



MISKOLCI EGYETEM
Kerpely Antal Anyagtudományok és
Technológiák Doktori Iskola
A Doktori Iskola vezetője: Prof. Dr. Mertinger Valéria



**BIMODÁLIS KOMPOZIT FÉM HAB ZÖMÍTÉS HATÁSÁRA
KIALAKULÓ SZERKEZETÉNEK JELLEMZÉSE GÉPI
TANULÁS SEGÍTSÉGÉVEL**

Számítógépi tomográfia anyagtudományi alkalmazása

Tézisfüzet

Készítette:

Bubonyi Tamás
okleveles kohómérnök

Tudományos vezetők:

Dr. Gácsi Zoltán
Dr. Barkóczy Péter

Miskolc
2024

1. BEVEZETÉS

A kompozit fémhabok (CMF-ek) vizsgálata számítógépes tomográfia (CT) segítségével új lehetőségeket nyit meg a kutatók előtt [1]. A röntgensugarak segítségével az anyag belső szerkezetéből kaphatunk információkat, anélkül, hogy bármiféle fizikai roncsolás torzítaná a kialakított habszerkezetet. A vizsgáló technika nagy előnye, hogy nagy felbontású vetületi képek sorozatát készíti el a mintáról, amelyből később számítógépi rekonstrukció segítségével lehet a teljes digitális háromdimenziós szerkezetet előállítani. Első körben a teljes belső szerkezet feltérképezhető a vizsgálat segítségével, így információnk lesz a habot alkotó belső szerkezetről, a pórusok méretéről, alakjáról, illetve a helyéről [2].

Modern képelemző eljárások segítségével további hasznos információkat lehet meghatározni a szerkezetről, amelyben már akár számszerű (kvantitatív) adatokat ismerhetünk meg az erősítő fázis térbeli eloszlásáról, miszerint található-e bármilyen szabályozott rendeződés vagy csoportosulás a szerkezetben. Az így kapott szerkezeti jellemzők kulcsfontosságú információkat hordoznak a további vizsgálati lehetőségek szempontjából, hiszen a csoportosult pórusok mechanikai viselkedése eltérő lehet a szerkezet többi részéhez képest. A CT vizsgálat eredményei gyakran „csak” bemenő paraméterként szolgálnak valamilyen mechanikai viselkedést szimuláló szoftver számára [3]. A kereskedelmi forgalomban elérhető képfeldolgozó, képelemző eljárások azonban sokszor limitált funkcionalitással rendelkeznek, így a minősítésekhez szükséges képi információk kinyerése és feldolgozása új kihívásokat állít fel [4].

A kutatásom célja egy olyan eljárás kidolgozása, amely kihasználja a CT vizsgálatokban rejlő számtalan lehetőséget (térbeli elrendeződés, szerkezet kvantitatív jellemzése). A zömítés hatására bekövetkező tönkremenetel korai szakaszában keresem a kapcsolatot az alakváltozás és a töltőanyag (bimodális méreteloszlású kerámia gömbhéj) térbeli rendeződése között.

2. TUDOMÁNYOS NYITOTT KÉRDÉSEK

A szakirodalmi áttekintésem alapján megállapítottam, hogy kompozit fémhaboknál sok esetben nem történik meg a szerkezet alapos, feltáró vizsgálata, a szerzők csupán a darab palástját vizsgálva mutatnak rá a szerkezet változásaira. Ahol használnak számítógépi tomográfiát, ott a szerkezet digitális másának az elkészítése a cél, amely utána sokszor csak bemeneti paraméter lesz egy végeelem szimulációnál, azonban a képi anyagok mélyreható elemzése nincs jelen a szakirodalomban.

A fent kifejtett megállapítások és a szakirodalom feldolgozása alapján az alábbi tudományos nyitott kérdéseket fogalmaztam meg:

1. Milyen képelemző eljárás segítségével valósítható meg a bimodális kompozit fémhabok zömített szerkezetének leírása?
2. Hogyan jellemezhető kvantitatív módon a bimodális kompozit fémhabok szerkezetét felépítő objektumok a gyártást, valamint az alakítást követően?
3. Milyen szerkezeti változások történnek bimodális kompozit fémhabokban az alakítás hatására?
4. Mi a kapcsolat a bimodális kompozit fémhab tönkremenetele és a pórus szerkezete között?
5. Milyen módszerrel lehet minősíteni a bimodális kompozit fémhab pórus szerkezetében előforduló rendezettséget?

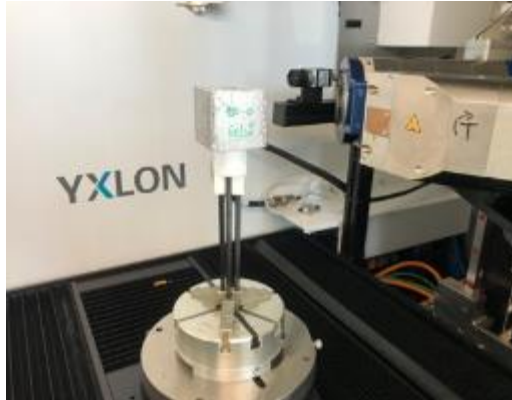
3. ALKALMAZOTT KÍSÉRLETI ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

PhD kutatómunkám során bimodális kompozit fémhabokkal dolgoztam, amelyeket az a MTA–BME Lendület Kompozit Fémhabok Kutatócsoport (vezető: Orbulov Imre Norbert, jelenleg: MTA–BME Lendület Nagyteljesítményű Kompozit Fémhabok Kutatócsoport) készíttette a számomra, közös tervezés után. A töltőanyag alumínium-oxid (Al_2O_3) üreges gömbhéj 4:1, 2:1, 1:1 és 1:2 keverési arányban. A nagy gömbhéjak névleges átmérője 7 mm, a kicsiké 2,4 mm. A mátrix anyagául öntészeti AlSi12 ötvözet szolgált, amit 0,8% stronciummal módosítottak. A próbatestek infiltrációs öntési eljárással készültek, és abból munkálták ki az 56x56x50 mm-es darabokat.

3.1. Vizsgálati módszerek

Számítógépes tomográfia, és zömítés

A mintákat számítógépes tomográfiával vizsgáltam meg, amelyhez egy YXLON FF35 μ CT berendezést használtam. A kezdeti állapot rögzítése után a próbatesteket az intézetünk műhelycsarnokában található hidraulikus prés segítségével zömítettem, összesen három lépésben. A megszakításokat egy korábbi kutatás alapján becsültem. A próbatestekről az egyes megszakítások, valamint a végső zömítés után is CT felvételeket készítettem.



	Kezd	1	2	3
4:1	0%	2,5%	5,4%	7,9%
2:1	0%	2,4%	4,9%	6,0%
1:1	0%	2,0%	4,1%	5,8%
1:2	0%	2,4%	4,7%	6,0%

1. ábra A vizsgált minta (balra), illetve a zömítés során elért maradó alakváltozások százalékos formában (jobbra)

