

# Fémhátrixú kerámia kompozitok mikroszerkezeti tulajdonságai

*Kerámia gömbhéjerősítésű fémhátrixú kompozitokat állítottunk elő nyomásos infiltrálással. Vizsgáltuk a mikrogömbhéjak mikroszerkezetét külön és öt alumíniumötvözet mátrixanyaggal kapcsolatban. A gömbhéjak főként  $Al_2O_3$  és  $SiO_2$  tartalmú oxidkerámiák. A mintákon röntgendiffrakciós vizsgálatokat és energiadiszerzív röntgenspektroszkópiás méréseket végeztünk. Az eredmények szerint az  $Al_2O_3$  és a  $SiO_2$  eloszlása a gömbhéjak falában nem egyenletes; túszerű  $Al_2O_3$  fázis van beágyazva a környező  $SiO_2$  fázisba és mullitba. Az  $Al_2O_3$  részecskék egyenlőtlen eloszlása miatt az olvadt alumínium redukálni tudta a mikrogömbhéjak  $SiO_2$ -ban dús részét, és ez a gömbhéjak degradációjához vezetett.*

## 1. Bevezetés

A fémhátrixú kompozitok napjainkban egyre nagyobb teret nyernek, amit alátámaszt a témában megjelent cikkek egyre növekvő száma. A csak fém- és gázfázist tartalmazó „hagyományos” fémhabok irodalma széleskörű, de vannak még nyitott kérdések például a habosítási folyamattal kapcsolatban is [1, 2]. A fémhabok egy speciális csoportja, a szintaktikus fémhabok megfelelnek a részecskerősítésű kompozitok definíciójának is. A szintaktikus fémhabnak számos perspektivikus alkalmazási területe van például a csomagolási, öntészeti és autóiparban is, a nagy energiaelnyelési, csillapítási képessége és kis sűrűsége miatt. Ezekben a porózus anyagokban a porozitást kerámia, illetve fém gömbhéjak mátrixba ágyazásával érik el [3; 4]. A mikrogömbhéjak kereskedelmi forgalomban kaphatók [5], minőségük jelentősen befolyásolja a fémhabok tulajdonságait.

A szintaktikus fémhabok legfontosabb tulajdonsága a nyomószilárdság és az alakváltozás során elnyelt energia. Wu és munkatársai a mikrogömbhéjak méretének a nyomószilárdságra gyakorolt hatását vizsgálták. Azt találták, hogy a kisebb gömb-

héjak nagyobb nyomószilárdságot biztosítanak a kompozitnak, mivel mikroszerkezetükben kevesebb hibát tartalmaznak, mint a nagyobb gömbhéjak. Rohatgi szintén vizsgálta a gömbhéjak mérethatását, de nem csak a nyomószilárdság, hanem a gyártás, az infiltrálás szemszögéből is, szerinte a nagyobb gömbhéjak könnyebben infiltrálhatók [6]. Palmer megmutatta, hogy a nagyobb gömbhéjak falában nagyobb a porozitás és mikroszerkezetükben több a hiba, mint a kisebbekben [7]. Az ebben a témában végzett zömítővizsgálatok összehasonlítása azonos eredményre vezetett, mint az eddig ismertettek [8]. Balch a mátrixról a gömbhéjakra terjedő terhelésátadást vizsgálta. Találtak egy kémiai reakciót is a gömbhéjak és a mátrixanyagok között, amely meghatározó hatású a szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságaira. Ezért a mikroszerkezet és a gömbhéjak minősége igen fontos [9]. A nyomószilárdság mellett a szintaktikus fémhabok más mechanikai tulajdonságait, szakítószilárdságát, keménységét is vizsgálták [10].

A gyártás során a mátrix és a gömbhéjak közötti nedvesítési szögnek meghatározó szerepe van az infiltrációra és a küszöbnyomásra [11-12]. A nedvesítési szöget sok paraméter, többek közt a kémiai összetétel és az erősítőanyag-mátrix között lehetséges kémiai reakciók befolyásolják. Ezért indokolt a gömbhéjak vizsgálata mikroszerkezeti szinten is.

Kutatásunk fő célja a gömbhéjak mikroszerkezete és az alumínium mátrix – kerámia gömbhéj közötti átmeneti réteg vizsgálata volt.

