vizsgálat mérési pontosságát befolyásolja, javítja [2, 3].

A vizsgálati módszer alapja, hogy a különböző



1. ábra.: A gyorsító feszültség (különböző röntgenszó típusokkal szemlélítve: transzmissziós, μ -fókuszú, mini-fókuszú és LINAC „Linear Accelerator”) és a falvastagság kapcsolata alumínium esetén [1]

rendszerű, falvastagságú részei a próbadarabnak eltérő kontrasztot adnak. Így vizsgálhatók fémötvözetek [4], kerámiák [5] és polimerek [6]. A röntgenfelvételek alapján rekonstruálható a darabok 3D geometriája, melyek összehasonlíthatók CAD modellekkel, illetve véges elemes szimulációs szoftverbe illeszthetők [4, 6, 7]. A CT vizsgálati terébe helyezett kiegészítő berendezéssel a tárgyak röntgenképének felvételekor hőterheléses- vagy mechanikai anyagvizsgálat végezhető, ezáltal valós időben vizsgálható a mintadarab viselkedése [8, 9].

Általában a darabok csiszolatainak mikroszkópos felvételeinek képelemzése az elterjedt, de röntgenfelvételek metszeti felvételein ugyanúgy történhet az elemzés [10, 11]. Míg a 2D-s csiszolati felvételek esetenként nagyobb felbontásúak lehetnek, viszont statisztikailag kisebb területek – a térbeli test különböző metszetei – vizsgálhatóak. A CT-vel való térbeli vizsgálat esetén ugyan kisebb a felbontás, de a teljes anyagi térfogat elemezhető, vizsgálható.

A szerkezetet alapvetően jellemző paramétereket az (1-9) egyenletek szerint határozzuk meg. A terület- (A_A) és térfogatarány (V_V) a vizsgálni kívánt fázis területét/térfogatát

adja meg a teljes vizsgált területhez/térfogathoz képest (1-2). A minta egészére vonatkoztatott fajlagos kerületből (P_A) és fajlagos felületből (S_V) (3-4) a részecskék méretére/alakjuk bonyolultsági fokára lehet következtetni.

Minél kör/gömbszerűbbek, és minél nagyobbak a részecskék, annál kisebb a fajlagos kerületük, ugyanígy a fajlagos felületük is. A terület- (N_A) és térfogategységre (N_V) eső pórások számát az (5-6) összefüggés adja meg [12].

$$A_A = \frac{A_{\text{összes objektum}}}{A_{\text{teljes}}} 100 (\%) \quad (1)$$

$$V_V = \frac{V_{\text{összes objektum}}}{V_{\text{teljes}}} 100 (\%) \quad (2)$$

$$P_A = \frac{P}{A} (\text{mm}^{-1}) \quad (3)$$

$$S_V = \frac{S}{V} (\text{mm}^{-1}) \quad (4)$$

$$N_A = \frac{N_{\text{objektum}}}{A_{\text{teljes}}} (\text{db/mm}^2) \quad (5)$$

$$N_V = \frac{N_{\text{objektum}}}{V_{\text{teljes}}} (\text{db/mm}^3) \quad (6)$$

ahol A – terület (mm^2); V – térfogat (mm^3); P – kerület (mm); S – felület (mm^2); N – objektum darabszáma (db) [12].

A 2D-ben és 3D-ben mért jellemzők között egzakt összefüggések léteznek. A síkban mért területarány elégséges mennyiségű felvétel elemzése esetén elméletileg megegyezik a 3D-ben mért térfogataránnyal (7). A fajlagos felület a (8) összefüggés szerint arányos a fajlagos kerülettel. Gömb alakú részecskék polidiszperz rendszere esetén a (9) összefüggés áll fenn a darab szerinti sűrűség kapcsán [12].

$$V_V = A_A (\%) \quad (7)$$

$$S_V = \left(\frac{4}{\pi}\right) P_A (\text{mm}^{-1}) \quad (8)$$

$$N_V = \frac{N_A}{D_{\text{átlag}}} (\text{db/mm}^3) \quad (9)$$

ahol $D_{\text{átlag}}$ – a gömbök átlagos térbeli átmérője (mm).