Képfeldolgozás és gépi tanulás

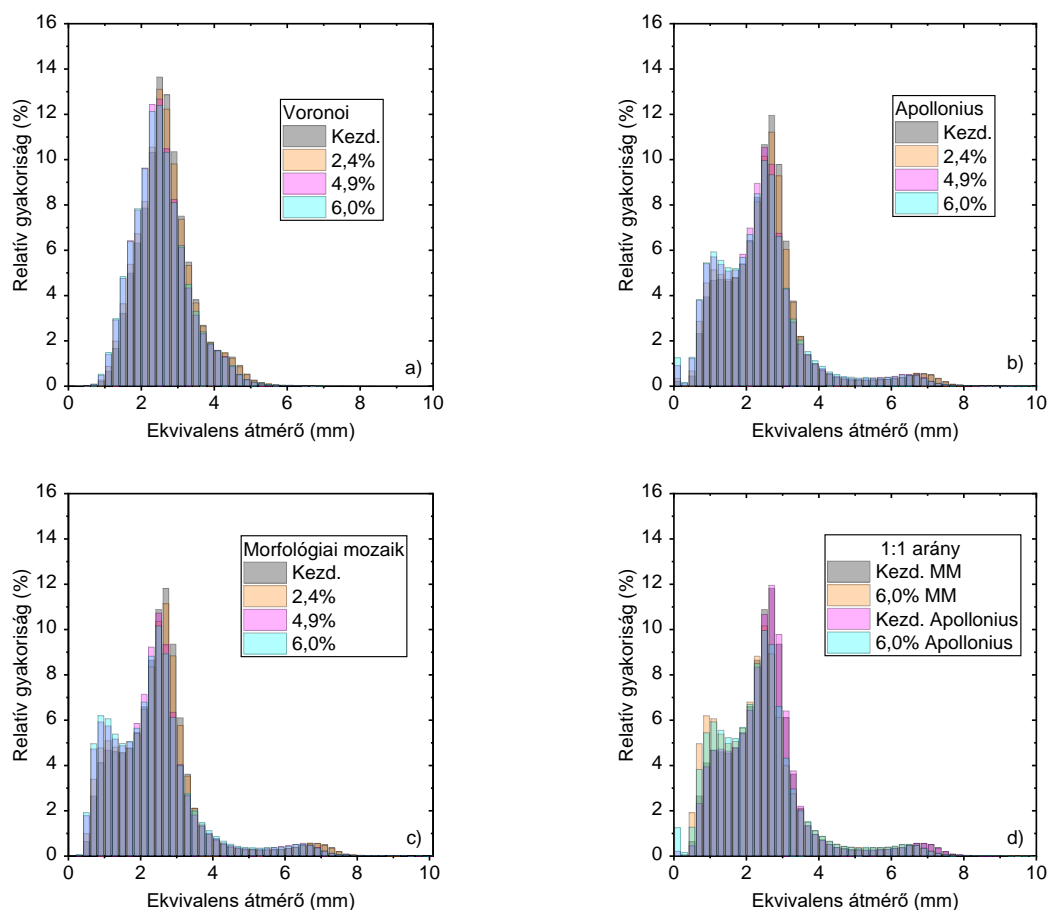
Az elkészült, és rekonstruált felvételből metszetsorozatokat készítettem a VGStudio 3.3 Max szoftver segítségével, majd az egyes metszeti képekből előállítottam az elemzésekhez szükséges bináris képeket az Otsu-módszert [5] használva Python 3.7 környezetben. Ezután körbe vágtam a habot a legnagyobb beírható téglalap segítségével, hogy a környező háttér zavaró hatását kizárjam. A kivágás után következett a teljes szerkezet képelemzése. A kiválasztott objektum jellemzők a körszerűség, az átmérő, a nyújtottság, kitöltöttségi tényező (legkisebb köré írható téglalap kitöltöttsége) és az objektumhoz tartozó morfológiai mozaikelem területe. Az eredményeket adatbázisba rendeztem, majd kiválasztottam kb. 1650 objektumot a 4:1 keverési arány mind a négy állapotából, és az objektumokat a vizuális megjelenésük alapján osztályokba soroltam. A gépi tanuláshoz az Orange 3.36 szoftvert használtam, amely könnyen kapcsolható a már használt Python környezethez. A felügyelt tanítás miatt a döntőfák irányába indultam el, és az előzményen alapuló véletlenszerű erdő (Gradient Boosted Random Forest) módszert választottam ki.

4. EREDMÉNYEK: A szerkezet kvantitatív leírása, osztályozás, a különböző keverési arányok tönkremenetelének minősítése

4.1. A szerkezet kvantitatív leírása

A szerkezet leírásához különböző mozaikszerkezet készítő eljárásokat (Voronoi, Apolloniusz ábra, Morfológiai mozaik) használtam. A mozaikszerkezetet visszaillesztettem az eredeti bináris képekre, így már jól látható vizuálisan is, hogy mennyire teljesít megfelelően egy-egy kiválasztott módszer. Az egyes mozaikelemek területéből ezek után visszaszámoltam az

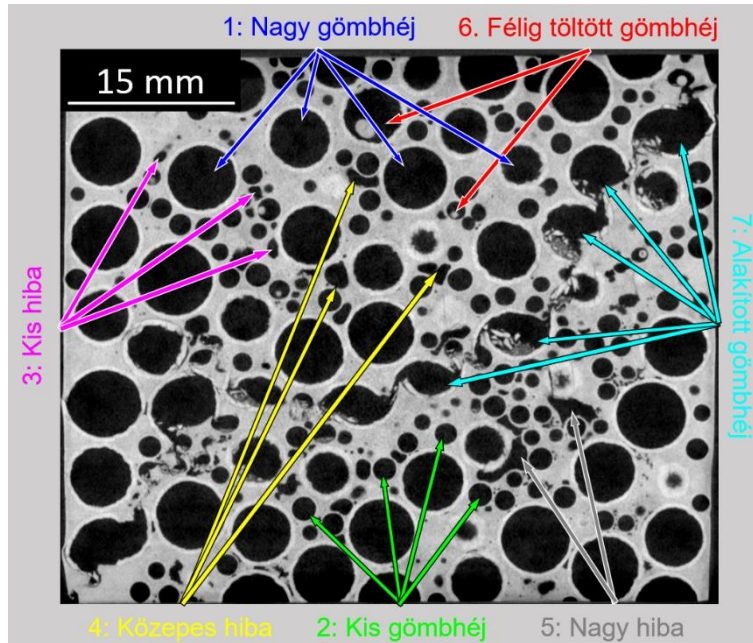
ekvivalens körátmérőt, amelyből előfordulási gyakoriság függvényt készítettem (2. ábra). A Voronoi mozaik képi ábrázolásban nem adja vissza a szerkezet bimodális jellegét, így ezt a későbbiekben elvettem, mint alkalmazható technikát. Az Apollonius ábra már jobb eredményt nyújt, azonban mivel az ekvivalens körökön alapul a súlyozása, így a szerkezetben található hosszúkás objektumokat hiányosan adja vissza. Összehasonlítva azonban a morfológiai mozaikkal, alig található eltérés a relatív gyakoriságok esetén. Mivel azonban elsősorban megbízható, objektív minősítő módszert szeretnék kidolgozni, így a továbbiakban a morfológiai mozaikot vettem alaposabb vizsgálat alá. A hisztogramok jól mutatják a szerkezet bimodális jellegét is, valamint jól visszaadják az alakítások közötti különbséget. A szerkezet ismeretében néhány változást könnyen meg is lehet magyarázni. A legnagyobb átmérőhöz tartozó csúcs ~ 7 mm-es ekvivalens átmérőnél található. Ez a nagy gömbhéjak névleges átmérője, így logikus, hogy az alakváltozás során ahogy azok alakváltoznak a relatív gyakoriságuk csökkenni fog, valamint az ekvivalens átmérők értéke csökken (a mozaikelem területe összemeget). Hasonló jelenséget figyeltem meg a következő csúcsonál, ami $\sim 2,4$ mm-es ekvivalens átmérőnél látható. Ez a kis gömbhéjak névleges átmérője, így szintén azt feltételezem, hogy a kisebb gömbhéjak is először közelednek egymáshoz, majd összetöredeznek. Érdekes azonban, hogy 1 mm-es ekvivalens átmérőnél is látható egy kiugró szélső érték, amit már nem lehet triviális szerkezeti jellemzőkhöz kötni. Első hipotézisként feltételeztem, hogy az alakítás hatására létrejövő törmelék, repedés jelenik meg ilyen módon.



2. ábra Relatív gyakoriság – Ekvivalens átmérő hisztogramok 1:1 keverési arány esetén. a) Voronoi mozaik, b) Apollonius ábra, c) Morfológiai mozaik, d) Morfológiai mozaik vs Apollonius ábra. Jól látszik, hogy bár a kezdeti állapotban szinte együtt fut a két hisztogram, a harmadik alakításnál már nagy eltérés figyelhető meg a két módszer között

Bizonyításként feltételeztem, hogy a szerkezetben található egyes objektumok előfordulási gyakorisága Gauss eloszlást követ, így a kapott ekvivalens átmérő – relatív gyakoriság függvényt fel tudom bontani különböző komponensekre, amit már az ekvivalens átmérőket felhasználva egyes szerkezeti jellemzőkhöz kapcsolhatok. A szétválasztáshoz a Fityk 1.3.1 szoftvert használtam [6], amit Gauss függvények illesztésére hoztak létre. A morfológiai mozaikból kapott pontokat egyre több Gauss függvénnyel próbáltam közelíteni, amíg a differenciálfüggvény már nem csökkent számottevően. Ennek a segítségével megállapítottam,

hogy legalább hét különböző szerkezeti jellemző kell, hogy alkossa a sűrűségfüggvényeket.



3. ábra Különböző szerkezeti jellemzők vizuális megjelenése a 4:1 keverék esetén 5,4% maradó alakváltozást követően.