## 2. Felhasznált anyagok és vizsgálati módszerek

A vizsgált gömbhéjak az Envirospheeres Ltd. (Ausztrália) által gyártott SL150 és SL300 típusú termékek voltak, fő paramétereik az 1. táblázatban láthatóak. A fázisösszetételeket röntgendiffrakcióval (XRD), Phillips X-Pert diffraktométerrel határoztuk meg 35 mA katód-fűtés, réz anód ( $CuK\alpha$ ,  $\lambda=0,154186$  nm) és 40 kV gyorsítófeszültség mellett. A goniométer forgási sebessége 0,04 fok/sec volt. A pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálatok Phillips XL-30 elektronmikroszkóppal és EDAX Genesis típusú energiadiszerzív röntgenspektroszkóp (EDS) detektorral készültek. A kerámia mikrogömbhéjakra az elektronmikroszkóppal történő felületi leképezéséhez karbont párologtatunk. Az EDS-mérésekhez 15 kV gyorsítófeszültséget használtunk. A mikrogömbhéjakról EDS-térkép is készült.

Később a gömbhéjakból szintaktikus fémhabokat készítettünk a következő mátrixanyagokkal: Al99,5, AlSi12, AlMgSi1, AlCu5 és AlZn5. A gömbhéjak térkitöltése viszonylag nagy (60 térf.%) volt, a gyártási eljárást korábbi cikkünkben [3] közzétettük. A szintaktikus fémhabok sűrűség és porozitás adatai a 2. táblázatban láthatók, kémiai összetételükről a 3. táblázat ad tájékoztatást. A mátrixporozitás értékét úgy számítottuk, hogy az elméleti sűrűség és a mért sűrűség különbségét elosztottuk az elméleti sűrűség értékével. A negatív mátrixporozitás infiltrált gömbhéjakra utal. A mátrixporozitás mindig 8% alatt maradt, így az infiltráció jónak mondható. A 3. táblázat értékeit XRD-méréssel határoztuk meg. A mikrogömbhéjak és mátrixanyag találkozásánál levő határréteg elemeloszlásának vizsgálatára piló-

Májlinger Kornél életrajza a Kohászat 2011/3. számában található.

Orbulov Imre Norbert életrajza a Kohászat 2011/3. számában található.

1. táblázat. A gömbhéjak morfológiai tulajdonságai és fázisösszetételük (XRD-vel mérve, t%) [14]

| Típus | Átlagos átmérő(μm) | Mérettartomány (95%)(μm) | Fajlagos felület (μm <sup>-1</sup> ) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Amorf SiO <sub>2</sub> | Mullit | Kvarc | Más     |
|-------|--------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|------------------------|--------|-------|---------|
| SL150 | 100                | 56-183                   | 0,060                                | 30-35                          | 45-50                  | 19     | 1     | maradék |
| SL300 | 150                | 101-330                  | 0,040                                |                                |                        |        |       |         |

2. táblázat. A szintaktikus fémhabok sűrűség és porozitás értékei [3]

| Minta         | Sűrűség (gcm <sup>-3</sup> ) |      | Porozitás (%) |        |        |
|---------------|------------------------------|------|---------------|--------|--------|
|               | Elméleti                     | Mért | Részecske     | Mátrix | Teljes |
| Al99,5-SL150  | 1,34                         | 1,43 | 50,9          | -6,2   | 44,7   |
| Al99,5-SL300  | 1,42                         | 1,52 | 48,2          | -7,2   | 41,0   |
| AlSi12-SL150  | 1,32                         | 1,31 | 50,9          | 1,1    | 52,0   |
| AlSi12-SL300  | 1,40                         | 1,37 | 48,2          | 1,9    | 50,1   |
| AlCu5-SL150   | 1,37                         | 1,53 | 50,9          | -11,6  | 39,3   |
| AlCu5-SL300   | 1,44                         | 1,62 | 48,2          | -12,2  | 36,0   |
| AlMgSi1-SL150 | 1,34                         | 1,52 | 50,9          | -13,4  | 37,5   |
| AlMgSi1-SL300 | 1,42                         | 1,57 | 48,2          | -10,5  | 37,7   |
| AlZn5-SL150   | 1,38                         | 1,49 | 50,9          | -8,0   | 42,9   |
| AlZn5-SL300   | 1,45                         | 1,53 | 48,2          | -5,5   | 42,7   |

