

4. Ugyancsak egyfázisúságot stabilizáló tényező lehet 3d átmenetifémekből álló nagy entrópiájú ötvözetek képződésében a d-pályák betöltetlensége miatt fellépő atomi kontrakció.

Köszönetnyilvánítás

A közleményben bemutatott kutatást az Új Széchenyi Terv keretében az EFOP-3.6.2-16-2017-00016 projekt részeként hajtották végre. A projekt befejezését az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozza.

Irodalom

- [1] *W. Hume-Rothery*: Electrons, Atoms, Metals and Alloys. Dover Publications, 1963, Dover, New York. ASIN: B0006 AYT4W
- [2] *L. Pauling*: The Nature of the Chemical Bond. Cornell University Press, 1960, Ithaca, ISBN: 0-8014-0333-2.
- [3] *W. G. Moffatt*: The Structure and Properties of Materials. IV. kötet, Electronic Properties, John Wiley and Sons Inc., 1970, New York, London, Sydney.
- [4] *A. R. Miedema, F. R. de Boer, P. F. de Chatel*: Empirical description of the role of electronegativity in alloy formation. J. Phys. F: Metal Phys. 3 kötet, 1973, 1558–1576.
- [5] *A. G. Guy*: Fémfizika, Műszaki Könyvkiadó, 1978, Budapest. ISBN 963 1021238
- [6] *Ch. Kittel*: Bevezetés a Szilárdtest-fizikába, Műszaki Könyvkiadó, 1981, Budapest. ISBN 963 10 3256 6
- [7] *Lovas Antal*: Járműanyagok, Typotex Kiadó, 2012, Budapest. ISBN 978 963 279 6284
- [8] *R. Zehring, P. Oelhafen, H.-J. Güntherodt, Y. Yamada and U. Mizutani*: Electronic structure of hydrogenated amorphous Ni-Zr alloys. Mat. Sci. Eng., 99 kötet, 1988, 253–256.
- [9] *A. T. Robinson, J. E. Dorn*: Effect of alloying elements on the electrical resistivity of aluminium alloys. AIME Transactions, 1961. június, Journal of Metals, 451.
- [10] *Prohászka János*: Bevezetés az anyagtudományba I., Tankönyvkiadó, 1988, Budapest. ISBN 9631806723
- [11] *Greenwood, Norman N. Eamshaw, Alan*: Chemistry of the Elements (2nd ed.). Butterworth-Heinemann, 1997. ISBN 978 07 5063 3659
- [12] *Lovas Antal*: Klaszterjelenségek átmenetifém alapú nem egyensúlyi ötvözetek tulajdonságaiban és átalakulásaiban, Akadémiai doktori értekezés, 2009, Budapest.
- [13] *B. Cantor, I. T. H. Chang, P. Knight, A. J. B. Vincent*: Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. Materials Science and Engineering: A, 375–377. kötet, 2004, 213–218, ISSN 0921-5093
- [14] *A. R. Miedema, R. Boom, F. R. De Boer*: On the heat of formation of solid alloys. Journal of the Less Common Metals, 41. kötet, 1975, 283–298.

LEVELES BORBÁLA – KEMÉNY ALEXANDRA – ORBULOV IMRE NORBERT

Alumínium mátrixú bimodális fémhabok gyártása és vizsgálata

A fémhabokat az autóiparban egyre nagyobb körben használják nagy fajlagos energiaelnyelő képességük és relatív kis tömegük miatt. A fémhabok olyan anyagok, amelyek meghatározott részben porozitást tartalmaznak, valamint öntött fém mátrixanyagot. Szintaktikus fémhaboknál a második fázis – amely a sűrűség csökkentéséért felelős – gömbhéjak vagy zárt falú porózus anyagok bevitelével jön létre. A kutatásunk során bimodális fémhabokat gyártottunk, ahol két különböző átmérőjű kerámia gömbhéjat alkalmaztunk töltőanyagként. A gömbhéjak alapanyaga nagy tisztaságú alumínium-oxid kerámia, névleges átmérőjük $\varnothing d_1 = 7$ mm és $\varnothing d_2 = 2,4$ mm. A fémhabokban 1:1; 2:1 és 4:1 térfogatarányban helyeztük el a két különböző méretű gömbhéjat, amelyet keverés után egyenletes eloszlásúnak tekinthetünk. Az így létrehozott anyag befoglaló térfogatának ~ 69-73%-át töltik ki gömbhéjak a keverési aránytól függően, amelyek közé kis nyomással Al99,5 alumíniumot infiltráltunk, így létrehozva a cellás szerkezetű anyagot. A gyártási paraméterek nagy hatással vannak az elkészült fémhab tulajdonságaira, ezért különböző előhevítési és olvadék-hőmérséklettel, infiltráló nyomással és idővel kísérleteztünk a megfelelő nedvesítés és kitöltés elérése érdekében. A gyártott mintákat makroképek és mikroszkópos felvételek alapján értékeltük.