Bubonyi és m. társai „Microstructural characterization of...” című cikk [61] 3. ábrája nyomán

4.2. A szerkezetben található objektum osztályok

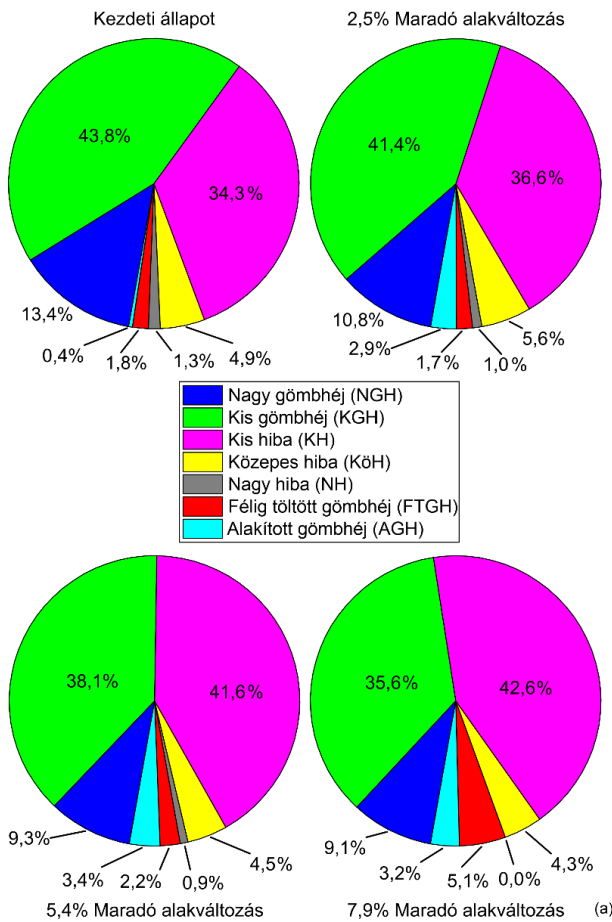
A szerkezetről készített CT-s metszeti képek alapján a szemlélő rá tud ismerni a szerkezet különbözőségeire, ahogy azt a 3. ábra mutatja. A nagy gömbhéjak látványosan eltérnek a kicsiktől a méretük miatt, miközben mindkettő közel tökéletes kör. A nyomás hatására összetört gömböknek szintén jellemző alakjuk van, ahogy a kitöltött gömbhéjaknál is jellegzetes az olvadék csepp alakja, továbbá az

üreg sarlósága. Az öntési hibák is könnyedén azonosíthatók hiszen eltérnek a szabályos köröktől. Azonban a méretük meghatározása már összetettebb feladat, hiszen ezen csoport méreteloszlása mozog a legszélesebb skálán, továbbá nincs jól definiált jellemző paraméterük. A megkülönböztethetőség miatt három különböző osztályba soroltam őket, amelyeket méret szerint választottam el egymástól. A kis hibák kategóriájába tartozik, amelyik méretében közel összevethető a kis gömbhéjak átmérőjével ($d \approx 50$ pixel skálázás nélkül). Nagy hibának tekintem, azokat a hibákat, amelyek méretükben összevethetők a nagy gömbhéjakkal ($d \approx 100$ pixel skálázás nélkül). A kettő közötti tartományt pedig a közepes hibák foglalják el. Ezen megállapítások alapján a szerkezetet hét különböző osztályba soroltam:

1. Nagy gömbhéj
2. Kis gömbhéj
3. Kis szerkezeti hiba
4. Közepes szerkezeti hiba
5. Nagy szerkezeti hiba
6. Részlegesen kitöltött gömbhéj
7. Alakított nagy gömbhéj.

4.3. Osztályozás gépi tanulással

Az egyes osztályokat gépi tanulás segítségével határoztam meg. A tanuláshoz a 4:1 keverék mind a négy állapotát (kezdeti és három alakított) felhasználtam. A tanítás alapjául szolgáló adatbázist minden 100. metszeti képről állítottam össze, törekedve arra, hogy minden

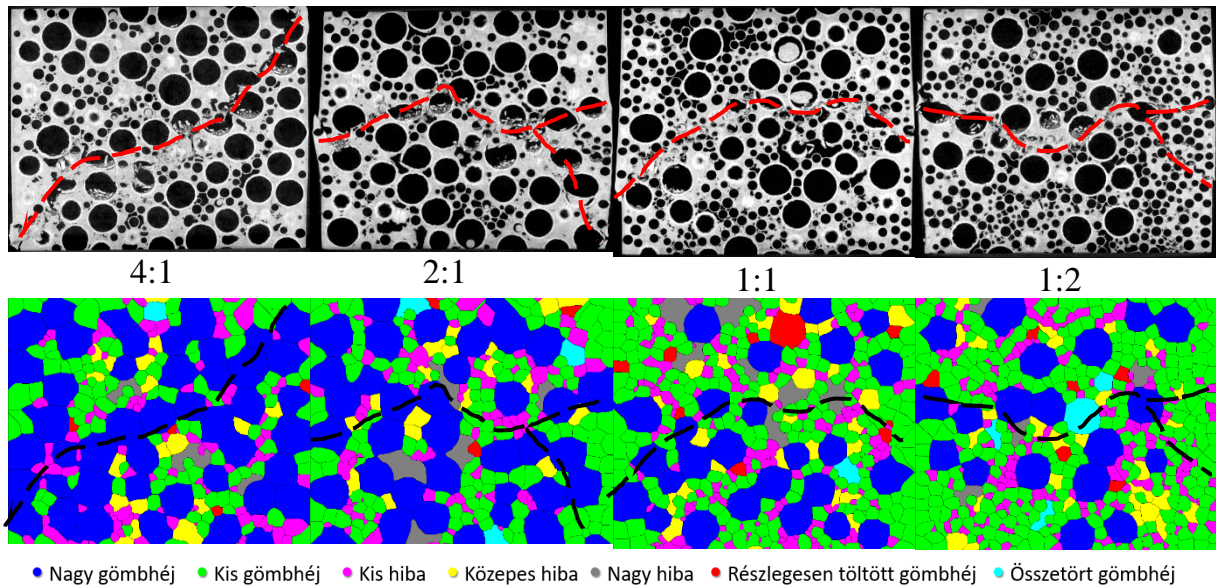


4. ábra Az osztályozás eredményei 4:1 keverék esetén. A különböző osztályok változása az előfordulási gyakoriságukból számolva. Bubonyi és m. társai Microstructural characterization of... c. cikk [62] 5. ábrája nyomán

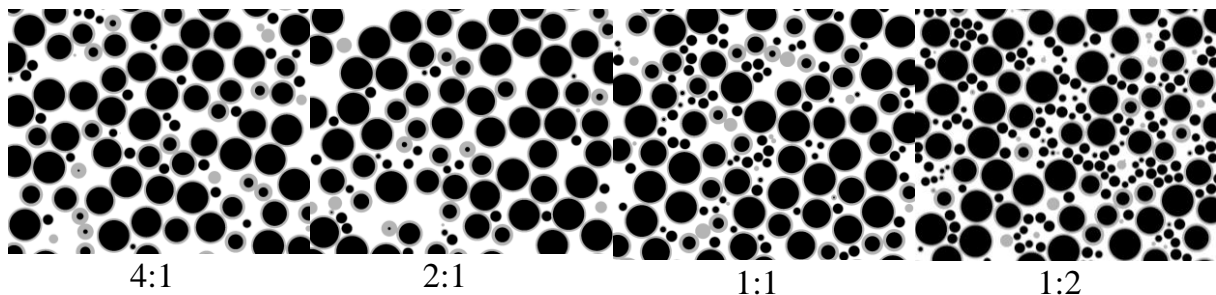
osztályból 3-4 objektumot hozzáadjak az adatbázishoz (összesen 1649 objektum alkotta a tanuló adatbázist). A gépi tanuláshoz a Gradient Boosted Random Forest (GBRF, Döntési előzményen alapuló Véletlenszerű Erdő) módszert választottam. A módszer segítségével az objektumokat már osztályba tudtam sorolni (4. ábra). Az osztályozás során az egyes osztályok változását a darabszám alapján követtem nyomon. A módszer nem tökéletes, mert a törött gömbhéjak összeérhetnek, ezáltal új objektumokat létrehozva a képelemzés szempontjából, azonban még így is jobb, mint a területarányok változásának követése, mivel az túlbecsüli a nagy gömbhéjakat, valamint alul becsüli a kis gömbhéjakat a nagy méretkülönbségek miatt.