3. táblázat. A szintaktikus fémhabok fázisösszetétele XRD-mérések szerint (t%)

| Minta         | Al | Si | Mullit | α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Kvarc | Amorf | CuAl <sub>2</sub> |
|---------------|----|----|--------|----------------------------------|----------------------------------|-------|-------|-------------------|
| Al99,5-SL150  | 67 | 8  | 11     | 3                                | 11                               | 0     | 0     | -                 |
| Al99,5-SL300  | 78 | 0  | 11     | 0                                | 0                                | 0     | 11    | -                 |
| AlSi12-SL150  | 72 | 7  | 13     | 0                                | 0                                | 0     | 8     | -                 |
| AlSi12-SL300  | 72 | 7  | 12     | 0                                | 0                                | 1,0   | 8     | -                 |
| AlMgSi1-SL150 | 60 | 7  | 8      | 0                                | 25                               | 0     | 0     | -                 |
| AlMgSi1-SL300 | 60 | 6  | 6      | 0                                | 28                               | 0     | 0     | -                 |
| AlCu5-SL150   | 60 | 6  | 8      | 8                                | 12                               | 0     | 0     | 6                 |
| AlCu5-SL300   | 60 | 5  | 10     | 7                                | 12                               | 0     | 0     | 6                 |
| AlZn5-SL150   | 65 | 5  | 10     | 0                                | 20                               | 0     | 0     | -                 |
| AlZn5-SL300   | 68 | 5  | 7      | 0                                | 20                               | 0     | 0     | -                 |

zott metallográfiai mintán vonalmenti EDS-méréseket végeztünk. A minta-előkészítés lépéseit a 4. táblázat tartalmazza. A vonalmenti EDS-mérésekhez 20 kV gyorsítófeszültséget használtunk, pontonként 15 s-ig 35 μs-os detektor kiolvasási idővel.

### 3. Vizsgálati eredmények és kiértékelésük

#### 3.1. A mikrogömbhéjak falának vizsgálata

Az 1. ábrán egy tipikus SL150 típusú

gömbhéj felülete, a 2. ábrán pedig egy Al99,5 mátrixba foglalt gömbhéj keresztmetszeti képe látható SEM-felvételen. Mindkét ábrán túszerű struktúrák figyelhetők meg a gömbhéj falán. A tűk sűrűn helyezkednek el, és nincs kitüntetett irányultságuk. A visszaszórt elektron (back-scattered electron, BSE) detektorral készített felvételeken a szürkeárnyalatbeli eltérések eltérő kémiai összetételre utalnak. A

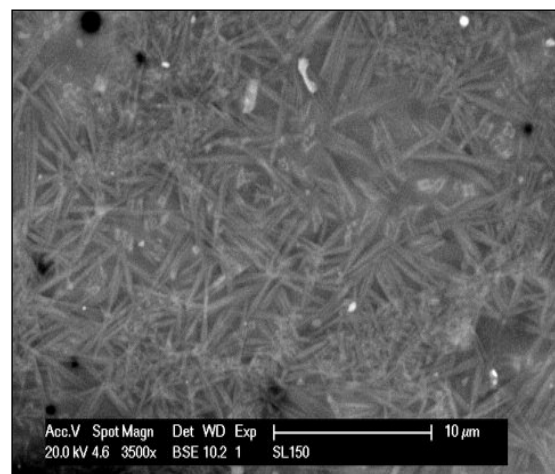
megfigyelt tűk igen rövidek és vékonyak, 5-10 μm hosszúak, míg átmérőjük kisebb, mint 0,5 μm.

EDS-térképet készítettünk a mikrogömbhéjak falán és keresztmetszeti csiszolaton különböző mátrixba ágyazott gömbhéjakon, példaként a 3. ábrán SL300 típusú gömbhéj falán készített EDS-térkép látható.

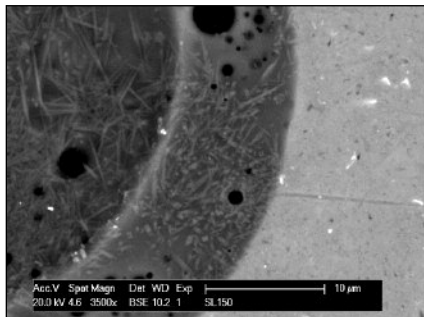
Mindkét gömbhéjtípus (SL150 és SL300) ugyanolyan jelleget mutatott. A 3a ábra a vizsgált felület SEM-felvételét mutatja, ezen is megfigyelhető a túszerű struktúra. A 3b ábrán látható az alumínium eloszlása, miszerint a „tűk” több alumíniumot tartalmaznak, mint a környező tartományok. Az XRD-mérések szerint az Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> és a SiO<sub>2</sub> mullitot (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>) képez, így az 1. táblázat szerint a gömbhéjak fala mullit és amorf SiO<sub>2</sub> keverékéből áll. Ezek szerint az Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> eloszlása egyenetlen, található a fal mátrixában (a mullitban) és Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-tűként beágyazva ebben a mátrixban. A 3d ábra, mely a szilíciumeloszlást mutatja, ezt egyértelműen alátámasztja. Ezek szerint a tűk nem tartalmaznak szilíciumot, tehát valóban Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-tűk. Végül az oxigéneloszlás (3c ábra) teljesen kiegyenlített az Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> és a SiO<sub>2</sub> részekenél is. Tehát a vizsgálat Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ban gazdag és amorf SiO<sub>2</sub> zónák jelenlétére is utal. Az amorf SiO<sub>2</sub> nemkívánatos, mivel az Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-mal és a mullittal ellentétben a SiO<sub>2</sub> kémiai