1. Bevezetés

Habos anyagok a természetben egy nagyobb szerkezet stabilitásnövelése végett jöttek létre. Célszerűen a természetben a tömeg csökkentésére és egyidejűleg a szilárdság fenntartására, növelésére irányult a szelekció. A fémhabokat a luxusautó-iparban, űrtechnikában és tengerészetben egyre nagyobb körben használják nagy fajlagos energiaelnyelő-képességük és relatív kis tömegük miatt. A szintaktikus fémhabok olyan cellás szerkezetű anyagok, amelyeknek mátrixanyaga fém, második fázisa pedig egy

kisebb sűrűségű töltőanyag, általában porózus vagy üreges (minden esetben levegőt tartalmazó) anyag. A kutatásunk során bimodális fémhabot gyártottunk, ahol két különböző átmérőjű kerámia-gömbhéjat alkalmaztunk töltőanyagként.

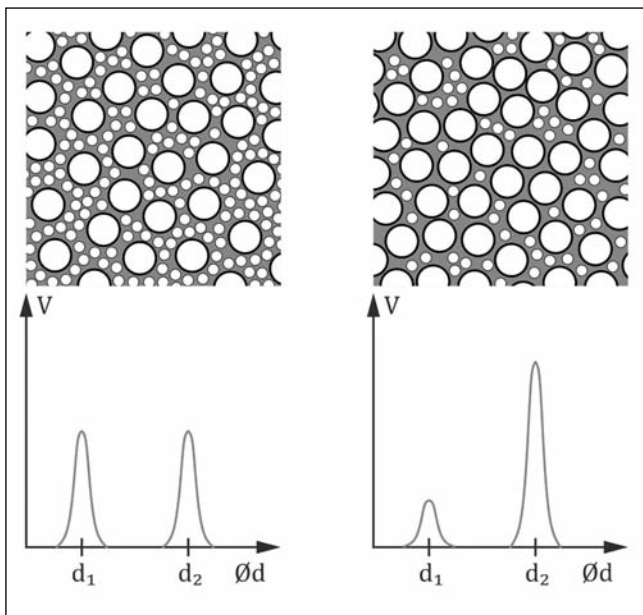
A szakirodalom a fémhabokat a hibridek osztályába sorolja a kompozitok, szendvicsszerkezetű és rácsos anyagok közé. Azokat a speciális fémhabokat, ahol a cellákat a második fázis hozza létre, az anyagon belüli elhelyezkedésük pedig homogénnek tekinthető, illetve méretük közel azonos, szintaktikus fémhaboknak nevezzük. Ezek mátrix-

anyaga valamilyen könnyűfém, töltőanyaga pedig valamilyen kerámia gömbhéj, amely lehetővé teszi a porozitást [1].

Fémhabok többféle gyártástechnológiával is létrehozhatók. Ezek közül három módszer terjedt el: a porkohászati eljárás, a bekeveréses öntés és a nyomásos infiltrálás [2–4]. A legelterjedtebb eljárás az infiltrálás, amely nedvesítési viszonytól [5, 6] függően lehet nyomásos, illetve gravitációval segített. Itt a mátrixanyagot olvadék állapotban juttatjuk a gömbhéjak közé, a nyomás alkalmazása a nedvesítés növelésére szolgál. Az infiltrálási nyomás, idő és hőmérséklet paraméterek beállításával végezhető el sikeresen a szintaktikus fémhaböntések [7–10].

A szintaktikus fémhabok további fejlesztéseként tekintethető a bimodális fémhabok. Bimodális fémhabok alatt a két eltérő átmérőjű gömbhéjjal töltött szintaktikus fémhabokat értjük, amelyekben a töltőanyag térkitöltése 10-20%-kal nagyobb, és sűrűségük akár 25%-kal kisebb, mint az unimodális (közel azonos átmérőjű) gömbhéjjal töltött haboké [11–12]. Az eltérő átmérőjű gömbhéjak aránya lehet az 50-50 tf%-tól különböző is, az 1. ábrán látható módon.