Az osztályok változása mind a négy keverési arány esetén monoton változik (a közepes hibáktól eltekintve), egyedül a 4:1 keverék törött gömbhéjai viselkednek eltérően, ahol egy maximumos függvénnyel írható le a változás jellege. Megvizsgálva a tönkremenetelt a meszet sorozatok mediánja esetén (5. ábra) látható, hogy a keverési arányok függvényében más a tönkremenetel jellege. 4:1 keveréknél a testátló mentén halad végig, a nagy gömbhéjakat követve. 1:1 és 1:2

keverékek esetén közel vízszintes a törésvonal, 2:1 keverék esetén pedig vízszintes irányban is megjelent egy törés, illetve a testátló mentén is majdnem végig ért. A helyzet tisztázására diszkrét elemes szimuláció segítségével (CemFDEM) generált szerkezeteket készítettem (6. ábra). A szakirodalom alapján a nagy gömbhéjak törnek először az alakítás hatására [7], így azt a valószínűséget kezdtem el vizsgálni, hogy az egyes keverékek esetén mekkora a valószínűsége, hogy egy nagy gömbhéjnak az adott metszeti képen egy másik nagy gömbhéj található a szomszédságában.

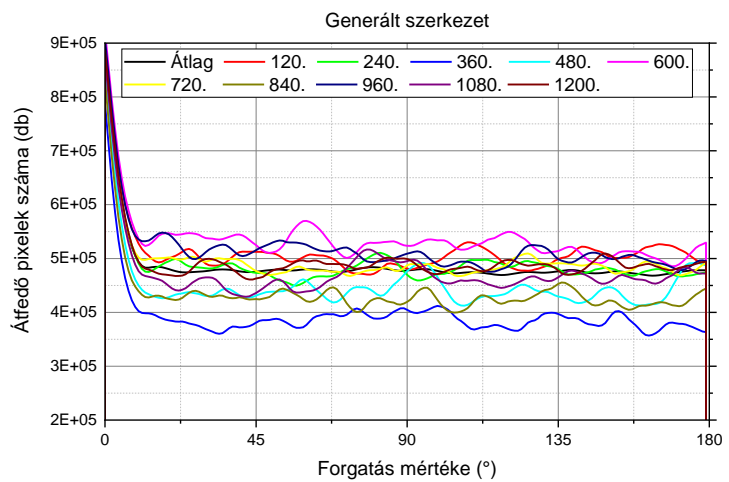
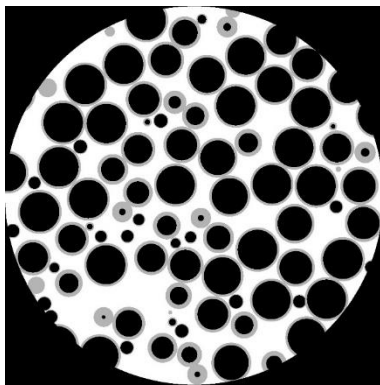
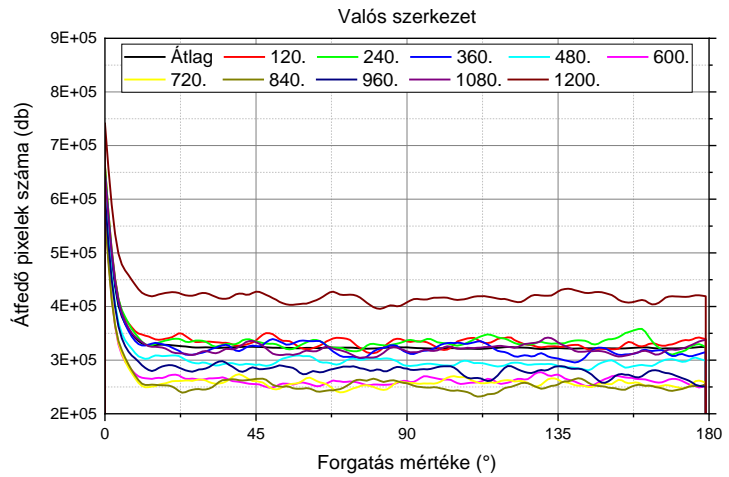
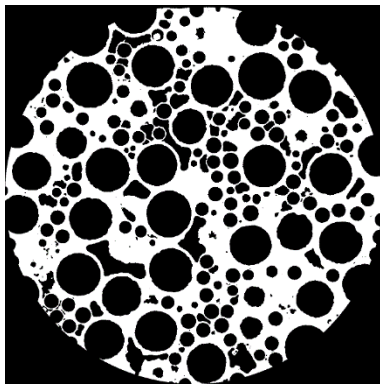


5. ábra Különböző keverékek frontális metszetsorozatának mediánjai. Piros szaggatott vonal jelöli a törés útját. A 4:1 keveréknél az irodalommal egybevágó a viselkedés, de az 1:1 és 1:2 esetén közel vízszintes a törési sík. A 2:1 keveréknél a vízszintes törési sík is megfigyelhető, de majdnem a testátló mentén is végig ment a törés. A színek az adott osztályhoz tartozó morfológiai mozaikelemeket mutatják be.

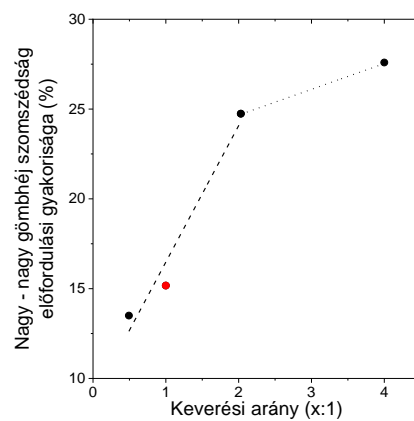
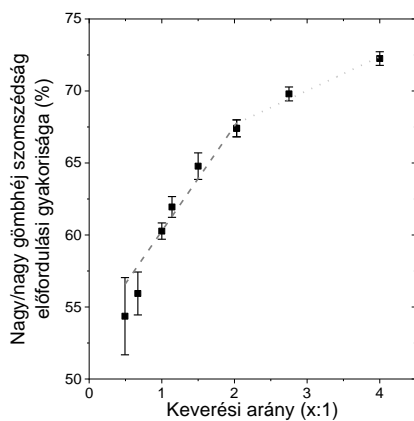


6. ábra Különböző keverékek generált, vertikális irányú metszetsorozatának mediánjai

Mivel ellentmondásba ütköztem a valós és generált szerkezetek között, így a kovariancia [8] segítségével összehasonlítottam a generált és valós szerkezeteket (7. ábra). A különböző metszetekről készült függvényeket, valamint a teljes szerkezet átlagos függvényét összehasonlítva megállapítottam, hogy a két szerkezet matematikailag hasonló, sőt a kovariancia függvények összehasonlítása során számolt eltérések négyzetösszege minden esetben legalább egy nagyságrenddel kisebb, mint a függvény értékkészletében megfigyelt lokális maximum és minimum közötti különbség. A kovariancia vizsgálat eredményeként így igazolást nyert, hogy a generált és a valós szerkezetekben is kétféle trend figyelhető meg a nagy/nagy gömbhéj szomszédság előfordulási valószínűségében (8. ábra). A váltás a törésvonalak jellegével is összefüggésben áll, mivel a 2:1 keverék esetén figyelhető meg, hogy a nagy/nagy gömbhéjszomszédság előfordulási gyakoriságában az addig domináns növekedés meredeksége csökken.



7. ábra Bináris képek a radiális kovariancia elemzéshez valós (fent), és generált (lent) szerkezet esetében.



8. ábra Nagy/nagy gömbhøj szomszedság előfordulási gyakorisága generált (balra), valamint valós (jobbra) szerkezetek esetén. A két trend közötti átmenet a 2:1 keverési aránynál található.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatómunkám során bimodális kompozit fémhabok zömítés hatására bekövetkező szerkezetváltozását vizsgáltam. A szakirodalom a zömítővizsgálatot alap vizsgálatnak tekinti ezen szerkezetek esetében, ám a feldolgozás mélysége sokszor megkérdőjelezhető. Számítógépi tomográfiával kiegészítve a szerkezet változása (megfelelő mintaméret esetén) akár in-situ is követhető, amely új távlatokat nyit meg a szerkezetből kinyerhető információk terén. Kutatómunkámban a szerkezetek viselkedésének alaposabb megértésére fókuszáltam, ezért először gépi tanulás segítségével kidolgoztam egy osztályozó algoritmust, amellyel az egyes jellemző szerkezeti alkotóelemek elkülöníthetők egymástól. Az osztályok segítségével a gyártás is jellemezhető, azonban a tönkremeneteli folyamatok is nyomon követhetők a segítségével.