Az egyedi részecskék mért 2D területe és 3D térfogata között viszont nincs közvetlenül definiálható összefüggés. A síkmetszeteken látható 3D-ben kiterjedő vizsgálandó objektumok, például pórások méretei

nagymértékben függenek a szerkezet méret- és alakbeli polidiszperzitásától. Teljesen szabályos gömb alakzatokból álló, monodiszperz szerkezet esetén a geometriai valószínűség ismeretében lehetséges a méreteloszlás meghatározása [12].

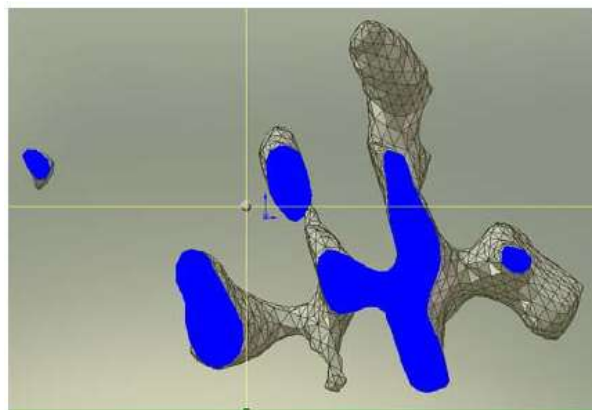
Gravitációsan öntött alumínium ötvözetben (AlSi7 és AlSi7Sr0,04) vizsgálták a kialakuló pórusok méretét, alakját (gömbszerűségét), darabszámát és annak eloszlását [13]. A szerkezet vizsgálatokor Zeiss Versa 520 típusú berendezést alkalmaztak, a voxelméret pedig $0,39 \mu\text{m}$ volt, amihez 1 mm átmérőjű próbatestre volt szükség. Megállapításaik szerint az elágazódásban gazdag, komplex morfológiájú röntgenfelvételen látható pórusok számítógéppel történő detektálása jóval nehezebb, mint a gömbszerű pórusoké.

Hastie [14] munkatársaival együtt AlSi10Mg porból különböző paraméterekkel lézeres porágy-fúziós gyártástechnológiával $D=3,5 \times 12 \text{ mm}$ hengeres próbatesteket állítottak elő. Vizsgálták a pórusok méretét, alakját és darabszámát is. A 2D csiszolati és 3D CT felvételek elemzésének adatait összehasonlították. A CT vizsgálat esetén a voxelméret $0,1 \mu\text{m}$ volt. Képelemzéshez két módszert is alkalmaztak, ahol a pixelméret $0,44$ és $0,55 \mu\text{m}$ voltak. A 2D és 3D elemzések között a maximális abszolút, pórusmennyiségre vonatkozó eltérés $0,14$ és $2,2\%$ között volt.

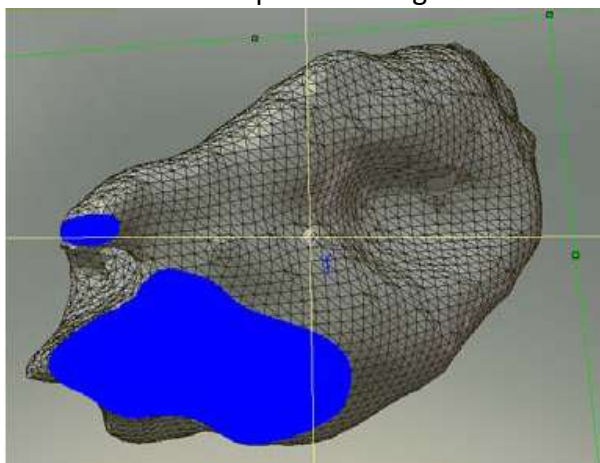
Egy másik esetben AlSi7Mg ötvözetben vizsgálták CT-vel a pórusszerkezetet [15, 16]. 4 mm átmérőjű, 1 mm magas próbákat alkalmaztak. Meghatározták a pórusok méretét, alakját és eloszlását. A zsugorodásból eredő pórusok morfológiája komplex volt. Megállapították, hogy a komplex, elágazódásokban gazdag morfológiájú pórusok méretét, alakját nehéz meghatározni. Megállapításaik szerint a metszetekről készült 2D felvételek nem adnak elég pontos információt a pórusok valódi jellegéről. A pórusok mérete, alakja nehezen detektálható csiszolatokból. Az általuk vizsgált darab töretfelületén látható pórusok 2-5x nagyobbak voltak, mint amiket a 2D-s csiszolatok eredményeiként állapítottak meg. A pórusok