A szakirodalomban a bimodális fémhabokról kevés információ áll rendelkezésre. *Tao és munkatársai* bimodális kerámia mikro-gömbhéjjal töltött alumínium mátrixú szintaktikus habokat vizsgáltak. Kutatásaikban a gyártott bimodális fémhabok akár 10%-kal nagyobb porozitást és 8%-kal nagyobb kezdeti alakváltozást mutattak, mint a szintaktikus fémhabok. Ezt finom (75–125 μm) és durva



■ 1. ábra. Bimodális fémhabok lehetséges töltőanyag-eloszlási arányai

(250–500 μm) kerámia gömbhéjjal töltött AlSi1MgMn mátrixanyagú fémhabokon mutatták ki [11].

Orbulov és kutatócsoportja bimodális alumínium mátrixú szintaktikus habok nyomótulajdonságait vizsgálta. AlSi12 ötvözetet töltöttek kisebb (150 μm) és nagyobb (1425 μm) Globocer gömbhéjjal a kutatáshoz. A bimodális fémhabok mechanikai tulajdonságai a tisztán kicsi és tisztán nagy kerámia gömbhéjjal töltött szintaktikus fémhabok tulajdonságai közé estek, és a nyomószilárdság megbízhatóan megbecsülhető volt a keverékszabály alkalmazásával [13].

A bimodális fémhabok gyártásával eltökélt célunk egy olyan kétfázisú anyag létrehozása volt, amely a homogén, tömör kontinuum anyaghoz képest kisebb sűrűséggel és nagyobb fajlagos nyomószilárdsági tulajdonságokkal rendelkezik. Az ilyen anyagok gyártása jelenleg csak laboratóriumi körülmények között kivitelezhető a keverési módszerek és öntési paraméterek ismeretének hiányában. Amennyiben minden tényező ismertté válik, úgy a bimodális fémhab öntése is iparosítható, tetszőleges alakadási lehetőségekkel.

2. Eszközök és módszerek

A szintaktikus fémhabokban a mátrix felveszi és szétoszlatja a terhelést, valamint a határretegen keresztül a gömbhéjak is teherviselővé válnak. A kutatásunkhoz kohóalumínium (Al99,5) mátrix alapanyagot használtunk.

Második fázisként leggyakrabban porózus kerámia vagy fém gömbhéjat használnak. Az általunk gyártott bimodális fémhab töltőanyagai alapanyagukban és sűrűségükben is megegyező, de két különböző, adott átlagos átmérőjű kerámia gömbhéjak voltak. Az üreges gömbhéjak alapanyaga Al₂O₃ C795, MSZ EN 60672-3:1999 [14] alapján, névleges átmérőjük $\varnothing d_1 = 7 \text{ mm}$ és $\varnothing d_2 = 2,4 \text{ mm}$. Ezeket a gömbhéjakat a Hollomet cég gyártja, és Globocer néven kaphatók. A gömbhéjak speciális tulajdonságait egy korábbi kutatás részletezi [15].

2.1. Keverés

A bimodális fémhabok különlegessége a két méretű gömbhéj keverési arányában rejlik. A térkitöltési tényezőt első megközelítésben elméleti egyenletek alapján számoltuk ki [12], azonban a gyártott fémhabok térkitöltési tényezői kisebb értéket adtak, így ez a módszer nem jelent tökéletes megoldást. Három különböző keverési arányt vizsgáltunk a gyártás során, ahol a nagyobb-kisebb kerámia gömbhéj arányok a következők voltak: (1:1) 50-50 tf%; (2:1) 67-33 tf% és (4:1) 80-20 tf%. Az elméleti kitöltések nem térnek el jelentősen egymástól a három esetben: 72,8 tf%; 71,9 tf% és 69,7 tf%.

Leveles Borbála 2019-ben szerezte meg BSc-diplomáját a BME Gépészmérnöki Karán. Jelenleg a gépészmérnöki mesterképzési szak anyagtudomány specializációján MSc-hallgató és az MTA-BME Lendület Kompozit Fémhabok Kutatócsoport kutatója. Kutatásaiban bimodális szintaktikus fémhabok gyártásával és mechanikai tulajdonságaival foglalkozik.

Kemény Alexandra 2019-ben szerezte meg MSc-diplomáját a BME Gépészmérnöki Karán. Jelenleg az Anyagtudomány és Technológia Tanszék PhD-hallgatója és az MTA-BME Lendület Kompozit Fémhabok Kutatócsoport kutatója. Kutatásaiban nagy teljesítményű szintaktikus fémhabok előállításával és tulajdonságaival foglalkozik.