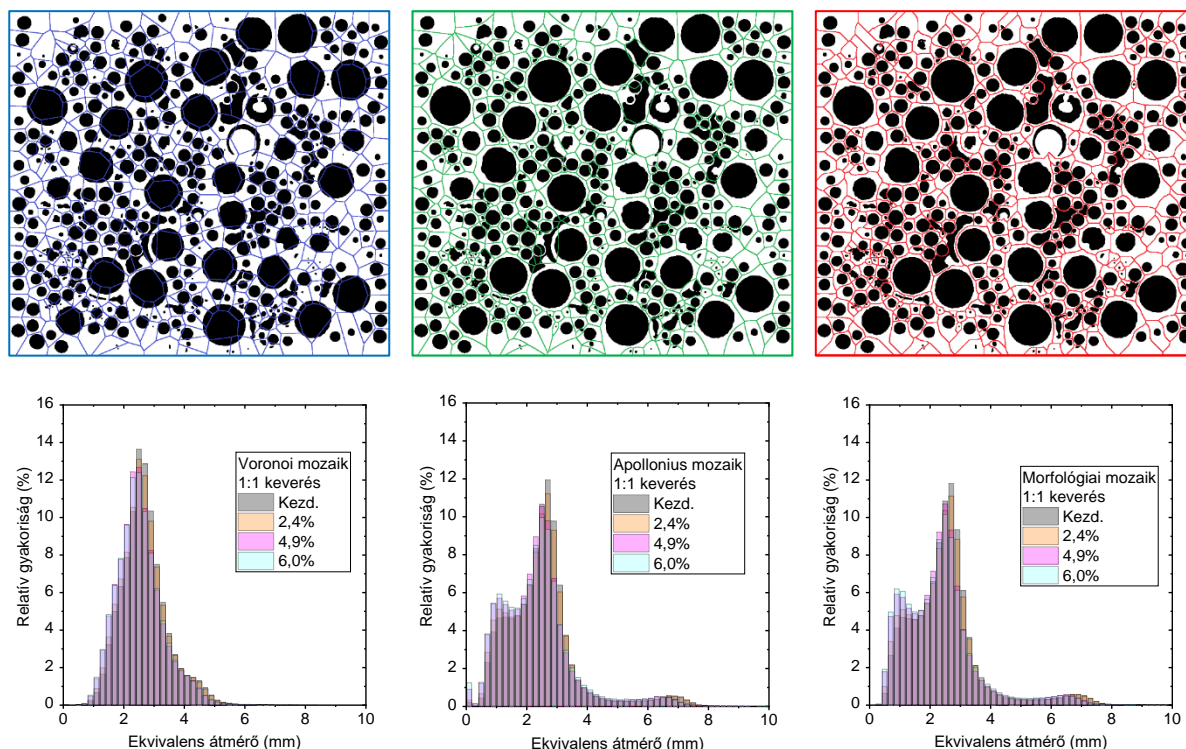
Különböző keverékek esetén is megbízhatóan működik az algoritmus, továbbá a segítségével sikerült azonosítanom, hogy a kétféle töltőanyag keverésének függvényében eltérő törési mechanizmusok fognak érvényesülni a szerkezetben. Az állításom alátámasztásához számítógéppel generált szerkezeteket hoztam létre, és megvizsgáltam, hogy hogyan hatnak az egymás szomszédságában található gömbhéjak egymásra. 4:1 keverési aránynál megállapítottam, hogy a szakirodalomnak megfelelően a 45°-os testátló irányában a nagy gömbhéjak mentén halad a törés. 1:2, valamint 1:1 minták esetén már nincs összefüggő útvonal, így ott a vízszinteshez közel halad a repedés, mindig a legközelebbi nagy gömbhéj irányába. A váltás a két tönkremeneteli mechanizmus között a 2:1 keverék környékén található, mivel a 45°-os átló mentén is elegendő nagy gömbhéj található a szerkezetben, hogy meginduljon a repedés, viszont még a darab középvonalában vízszintesen is terjed, így itt a két mechanizmus egymással versenyez.

Végezetül a 2:1 keverék esetén radiális kovariancia vizsgálatot végeztem a generált és a valós szerkezeteken is. Bebizonyítottam, hogy az átlagos szerkezet hasonló, valamint az átlagos rendezetlenség is hasonló, emiatt a szomszédsági relációk is hasonlóak lesznek, tehát a generált szerkezeteknél tett megállapítás igaz kell, hogy legyen a valós szerkezetek esetén is.

6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

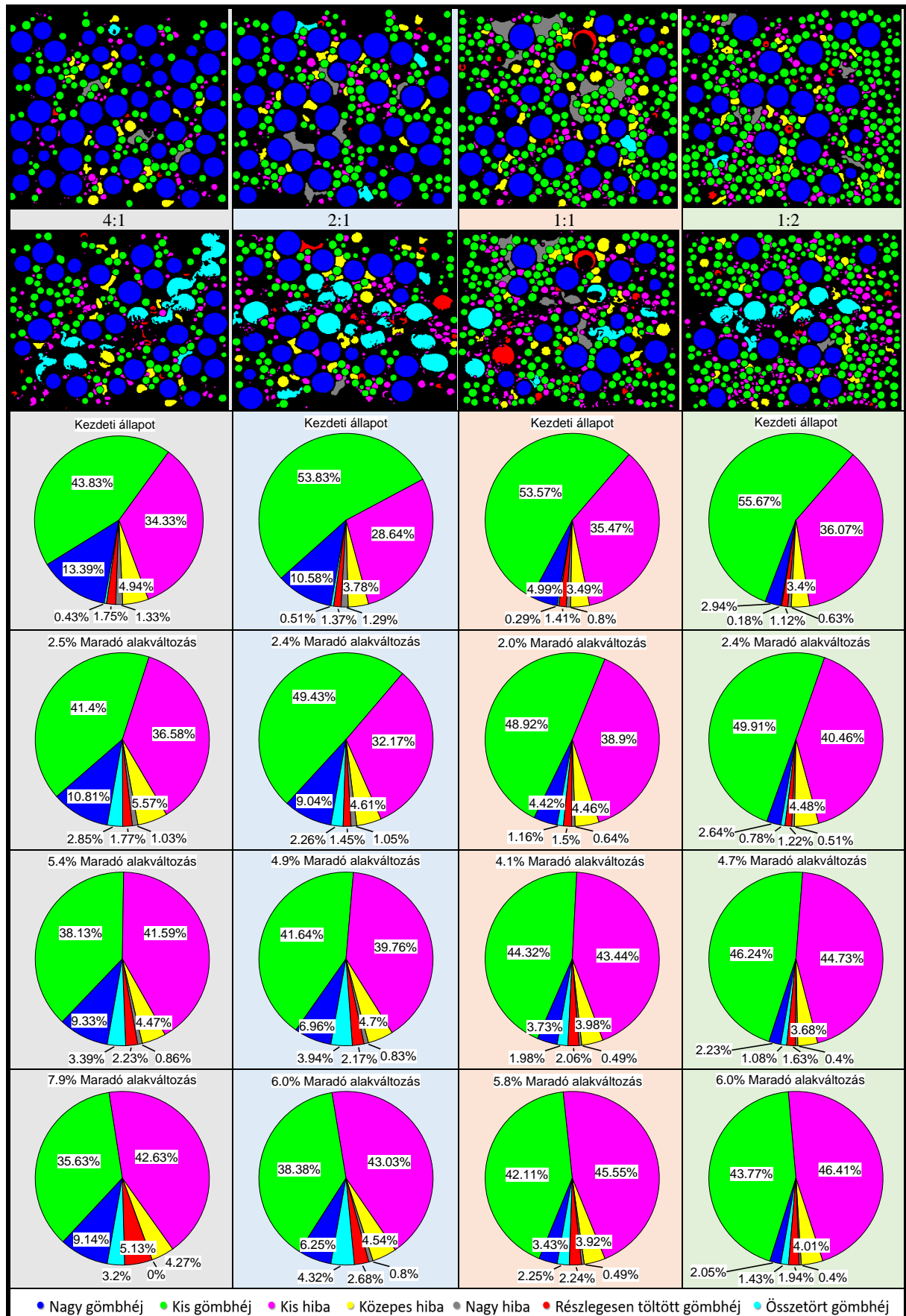
Bimodális kompozit fémhabok számítógépi tomográfias metszeti képeit felhasználva az alábbi új tudományos eredményeket fogalmaztam meg:

- 1) Bimodális kompozit fémhabok kismértékű zömítés ($\epsilon < 8\%$) hatására végbemenő szerkezetváltozásának jellemzésével – a szövetszerkezetben az alakváltozás hatására megjelenő és változó objektumok (törött gömbhéj, repedés, pórusok, gömbhéjak elmozdulása) leírásával – kapcsolatban a következőket igazoltam:
 - a. Az objektumok tömegközéppontja köré rajzolt Voronoi mozaik nem használható, mivel az egyedi objektumok morfológiájának változása csak részlegesen jelenik meg az mozaik területéből készített ekvivalens átmérő sűrűségfüggvényén.
 - b. Az Apollonius ábra, vagyis az objektumok területéből számolt ekvivalens körlapok köré rajzolt hatósugár szerinti vázszerkezet segítségével (az elnyújtott, szélsőséges objektumok kivételével) meghatározott mozaikterületből készített ekvivalens átmérő sűrűségfüggvénye alapján a szerkezet változása nyomon követhető.
 - c. Az objektumok kontúrvonalát felhasználva készített morfológiai mozaik (illetve mozaik területéből készített ekvivalens átmérő sűrűségfüggvénye) anyagtudományi szempontból hitelesen tükrözi a szerkezet változását.