valós, reprezentatív jellemzői nem voltak pontosan mérhetőek 2D-ben, sem méretben, sem pedig alak szerint. Gázpórus esetén a szomszédságában viszonylag kicsi az esély arra, hogy több, egymástól elkülönült egyedi pórus legyen 2D-ben. Ellenben az olvadékok kristályosodása során a zsugorodásból származó dendritközi porozitás esetén nagy eséllyel találhatóak az adott pórus szomszédságában további pórusok, azaz csoportosulás figyelhető meg a csiszolaton. A jelenséget a 2. ábra szemlélteti [15, 16].

A vizsgált metszet nagysága is meghatározó az adatok pontossága tekintetében. Különböző nagyságú vizsgált területek esetén (10 és 100 mm^2) a pórusok területében jelentős, körülbelül kétszeres eltéréseket tapasztaltak [15].



a) Komplex morfológiájú pórus metszeti ábrázolása – pl. mikrozsugorodás



b) Egyszerű (kompakt) morfológiájú pórus metszeti ábrázolása – pl. gázpórus

2. ábra.: A pórusok alakjának és méretének változása síkban és térben különböző morfológiák esetén [16]

Különböző méretű és rendezettségű pórusokat tartalmazó alumínium-ötvözet-alapú habokat vizsgáltak CT felvételek segítségével 3D-ben és a felvételek metszetein 2D-ben [10]. A próbatestek 30 mm átmérőjűek voltak, amelyek vizsgálatkor (YXLON FF35 μ CT) a voxelméret 20,8 μ m volt. A felvételek rekonstruálását a VGStudio MAX 3.2 szoftverrel végezték és elemezték. A metszeti CT felvételek képelemzését sajátfejlesztésű CProb szoftverrel végezték [17]. Munkájuk során a pórusok térfogatát és területét határozták meg. A térfogat és terület értékek hasonló jelleggel változtak egymáshoz képest az azonos módon készült habok esetében. Megállapították, hogy az azonos eljárással előállított próbatestek esetében, a habok CT metszeti felvételein történő jellemzés lehetséges, a térbeli adatokhoz viszonyíthatóak. A térfogat és terület eloszlásgörbékből a jellemző csúcsok alapján (homogén eloszlású habszerkezetre vonatkozóan) részletesebben lehet következtetni a szerkezet jellegére. Eszerint a metszeti adatokat alkalmasnak ítélték a habszerkezet leírására. Megjegyzendő, hogy a kisméretű pórusok a metszeti képeken nem vizsgálhatóak [10].

Egy hasonló kutatás során nagy nyomással öntött alumínium ötvözetben előforduló pórusokat vizsgáltak a különféle vizsgálati módszerek eredményeinek összehasonlítása tekintetében [11]. Arra következtettek, hogy az optikai mikroszkópos vizsgálatok abban az esetben megfelelőek, ha a porozitás előfordulásának helye ismert. A módszerrel a kisméretű pórusok is vizsgálhatóak, míg a CT 3D vagy azok metszeti felvételein a felbontás révén nem láthatóak, így nem is vizsgálhatóak [2].