Orbulov Imre Norbert 2009-ben szerzett PhD-fokozatot a BME Gépészmérnöki Karán, majd 2018-ban szerezte meg az MTA doktora címét. Jelenleg az Anyagtudomány és Technológia Tanszék egyetemi tanára és az MTA-BME Lendület Kompozit Fémhabok Kutatócsoport vezetője. Kutatási területe a fémmátrixú kompozitok és fémhabok előállítása és tulajdonságaik vizsgálata.

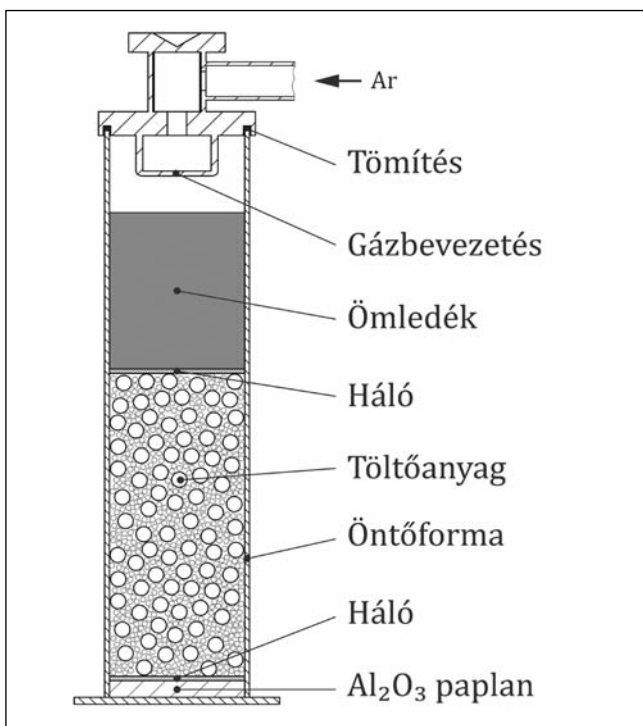
2.2. Bimodális fémhabok gyártása

A két különböző átmérőjű gömbhéjból kimértünk térfogatarányban (és a sűrűség miatt tömegarányban is) az eltervezett keverési aránynak megfelelő mennyiséget. A gömbhéjakat egy nagyobb edényben addig kevertük, míg közel egyenlő eloszlásúvá váltak. Ekkor beletöltöttük az előre meghegesztett és megfűrt talpas zártszelvénybe, amelybe előzetesen alumínium-oxid (vatta) paplant helyeztünk a mátrixanyag átfolyásának megakadályozására, és egy acélhálót a paplan elmozdulásának meggátolására, a 2. ábrán látható elrendezésben.

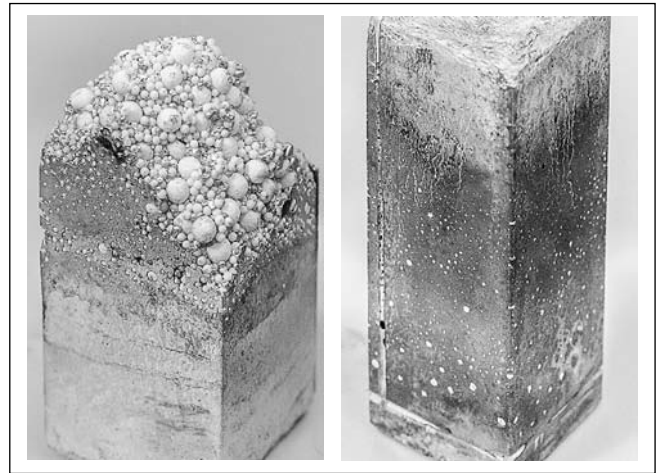
A kerámiával töltött tégelyt ekkor előhevítettük (az alumínium olvadáspontja alatt ~ 100 °C-kal), majd hűntartottuk 45 percig az egyenletes áthűlés végett. Ezalatt az indukciós kemencében megolvasztottuk a mátrixanyagot, hogy az öntés gyorsan elvégezhető legyen. A kisnyomású infiltrálás elvégzéséhez terveztünk és gyártottunk egy szigetelt pipát, amely egy nagynyomású argonpalackból reduktoron keresztül kap nyomást.

A kutatás során számos bimodális fémhaböntést hajtottunk végre, amelyek közül a megfelelő öntési paraméterek megismeréséig néhány sikertelen is volt. Az 1. táblázat bemutatja a helyes infiltrálási paramétereket Al99,5 mátrixanyag esetén. Hibásnak akkor tekintettünk egy öntést, ha a mátrixanyag nem töltötte ki a gömbhéjak közötti teret. Ez megvalósult olyan formában is, hogy az alumínium nem érte el a tégely alját és túl hamar megdermedt a 3. ábrán látható módon, illetve úgy is, hogy a túl kicsi viszkozitás vagy túl nagy nyomás hatására teljesen átfolyt a gömbhéjak között és a tégely alján kifolyt.