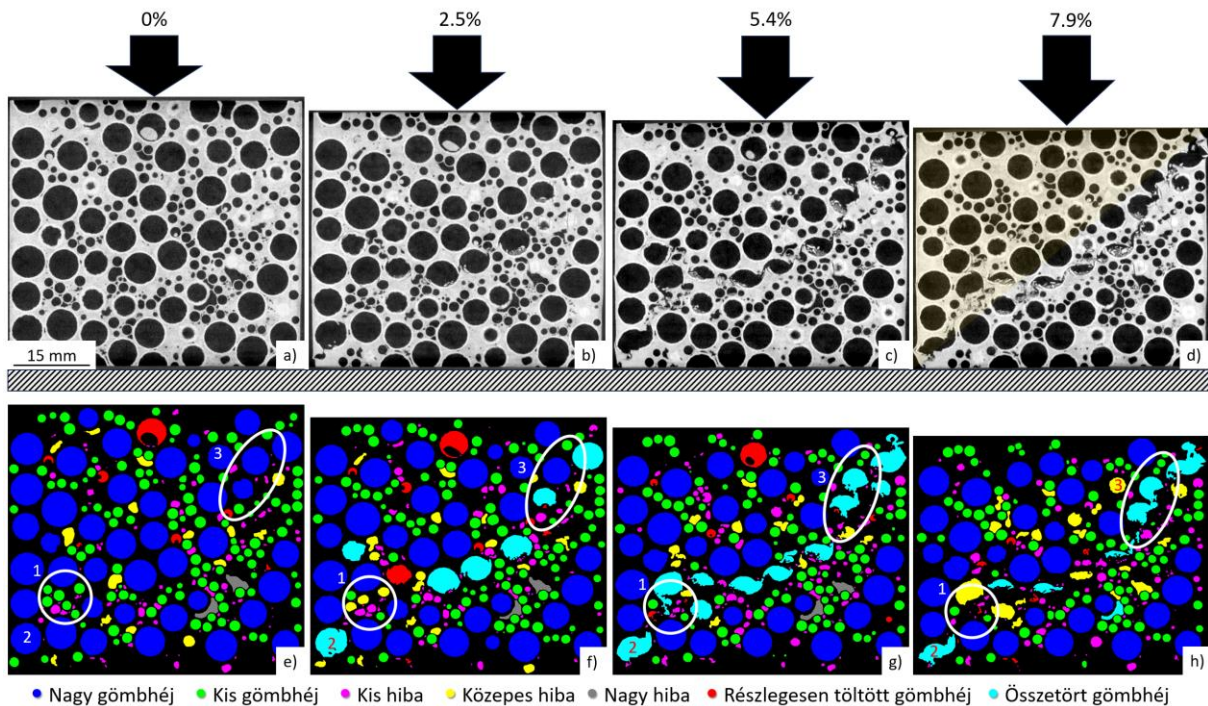
T. I. ábra Különböző mozaikkészítő technikákkal készült mozaikok illeszkedése bináris képeken (Kék – Voronoi, Zöld – Apollonius, Piros – Morfológiai), továbbá a hozzájuk tartozó ekvivalens átmérő – előfordulási gyakoriság sűrűségfüggvény.

- 2) Igazoltam, hogy a bimodális kompozit fémhabok alakváltozása közben a szerkezetet felépítő objektumok (nagy gömbhéjak, kis gömbhéjak, kis hibák, közepes hibák, nagy hibák, részlegesen töltött gömbhéjak, összetört gömbhéjak) egyedi osztályokba sorolhatók.
 - a. Az objektumok jellemzésére a következő morfológiai paramétereket célszerű használni: körszerűség (R), ekvivalens átmérő(D), nyújtottság (E), legkisebb köré írható téglalap kitöltöttsége (F), valamint az objektumok hatósugara (elhelyezkedése) miatt szükséges figyelembe venni a morfológiai mozaikot (M) is.
 - b. Felügyelt gépi tanulás segítségével (1649 objektumot felhasználva, a kezdeti és alakított állapotok minden 100. metszetén osztályonként 3-4 objektum megjelölésével) a döntési előzményen alapuló véletlenszerű erdő (Gradient Boosted Random Forest, GBRF) módszer 0,1 es tanulási ráta (learning rate) esetén 100 döntőfából álló erdőt használva (a fa maximum 3 szintű, valamint a legkisebb felbontási egység 2) az egyes osztályok elválaszthatók egymástól.



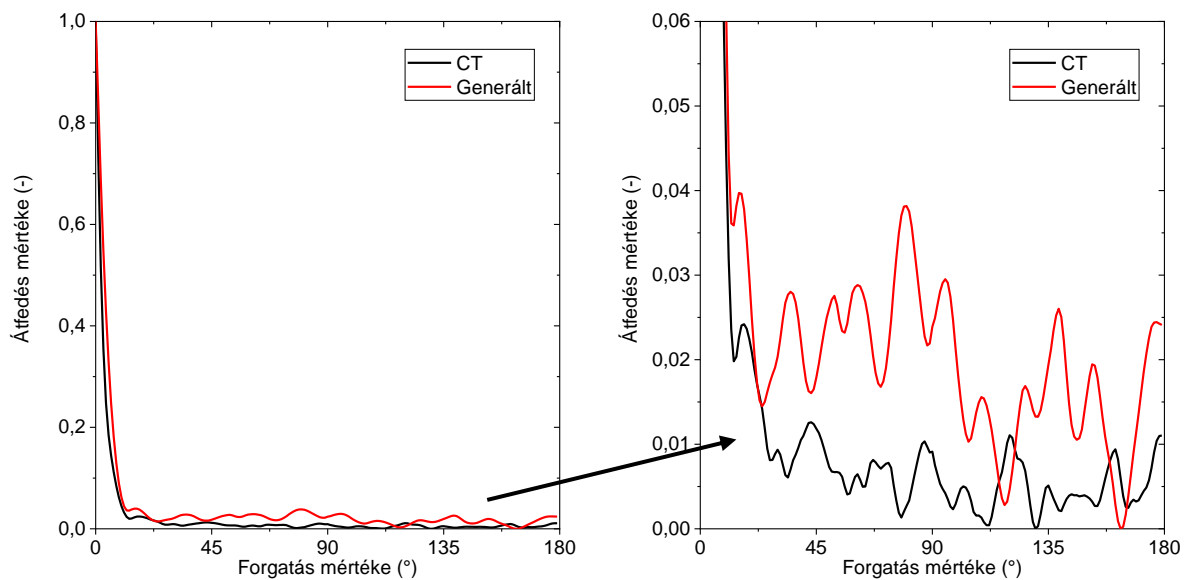
T. II. ábra. Osztályozás különböző térfogatarányban kevert bimodális kompozit fémhabok esetén. A felső képsor a metszetsorozatok mediánjait mutatja be kezdeti állapotban, míg az alsó ugyanezen metszeti képek legnagyobb alakváltozást elszenvedett párjai. A kördiagramok oszlopok szerint rendezve mutatják be az osztályok arányait a kezdeti állapotban, illetve azok változását az alakítás egyes lépéseinek hatására.