Alumínium sűrűségindex próbatestek porozitás tartalmát szintén CT-vel, valamint csiszolatok mikroszkópos felvételeinek képelemzésével vizsgálták [18]. Síkban és térben is meghatározták a pórusok darabszámát, majd összevetették a két módszerrel kapott adatokat. Megállapították, hogy a pórusok száma kevesebb a térfogatban, mint a csiszolati metszeteken képelemzéssel mért darabszám. Ez

azt jelenti, hogy a metszetek vizsgálatával megállapított adatok nem feltétlenül valósak, de az eltérés abból is adódhat, hogy elágazódó pórusok találhatóak az öntvényben, amik 2D-ben több pórusnak látszódnak. Az eredmények hasonlóak a [15, 16] irodalmakban leírtakkal.

A pórusok számának eltérése a síkban és a térben információ lehet a pórusok geometriájáról [15, 16]. Nem létezik egzakt összefüggés a részecskék darabszáma között abban az esetben, ha azok a gömb alaktól eltérőek.

A 2D és 3D vizsgálati módszerek kutatására először alumínium-öntvényben előforduló, porozitás elemzését végeztük el. A 2D-s vizsgálat a próbatest röntgenfelvételének keresztmetszeti képein történt az azonos nagyítás érdekében. Meghatároztuk a pórusok térfogat- és területarányát, valamint a fajlagos felületét és kerületét a vizsgált térfogatra, illetve területre vonatkoztatva.

2. Kísérleti tevékenység

A vizsgálathoz A356 ötvözetből öntött alumínium öntvényben, a műgyantás homokmagok kötőanyagának pirolízise során felszabaduló maggáz okozta nagymértékű porozitást tartalmazó 10x10x50 mm méretű hasáb próbatestet használtunk. A mérés elvégzéséhez az YXLON FF35 típusú μ -CT röntgenberendezést alkalmaztuk, amely a Miskolci Egyetem 3D Finomszerkezet Vizsgáló Laboratóriumában található (3. ábra). A próbatest felvételei transzmissziós röntgencsővel HelicalScan, azaz spirális leképezéssel történtek z tengelyirányban, ami a próbatest leghosszabb befoglaló mérete. A voxelméret (a pixel térbeli megfelelője) 9,7 μ m volt. A mérési paramétereket az 1. táblázat tartalmazza.

2.1. A térbeli pórusok detektálása. A rekonstruáláshoz és kiértékeléshez a VGStudio MAX 3.2 verzióját használtuk. A szoftverkapacitás terhelésének könnyítésére és a számítási idő csökkentésére a kiértékelés során csak a minta egy részének térfogatát jellemeztük, azaz 9x9x15 mm nagyságú

térfogatot. A felvételen 5 lépéses eróziót (az adott képpont szűrkeségi értékének helyettesítése a szomszédok minimumával) és 5 lépéses dilatációt (az adott képpont szűrkeségi



3. ábra.: A 10x10x50 mm-es próbatest mérési pozíciója az YXLON FF35 röntgenberendezésben

értékének helyettesítése a szomszédok maximumával) alkalmaztunk a háttérzaj csökkentésére. Ezek után felületet definiáltunk a pórusokon, és különböző típusú analízisekkel detektáltuk a pórusokat. A VGStudio MAX 3.2 egy ezred mm³ pontossággal adja meg a részecske térfogatát.

Mivel a vizsgált pórusszerkezet hasonlít a habok szerkezetére, ezért a habszerkezet analízist választottuk. A detektált szerkezetet a 4. ábra mutatja. A legnagyobb méretű detektált pórus térfogata 0,079 mm³, a legkisebb 0,001 mm³ volt. Az elemzett térfogat határán lévő pórusokat nem vettük figyelembe, mivel azok nyitottak.

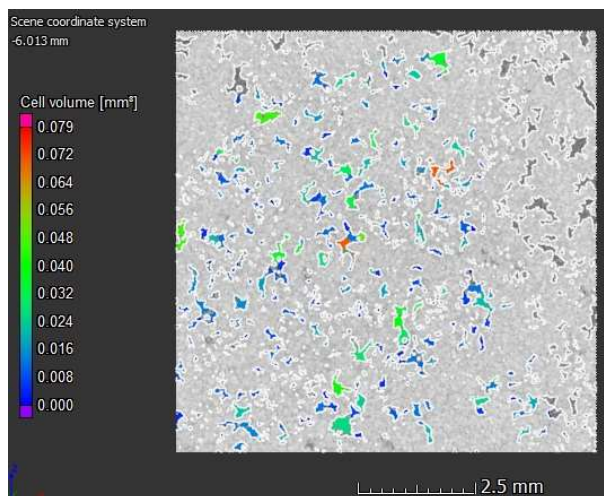
Mindezek alapján a habszerkezet analízis eredményesnek bizonyult.