A mintákat gyémánttárcsás automata vágógépen vágtuk próbatestekké, mivel a kerámia gömbhéjak nagy keménysége miatt más módszerekkel nem tudtunk pontos, párhuzamos síkokat létrehozni.



■ 2. ábra. Sematikus ábra az infiltráló tégely keresztmetszetéről



■ 3. ábra. Hibás fémhaböntés (bal) és sikeres öntés (jobb)

1. táblázat. Infiltrációs paraméterek a sikeres öntések alapján az Al99,5 mátrixú bimodális fémhaboknál

Előhevítés (°C)	Hűntartás (min)	Infiltrálási nyomás (kPa)	Infiltrálási idő (s)	Mátrix olvadáshőmérséklet (°C)
550	45	300	5	720

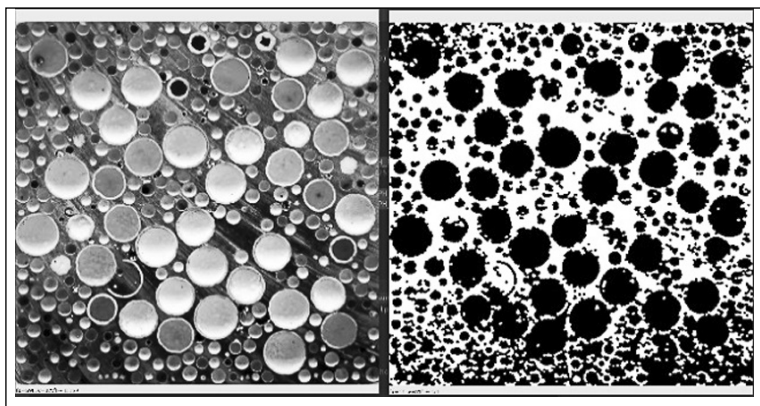
A kapott próbatestek felületét csiszolással és polírozással készítettük elő a makro- és mikroszerkezeti vizsgálatokhoz. Az eltérő keménységek és falporozitás miatt ez nehéz feladatnak bizonyult. Sajnos a leváló kerámiadarabkák folyamatosan kisebb karcolásokat okoztak az alumínium felületén, emiatt polírozó technikára kellett váltani. Először P80-as csiszolópapírral kezeltük a felületet, majd fokozatosan P200, P600, P1200-as papírt használtunk 2-2 percig. A P4000-es papírt a kerámiadarabkák felszakították, így polírozótárcsával (Buehler Alpha csiszoló-polírozógépen) és 3, majd 1 mikronos gyémántszemcsés polírozóanyaggal kezeltük a felületét 5-5 percig. Ezután már közel tükörsimának mondható a felület, bár számos helyen a leváló kerámiadarabok által okozott karcolások nem voltak eltüntethetők.

3. Eredmények

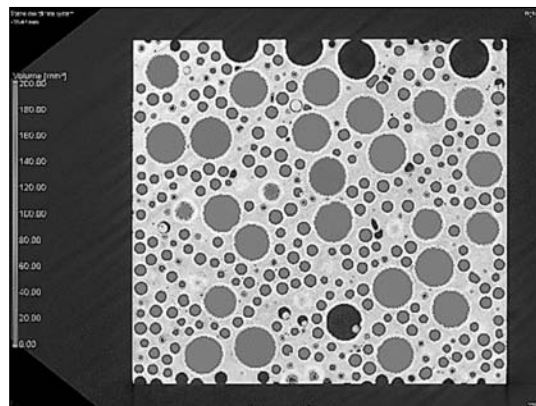
Az előállított bimodális fémhabok átlagos sűrűsége $1,62 \pm 0,03$ g/cm³ volt. A sűrűséget az élék hosszának és a kocka közepének mindhárom tengely irányú leméréséből számított térfogatából, illetve tömegmérésből kapott eredményekből számoltuk ki. Meg kell jegyezni, hogy a tömbök szélein lévő gömbhéjak mellett több alumínium van jelen, mint a tömb belsejében, és a sérült gömbhéjak aránya növeli a mért sűrűség értékét az elméleti sűrűséghez viszonyítva. Ez a mért érték 0,2 g/cm³-rel nagyobb, mint az elméleti 1,4 g/cm³.