- 3) A döntési előzményen alapuló véletlenszerű erdő segítségével igazoltam, hogy a bimodális kompozit fémhab kismértékű zömítésekor ($\epsilon < 8\%$) létrejövő szövetszerkezet az egyes osztályba tartozó objektumok darabszámának változása alapján írható le: a kis gömbhéjak kis hibákká alakulnak át; a nagy hibák először közepes hibákká, a későbbiekben kis hibákká zsugorodnak; a nagy gömbhéjak pedig összetört gömbhéjakká alakulnak át. 4:1 keverési arány esetén a félig kitöltött gömbhéjak gyakorisága a $\epsilon \sim 8\%$ alakítás hatására jelentősen növekszik, mert a gömbhéjak összetörése megnöveli a kitöltöttségi tényezőt. Az osztályozás eredményéből megállapítottam, hogy a közepes hibáktól eltekintve minden osztály változása monoton, kivéve a 4:1 keverék törött gömbhéjait, ahol egy maximumos függvényt írható le az alakítás hatására bekövetkező változás.



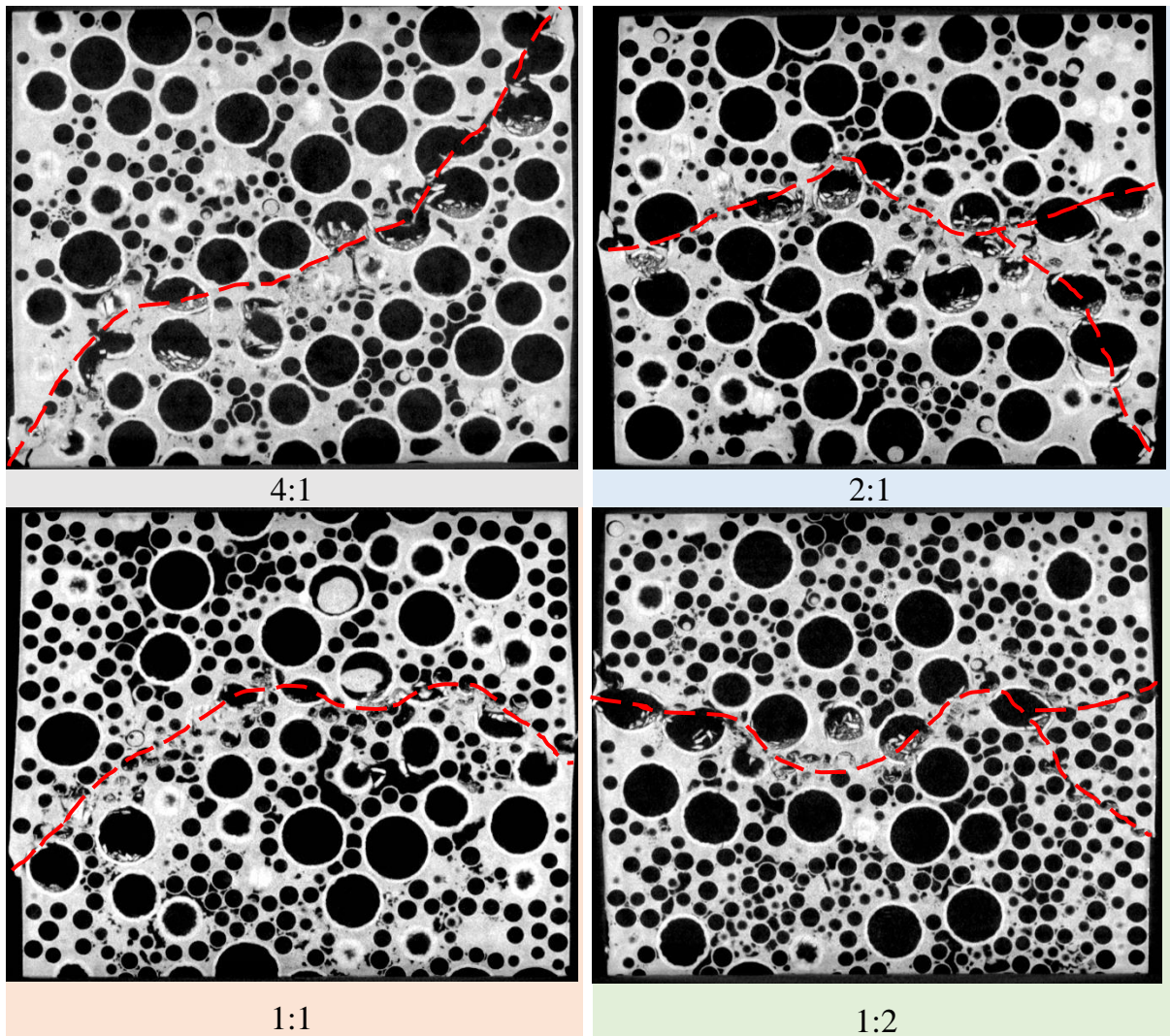
T. III. ábra Törési vonal kialakulása és fejlődése a 4:1 keverék esetén ugyanazon látótéren belül. A felső háromszög az alakítás során a frontális síkban is elmozdul (sárgával jelzett terület). a)-d): ugyanazon régió metszeti képei. e)-h):Feldolgozott, és osztályozott objektumok a régióban. 1. terület:kis gömbhéjak alakváltozása kis hibákká. 2. terület: Különálló nagy gömbhéj alakváltozása. 3. terület:két nagy gömbhéj alakváltozásának fázisai. Egyedi törés, összeérés, átalakulás egy objektummá. Bubonyi és m. társai „Microstructural characterization of...” című cikk [61] 4. ábrája nyomán

- 4) A radiális kovariancia alkalmas a valós és generált szerkezetek (CemfDEM, 15 000 gömböt ejtve egy 0,15 m átmérőjű, 0,3 m magas tégelybe előre definiált kétféle méreteloszlással) összehasonlítására.
- a generált és valós szerkezetek radiális kovariancia függvénye matematikailag hasonló.
 - a radiális kovariancia függvényeknek a generált és a valós szerkezetek esetén számolt eltérései négyzetösszege alapján megállapítottam, hogy mindkét szerkezet rendezetlensége, ebből következőleg a szomszédsági viszonyaik is hasonlóak.

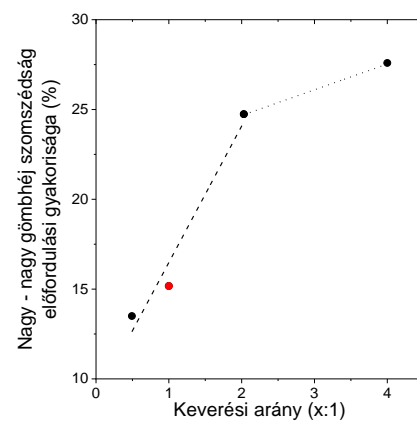
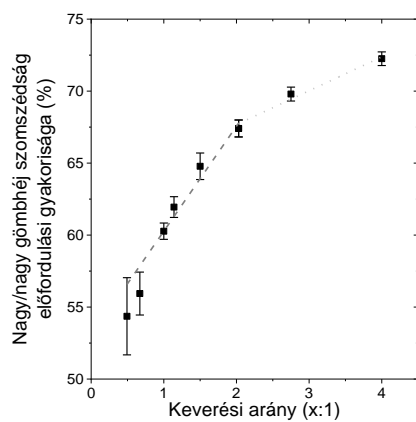


T. IV. ábra 2:1 arányban kevert valós és generált szerkezet átlagos radiális kovariancia függvénye.

- 5) A zömítés irányát tartalmazó két fősíkban (ZX és ZY) készített számítógépi tomográfias metszeti felvételeket elemezve az objektumok szomszédsági relációit vizsgálva a törési folyamat leírható. A módszer segítségével a különböző arányban kevert bimodális kompozit fémhabok tönkremenetelével kapcsolatban az alábbiakat igazoltam:
- a. Az irodalomban leírt, és általánosan elfogadott alakítás elmélettel ellentétben (miszerint a darabban 45° -os nyomógúlák alakulnak ki, továbbá a tönkremenetel rendszerint ebben a 45° -os sávban valósul meg) a deformációs sáv nem kizárólag a testátló mentén jön létre. A morfológiai mozaikot felhasználva igazoltam, hogy a repedés a nagy gömbhéjak térbeli elhelyezkedését követi.
 - b. A 4:1 keverék esetén a testátló mentén halad a repedés. A 1:2, 1:1 keverékek esetén nincs összefüggő gömbhéjszomszédság a 45° -os átlóban, így ott nincs kitüntetett irány a repedés terjedésénél sem.
 - c. A diszkrét elemes szimuláció segítségével (CemfDEM, 15 000 gömböt ejtve egy 0,15 m átmérőjű, 0,3 m magas tégelybe előre definiált kétféle méreteloszlással) generált szerkezetek felhasználásával igazoltam, hogy a keverési arány növelésével meredeken, lineárisan növekszik a valószínűsége a nagy/nagy gömbhéj szomszédság kialakulásának. A váltás a 2:1 keverék környékén figyelhető meg, onnantól hiába növekszik drasztikusan a nagy gömbhéjak térfogataránya, a nagy/nagy szomszédság előfordulási valószínűsége már csak kis mértékben növekszik.