2.2 A pórusok képelemzése a röntgenfelvétel 2D metszeti felvételein. A 2D röntgenfelvételek (összesen 10 db) elemzéshez a CProb programot használtuk. A pixelméret

0,0124 mm, míg a legkisebb területű pórus 0,0009 mm² volt, ami 5,8 pixel. Mivel a röntgenfelvételen már elvégeztük az eróziós/dilatációs lépéseket, így itt már erre

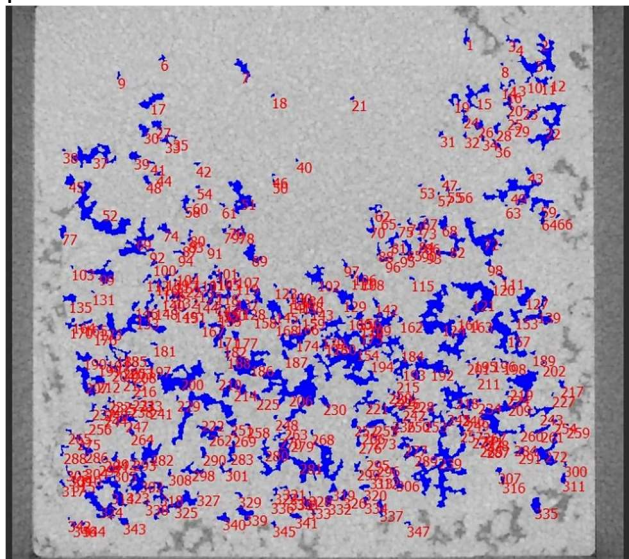
1. Táblázat A komputertomográfiai mérési paraméterek

	10x10x50 mm próbatest
Vetületek száma	1381 db
Körbeforgatás szöge	Helikális forgatás, 921°
FOD (fókusz-tárgy táv.) (mm)	80 mm
FDD (fókusz-detektor táv.) (mm)	1150 mm
Nagyítás	14,37x
Voxelméret (μm)	9,7 μm
Gyorsító feszültség (kV)	100 kV
Áramerősség (μA)	85 μA
Teljesítmény (W)	8,5 W
Szkenelés típusa	Cone beam stop and go
Röntgenső típusa, fókusz módja	FXE Transzm. cső, mikrofókusz
Antikatód anyaga	Volfrám
Szűrő típusa	0,1 mm-es Cu
Detektor „binning”	1 x 1
Detektor mód	1x1 0.5pF VG2
Detektor „framerate” (Hz)	2 Hz
Detektor felbontása (μm)	13,9x13,9
Integrációs idő (s)	0,5 s



4. ábra.: A porozitások detektálása 3D-ben a habszerkezet analízis algoritmusával a VGStudio MAX 3.2 szoftverben

nem volt szükség. Az 5. ábra a detektált pórusokat szemlélteti.



5. ábra.: A 2D röntgenfelvételek képelemzése CProb szoftverrel (a piros számok a detektált pórusok sorszámai)

3. Eredmények

A képelemzés és a habszerkezet analízis eredményeit összehasonlítottuk. A 6. ábra a próbatest vizsgált területére, illetve térfogatára vonatkozó eredményeket szemlélteti. Az *a)* ábrarész a mért területarányt (1) és térfogatarányt (2) tartalmazza, a *b)* ábrarész pedig a fajlagos kerületet (3). A 3D-ben mért fajlagos felületet (4) a (8) egyenlet szerint fajlagos kerületnek feleltettük meg.