3.1. Térkitöltési tényező meghatározása

A fémhabok gyártásának sikerességét először a gömbhéjak tényleges kitöltési arányának vizsgálatával és az elméleti értékkel való összehasonlításával lehet meghatározni. A maximum elérésekor az öntés hatékony. A legkézenfekvőbb módszer a töltőanyag eloszlásának a próbatest egy sík keresztmetszetén történő vizsgálata. Első megközelíté-



■ 4. ábra. Felületi térkitöltés szoftveres vizsgálata a próbatest keresztmetszetén



■ 5. ábra. CT-vizsgálat egy 2D-s keresztmetszeten

tésben megvizsgáltuk a nagy és a kis gömbhéjak számát, a második megközelítésben pedig az összes gömbhéj és az alumínium kitöltési arányát (tehát a felületi eloszlást). A gömbhéjak kitöltési arányának meghatározására szoftveres képelemzést használtunk [16]. Az Adobe Lightroom szoftver segítségével a képet megfelelő megvilágítottá és szürkeárnyalatossá javítottuk, az ImageJ szoftverrel pedig binárisá változtattuk a keresztmetszeti képet, amelynél a gömbök fekete színt jelölnek, a mátrix pedig fehéret. Miután kétféle képpont volt csak jelen a képen, kiszámoltuk a szoftverrel a kétféle képpont arányát, amiből egyenesen lehet következtetni a két fázis arányára. A 4. ábrán átlagosan 55–67%-os kitöltési arányt mértünk, amely jelentős eltérést mutat az elméleti 69–73%-os értéktől. A módszer némi hibával terhelt, mert a szoftver nem tudta pontosan megállapítani a gömbök színét a mélységi problémák miatt. A kicsi és a nagy gömbhéjak arányának meghatározását neurális hálók segítségével is vizsgáltuk, de a karcolások és a csiszolás pontatlanságai miatt ez a módszer sem működött hibátlanul. A paraméterek változtatásával a kiszámolt arány megközelítette az elméleti értékeket, de az eredmény nagy szórást mutat.

A töltőanyagarány mérésére megfelelő megoldás a számítógépes tomográfia (CT) 3D-s vizsgálata, amellyel az üregek térfogata megállapítható [17]. A mérési módszer nem veszi figyelembe a gömbhéjak falát, ezért azok térfogatát hozzá kell adni a kumulatív térfogathoz. További hátrány, hogy csak a tökéletes gömbök mérhetők; kimaradnak a felületi elvágott gömbök, illetve azok, amelyekbe részben

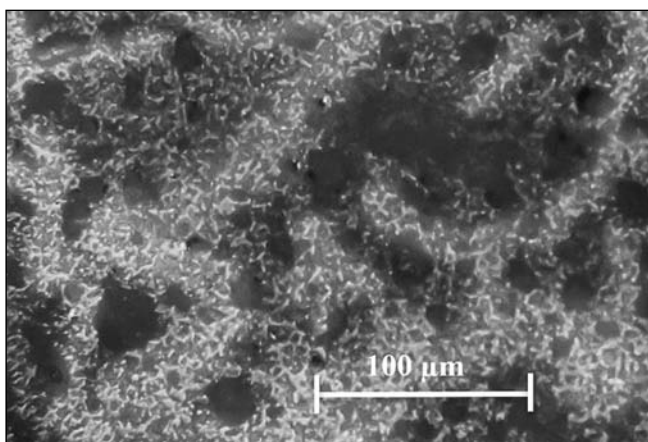
beszivárgott a mátrixanyag (5. ábra). Ebből a mérésből kapott eredményként a bimodális fémhabok ~50%-a üregekből áll, tehát a számított töltőanyagarány körülbelül 66%, amelybe a gömbhéjak fala és a felületi üregek is beleszámítanak. A mérés kiértékelése hosszadalmas, ezért egyszerűbb módszereket kell kidolgozni.