T. V Különböző keverékek frontális metszetsorozatának mediánjai. Piros szaggatott vonal jelöli a törés útját. A 4:1 keveréknél az irodalommal egybevágó a viselkedés, de az 1:1 és 1:2 esetén nincs kitüntetett irány. A 2:1 keveréknél a vízszintes törési sík is megfigyelhető, de a 45°-os átlóban is majdnem vágig ér a deformáció.



T. VI. ábra Nagy/nagy gömbhéj szomszédosság előfordulási gyakorisága generált (balra), valamint valós (jobbra) szerkezetek esetén. A két trend közötti átmenet a 2:1 keverési aránynál található.

7. Tudományos eredmények hasznosulása

A disszertációban ismertetett eljárások elősegíthetik a (bimodális) kompozit fémhabok gyártástechnológiájának alaposabb megértését, finomítását. A bemutatott osztályozó algoritmus segítségével objektíven minősíthető a szerkezet, akár a gyártást követően azonnal, a mintadarab roncsolása nélkül.

A tönkremeneteli folyamatok ismeretében, azok előrejelzésével egyedi igényekhez igazíthatók az elkészült szerkezetek, amelyek tovább segítik a nagyteljesítményű kompozit fémhabok elterjedését.

Az osztályozás során létrehozott algoritmus könnyedén bővíthető további alakjellemzőkkel, megfelelő tanítás után pedig bármilyen kompozit szerkezet második fázisának osztályozására alkalmassá tehető.

8. Summary

In this research, I investigated the structural change of bimodal composite metal foams due to compaction. The literature considers compaction testing as the primary test for these structures, but the processing depth often needs improvement. Complemented by computer tomography, structural changes (if the sample size is suitable) can even be followed in situ, which opens up new horizons in the extractable information from the structure. In my research work, I focused on a more thorough understanding of the behavior of structures, so I first developed a classification algorithm with the help of machine learning, which can be used to separate the individual characteristic structural components from each other. With the help of classes, production can also be characterized. Moreover, leading deformation processes can also be monitored with its help.

The algorithm works reliably even with different mixtures. With its help, I could identify that different fracture mechanisms will prevail in the structure depending on the mixing of the two types of fillers. I created computer-generated structures to support my statement and examined how the adjacent spherical shells would interact. At a mixing ratio of 4:1, I found that, following the literature, the fracture proceeds along the large spherical shells in the direction of the 45° diagonal plane. In the case of 1:2 and 1:1 samples, there is no longer a continuous path, so the crack moves close to the horizontal line, always in the direction of the nearest large spherical shell. The switch between the two fracture mechanisms is found around the 2:1 mixture since there is enough large spherical shell in the structure even along the 45° diagonal to initiate the crack, but it also propagates horizontally close to the center line, so here the two mechanisms compete with each other.

Finally, in the case of the 2:1 mixture, I performed a radial covariance analysis on both the generated and the real structures. I proved that the average structure is similar, as well as the average disorder is similar. Because of this, the neighborhood relations will also be similar, so the statement made for generated structures must be true for real structures as well.

9. A témához kapcsolódó publikációk

Tudományos folyóirat cikkek:

- [2] Kemény, A., Leveles, B., Bubonyi, T., és Orbulov, I.N. (2021) Effect of particle size and volume ratio of ceramic hollow spheres on the mechanical properties of bimodal composite metal foams. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, **140**, 106152.
- [9] Leveles, B., Kemény, A., Bubonyi, T., és Orbulov, I.N. (2021) Manufacturing and Comparison of Sr Modified or Unmodified AlSi12 Eutectic Alloy Matrix Unimodal and Bimodal Composite Metal Foams. *Adv. Eng. Mater.*, 2100384.
- [10] Bubonyi, T., Barkóczy, P., Kemény, A., és Gácsi, Z. (2024) Microstructural characterization of bimodal composite metal foams under compression with machine learning. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, 108292.

Tudományos előadások:

- a) Bubonyi Tamás, Barkóczy Péter, Gácsi Zoltán: „*Számítógéppel generált és komputertomográffal készített felvételek összehasonlítása*” Országos Anyagtudományi Konferencia, 2021, Balatonkenese
- b) Bubonyi Tamás, Barkóczy Péter, Kemény Alexandra, Gácsi Zoltán: „*Valós habszerkezetek vizsgálata*” Országos Röntgentomográfiai Fórum 2022, Veszprém
- c) Bubonyi Tamás, Barkóczy Péter, Kemény Alexandra, Gácsi Zoltán: „*In situ tomográfia alkalmazásának előnyei a szerkezetvizsgálatba*” XXX. Hőkezelő és Anyagtudomány a Gépgyártásban Országos Konferencia és Szakkiállítás 2022, Balatonfüred
- d) Bubonyi Tamás, Barkóczy Péter, Kemény Alexandra, Gácsi Zoltán: „*Quantitative analysis of Composite metal foams*” Országos Röntgentomográfiai Fórum 2023, Balatonalmádi
- e) Bubonyi Tamás, Barkóczy Péter, Kemény Alexandra, Gácsi Zoltán: „*Kompozit fémhab szerkezetének kvantitatív vizsgálata*” Országos Anyagtudományi Konferencia, 2023, Balatonkenese
- f) Bubonyi Tamás, Barkóczy Péter, Kemény Alexandra, Gácsi Zoltán: „*Bimodális kompozit fémhab zömítés hatására kialakuló szerkezetének jellemzése gépi tanulás segítségével*” Országos Röntgentomográfiai Fórum 2024, Veszprém

10. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] I. N. Orbulov, A. Kemény, Á. Filep, és Z. Gácsi, „Compressive characteristics of bimodal aluminium matrix syntactic foams”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, köt. 124, o. 105479, szept. 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105479.
- [2] A. Kemény, B. Leveles, T. Bubonyi, és I. N. Orbulov, „Effect of particle size and volume ratio of ceramic hollow spheres on the mechanical properties of bimodal composite metal foams”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, köt. 140, o. 106152, jan. 2021, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.106152.
- [3] M. A. Kader és *mtsai.*, „Modelling and characterization of cell collapse in aluminium foams during dynamic loading”, *International Journal of Impact Engineering*, köt. 96, o. 78–88, okt. 2016, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2016.05.020.
- [4] B. Zhou, Q. Ku, H. Wang, és J. Wang, „Particle classification and intra-particle pore structure of carbonate sands”, *Engineering Geology*, köt. 279, o. 105889, dec. 2020, doi: 10.1016/j.enggeo.2020.105889.
- [5] H. Bindu és K. Prasad, „An Efficient Medical Image Segmentation Using Conventional OTSU Method”, *International Journal of Advanced Science and Technology*, köt. 38, jan. 2012.
- [6] M. Wojdyr, „Fityk: a general-purpose peak fitting program”, *Journal of Applied Crystallography*, köt. 43, sz. 5–1, o. 1126–1128, 2010, doi: 10.1107/S0021889810030499.
- [7] S. Sahu, Mohd. Z. Ansari, D. P. Mondal, és C. Cho, „Quasi-static compressive behaviour of aluminium cenosphere syntactic foams”, *Materials Science and Technology*, köt. 35, sz. 7, o. 856–864, máj. 2019, doi: 10.1080/02670836.2019.1593670.
- [8] Gácsi Zoltán, Simon Andrea, és Pázmán Judit, *Fémkompozitok*. Miskolc: Miskolci Egyetem, 2011.
- [9] B. Leveles, A. Kemény, T. Bubonyi, és I. N. Orbulov, „Manufacturing and Comparison of Sr Modified or Unmodified AlSi12 Eutectic Alloy Matrix Unimodal and Bimodal Composite Metal Foams”, *Adv. Eng. Mater.*, o. 2100384, okt. 2021, doi: 10.1002/adem.202100384.
- [10] T. Bubonyi, P. Barkóczy, A. Kemény, és Z. Gácsi, „Microstructural characterization of bimodal composite metal foams under compression with machine learning”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, o. 108292, máj. 2024, doi: 10.1016/j.compositesa.2024.108292.