Képelemzéssel 13,4% pórus területarányt állapítottunk meg, aminek szórása $\pm 1,7\%$ volt. A vizsgált terület egészére vonatkoztatva a pórusok átlagos fajlagos kerülete $4,6 \text{ mm}^{-1}$ -nek adódott, szórása $\pm 0,7 \text{ mm}^{-1}$ volt.

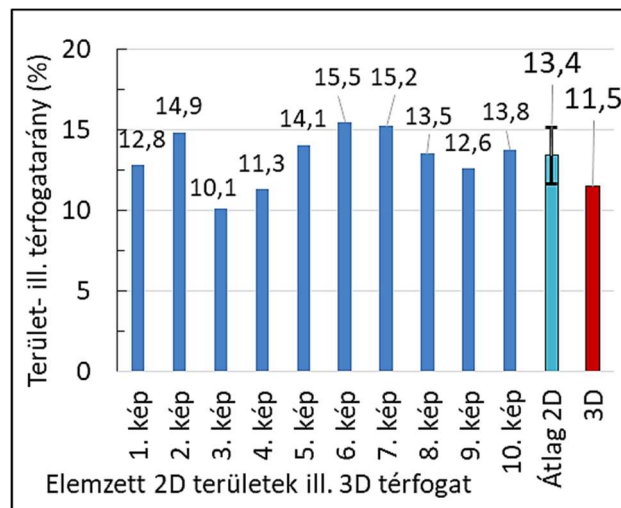
3D-ben a pórusok térfogataránya 11,5% volt. A térfogatarány a (7) egyenletnek megfelelően jó egyezést mutat a területarányval. A vizsgált térfogatban a fajlagos felület $7,9 \text{ mm}^{-1}$ volt, ami közel áll a (8) egyenlet szerint a fajlagos kerület értékéhez: $6,2 \text{ mm}^{-1}$.

Valójában a pórusok térfogataránya és fajlagos felülete (fajlagos kerülete) valószínűleg

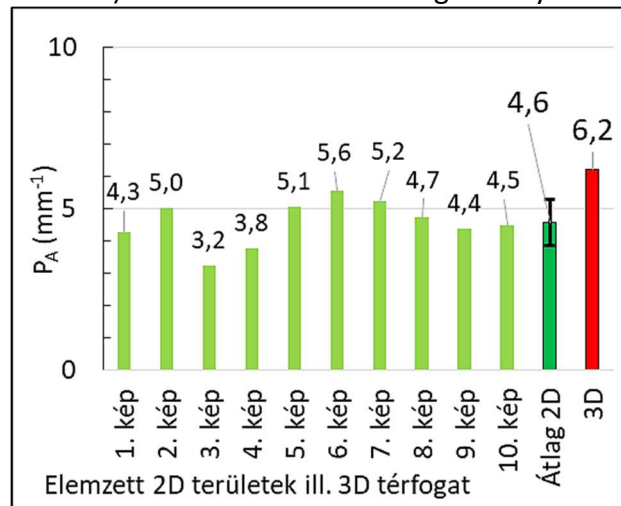
nagyobb a próbatest szélén lévő, detektálatlan pórusok miatt.

4. Összefoglalás

Kutatásunkban a 2D és 3D szerkezetvizsgálati módszereket vizsgáljuk. A 3D-ben történő elem-



a) A terület- illetve a térfogatarány



b) A fajlagos póruskerület

6. ábra.: A próbatest vizsgált területére, illetve térfogatára vonatkozó eredmények

zések rendkívül fontosak, ugyanis a 2D-s módszerek nem kínálnak minden esetben kielégítő eredményeket.

Munkánk során egy komplex morfológiájú struktúrát vizsgáltunk: öntött alumínium öntvényben a formázóanyag kötőanyagából hő hatására képződő gázok által okozott porozitást.

1. Meghatároztuk a pórusok térfogat- és területarányát, valamint a fajlagos felületét és fajlagos kerületét.

2. A vizsgált komplex geometriájú pórusszerkezet a VGStudio MAX 3.2 habszerkezet analízis algoritmusával detektálható. A módszer hátránya, hogy az algoritmus nem veszi figyelembe a felülettel kapcsolatban álló (nyitott) pórusokat.