3.2. Falporozitás meghatározása

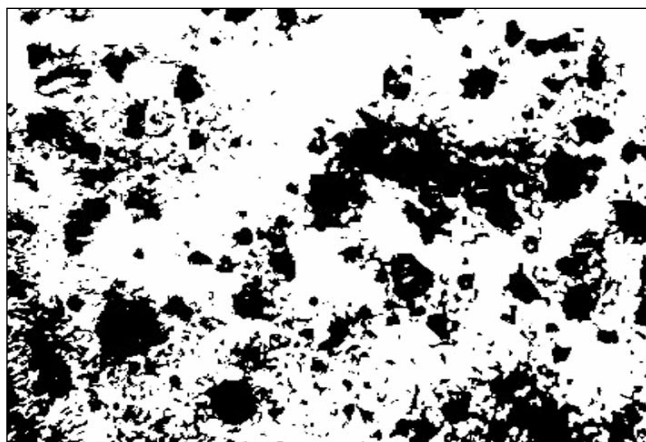
A mikroszerkezeti vizsgálatok során a kerámia gömbhéjak és az alumínium mátrix közötti kapcsolatot vizsgáljuk. Elsősorban a gömbhéjak falának porozitását érdemes vizsgálni, mivel ez befolyásolja az alumíniummal való kohézió kialakulásának képességét, illetve lehetőséget ad a fal károsodására. A gömbhéjak porozitása fémmikroszkópos képeken a csiszolt keresztmetszeteken figyelhető meg. A töltőanyag-eloszlás meghatározásához hasonlóan, a fal porozitását is képelemzéssel határoztuk meg, a gömbhéjarány meghatározásához hasonlóan. Az ImageJ szoftver által létrehozott bináris kép alapján a porózus részek százalékos lefedettsége meghatározható a fekete-fehér képpontok arányában. Átlagosan 40-60%-os porozitást figyeltünk meg. A 6. ábrán az Olympus PMG-3 készüléken készített fémmikroszkópos kép szemlélteti a gömbhéj falának porozitását.

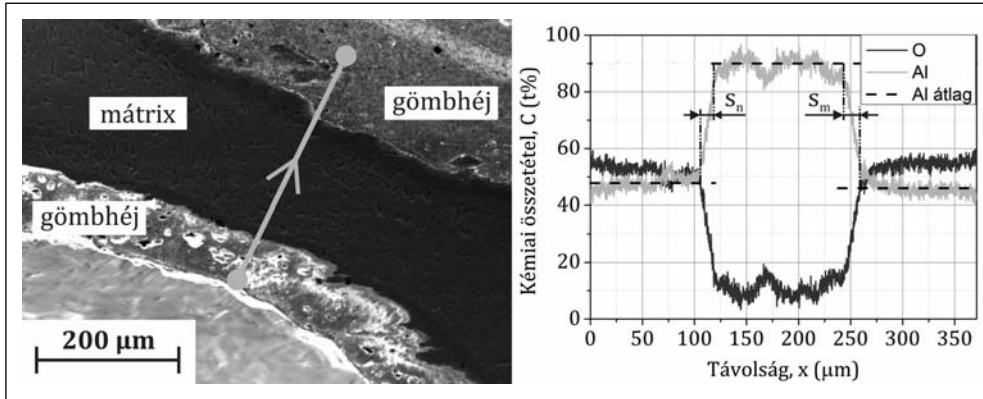
3.3. Az átmeneti réteg vastagsága

Energiadiszperzív röntgenspektroszkópiával (EDS) a két anyag (mátrix és gömbhéj) közötti átmeneti réteg alapo-



■ 6. ábra. Közelítő megoldás a falporozitás vizsgálatára





■ 7. ábra. A határreteg vastagságának meghatározása vonalmenti EDS-vizsgálattal

sabban megvizsgálható. A határreteg vastagságának meghatározásához az elemek vonalmenti százalékos tömegeloszlását Zeiss EVO MA10 pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) és EDAX Z2 modulval végeztük. A mérés célja a gömbhéjak fala és az alumínium mátrix közötti kapcsolat megismerése, amely nagy jelentőségű a szerkezeti integritás szempontjából. A kapcsolat lehet adhéziós vagy kohéziós. Az adhéziós kötés csak a gömbhéjak felületének geometriai tulajdonságaitól függ, a koherens kapcsolat esetén az anyagok között kémiai kötés alakul ki. A két jelenség gyakran átfedésben van, összetett kapcsolatot eredményezve. A határreteg vizsgálatához vonalmenti EDS-mérést végeztünk merőlegesen a gömbhéj falára és a mátrixanyagon keresztül. Az EDS-profil vonalán szereplő pontok a tényleges kémiai összetételt mutatják tömegszázalékban. A méréseket csiszolt keresztmetszeteken végeztük, az egyik gömbhéj falától kezdve, a mátrixanyagon át egy másik üreges gömb falával bezárólag (7. ábra).

A mérési adatok alapján meghatározható az elemek eloszlása a mátrix anyagában és a gömbhéj falában is, ezekből az adatokból pedig kiszámolható az egyes elemek mennyiségének átlagos értéke is. Az így kapott vonalak közötti átmenet meghatározza a határreteg vastagságát. A réteg vastagságát $\bar{s} = 12,50 \pm 3,22 \mu\text{m}$ -nek mértük, amely viszonylag vastag átmeneti réteget és erős kötést jelent a gömbhéjak és az Al99,5 mátrixanyag között.