3. A 3D-ben kapott eredmények megközelítették a 2D röntgenfelvételekből képelemzéssel kapott eredményeket. A vizsgálat alapján arra lehet következtetni, hogy a térfogat- és területarány, illetve a fajlagos felület és kerület meghatározására mind a két módszer alkalmas.

Köszönetnyilvánítás. A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Irodalom

- [1] Filep, Á.; Gács, Z.: Ismertterjesztő előadás az YXLON FF35 CT-ről, 2018. 11.05.
- [2] Vásárhelyi, L.; Kónya, Z.; Kukovecz, Á.; Vajtai, R.: Microcomputed tomography-based characterization of advanced materials: a review, *Materials Today Advances* 8 (2020) 100084
- [3] Balkay, L.; Hegyesi, Gy.; Imrek, J.; Kertész, Zs.; Lajtos, I.; Kalinka, G.; Mohácsi, I.; Molnár, J.; Valastyán, I.: Nukleáris képalkotás I., Debrecen (2010) 44-55
- [4] Rotella, A.; Nadot, Y.; Piellard, M.; Augustin, R.; Fleuriot, M.: Influence of defect morphology and position on the fatigue limit of cast Al alloy: 3D characterization by X-ray microtomography of natural and artificial defects, *Materials Science & Engineering A* 785 (2020) 139-347
- [5] Qian, R.; Zhang, Y.; Liu, C.; Yang, L.; Liu, G.; She, W.: Quantitative characterization of three-dimensional pore structure in hardened cement paste using X-ray microtomography combined

with centrifuge driven metal alloy intrusion, *Materials Characterization* 145 (2018) 277–283

[6] Jiang, N.; Li, Y.; Li, 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) 108–313

[7] Varga, T.; Budai, I.; Gábora, A.; Kozma, I.; Manó, S.; Mankovits, T.: Fémhabstruktúra elemzése CT felvételek alapján, *XXI. Fiala Műszaki Tudományos Ülésszaka*, 2016. Kolozsvár, 437–440

[8] Dahdah, N.; Limodin, N.; Barlati, A.E.; Witz, J.F.; Seghir, R.; Charkaluk, E.; Buffiere, J.Y.: Influence of the Casting Process in High Temperature Fatigue of A319 Aluminium Alloy Investigated By In-Situ X-Ray Tomography and Digital Volume Correlation, *Procedia Structural Integrity* 2 (2016) 3057–3064

[9] 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) 113–123

[10] Gábora, A.; Bubonyi, T.; Gyöngyösi, Sz.: Zárt cellás alumíniumhabok pórusszerkezetének számítógépi képelemzéses vizsgálata, *Anyagmérnöki Tudományok*, 40/1 Miskolci Egyetemi Kiadó (2020) 40–48.

[11] Bubonyi, T.; Barkóczy, P.; Gács, 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

[12] Gács, Z.: Fémkompozitok c. tantárgy előadásanyaga, 2019. 10. 28.

[13] De Giovanni, M.; Warnett, J.M.; Williams, M.A.; Srirangam, P.: 3D imaging and quantification of porosity and intermetallic particles in strontium modified Al-Si alloys, *Journal of Alloys and Compounds* 727 (2017) 353-361

- [14] 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) 110225
- [15] Fintová, S.; Anzelotti, G.; Konecna, R.; Nicoletto, G.: Casting Pore Characterization by X-Ray Computed Tomography and Metallography, *The Archive of Mechanical Engineering* Vol 57 (2010) 3 263–273
- [16] Nicoletto, G.; Anzelotti, G.; Konecna, R.: X-ray Computed Tomography vs. Metallography for Pore Sizing and Fatigue of Cast Al-alloys, *Procedia Engineering* 2 (2010) 547–554
- [17] Póliska, Cs.; Gács, Z.; Barkóczy, P.: The Effect of Melt Flow on the Dendrite Morphology, *Materials Science Forum* 508 (2006) 169-174
- [18] Gyarmati, Gy.; 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