4. Összefoglalás

A mérésekből az alábbi következtetéseket lehet levonni:

- A CT-vizsgálat információt ad az üregek térfogatáról, de egyszerűbb módszerekre van szükség a bimodális fémhabok kitöltési arányának meghatározására. A síkbeli képelemzés megoldást jelenthet erre a problémára, amennyiben a mérési szórást sikerül csökkenteni.

- A mért töltőanyagarány ~66% volt, tehát nagyobb kitöltési arány érhető el a vizsgált bimodális gömbhéjakkal, mint az azonos átmérőjű gömbökkel.

- A töltőanyagarány elméleti értékétől való eltérés a kerámia nagy falporozitásával magyarázható, ezáltal az olvadt alumínium bejuthat bizonyos gömbökbe a falakban lévő hibákon keresztül.

- További vizsgálatokat szükséges végezni a különböző méretű gömbhéjak keverési arányainak változtatásával, hogy kisebb sűrűségű habot lehessen létrehozni, és hogy

megközelítsük az elméleti töltőanyagarányt. A hibás gömbhéjak megnehezítik ennek a megvalósítását.

- A vonalmenti EDS-mérések igazolják, hogy mivel a gömbhéj és a mátrix között viszonylag vastag határreteg alakult ki, az Al99,5/Al₂O₃ bimodális fémhabok számára megfelelő infiltrációs paramétereket határoztunk meg, jó a kötés a héj és a mátrix anyag között.

Irodalom

- [1] Gupta N., Rohatgi P. K.: 2018 4.15 Metal Matrix Syntactic Foams. ed P. W. R. Beaumont and C. H. Zweben Compr. Compos. Mater. II 4 364–85.
- [2] Neville B. P., Rabiei A.: 2008 Composite metal foams processed through powder metallurgy Mater. Des. 29 388–96.
- [3] Manoj, Afzal Khan D. M. Mondal D. P.: 2018 High temperature deformation behavior of closed cell ZnAl27 hybrid foam made through stir casting technique Mater. Sci. Eng. A 731 324–30.
- [4] Ginsztler J., Orbulov I. N., Kun P.: 2013 Infiltration Characteristics and Compressive Behaviour of Metal Matrix Syntactic Foams Mater. Sci. Test. Informatics VI 729 68–73.
- [5] Castro G., Nutt S. R.: 2012 Synthesis of syntactic steel foam using gravity-fed infiltration Mater. Sci. Eng. A 553 89–95.
- [6] Dobránszky J., Orbulov I. N., Németh Á.: 2008 Composite Production by Pressure Infiltration Mater. Sci. Test. Informatics IV 589 137–42.
- [7] Palmer R. A., Gao K., Doan T. M., Cavallaro G.: 2007 Pressure infiltrated syntactic foams—Process development and mechanical properties Mater. Sci. Eng. A 464 85–92.
- [8] Orbulov I. N.: 2013 Metal matrix syntactic foams produced by pressure infiltration—The effect of infiltration parameters Mater. Sci. Eng. A 583 11–9.
- [9] Bárczy T., Kaptay G.: 2009 Modeling the Infiltration of Liquid Metals Into Porous Ceramics Mater. Sci. Forum 473–474., 297–302.,
- [10] Castro G., Nutt S. R.: 2012 Synthesis of syntactic steel foam using mechanical pressure infiltration Mater. Sci. Eng. A 535 274–80.
- [11] Tao F., Zhang L. P., Zhao Y. Y.: 2009 Al matrix syntactic foam fabricated with bimodal ceramic microspheres Mater. Des. 30 2732–6.
- [12] Brouwers H. J. H.: 2013 Random packing fraction of bimodal spheres: An analytical expression Phys. Rev. E – Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys. 87 1–8.
- [13] Orbulov I. N., Kemény A., Filep Á., Gácsi Z.: 2019 Compressive characteristics of bimodal aluminium matrix syntactic foams Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 124 105479
- [14] MSZ EN 60672-3:1999: Kerámia és üveg szigetelőanyagok. 3. rész: Az egyes anyagok előírásai (IEC 60672-3:1997)
- [15] Kemény A., Károly D.: 2019 Mechanical and Microstructural Features of Ceramic Hollow Spheres Acta Mater. Transylvanica 2 27–31.
- [16] Bubonyi T., Barkóczy P., Lénárth G.: 2017 Automated Image analysis of the inhomogeneities in the microstructure of aluminium castings Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2017) 79–83.
- [17] Kozma I., Zsoldos I., Dorogi G., Papp S.: 2014 Computer tomography based reconstruction of metal matrix syntactic foams Period. Polytech. Mech. Eng. 58 87–91.