4. táblázat. A minta-előkészítés lépései vonalmenti EDS-vizsgálatokhoz

| Abrazív anyag            | A csiszolás/polírozás ideje (perc) | Csiszolási/polírozási erő (N) | Forgási sebesség (1/perc) | Forgásirány |
|--------------------------|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------|
| P 320 SiC                | 1                                  | 22                            | 220                       | ellen       |
| 6 μm gyémánt             | 15                                 | 27                            | 150                       | ellen       |
| 3 μm gyémánt             | 6                                  | 27                            | 150                       | ellen       |
| 0,05 μm SiO <sub>2</sub> | 3                                  | 27                            | 125                       | egyén       |

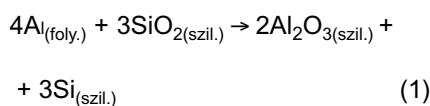


1. ábra. SEM-BSE-felvétel egy SL150 típusú kerámia mikrogömbhéj felületéről



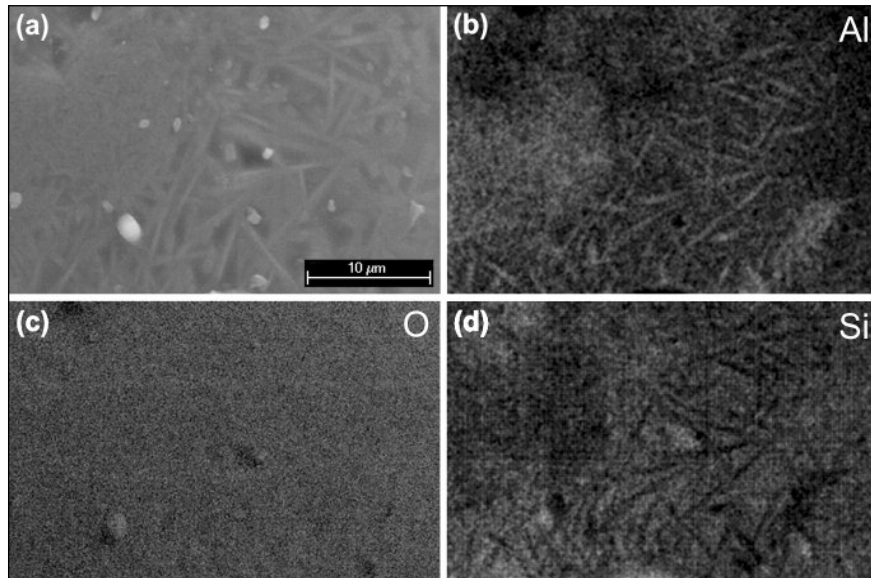
■ **2. ábra.** SEM-BSE-felvétel egy SL150 típusú kerámia mikrogömbhéj faláról keresztmetszeti csiszolaton

stabilitása nem megfelelő. A szintaktikus fémhab gyártásakor az olvadt alumínium képes a  $\text{SiO}_2$ -t redukálni, a következő reakció szerint:

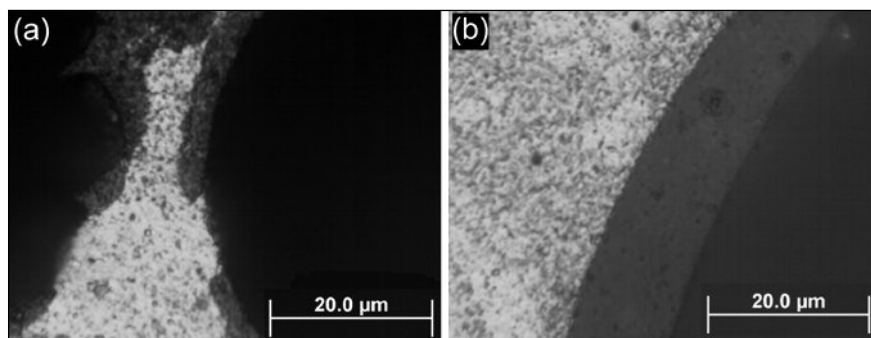


Ez a diffúzió által irányított reakció a mikrogömbhéjak falának tönkremeneteléhez vezet. Ez a hatás jól látszik például a *4a ábrán*.

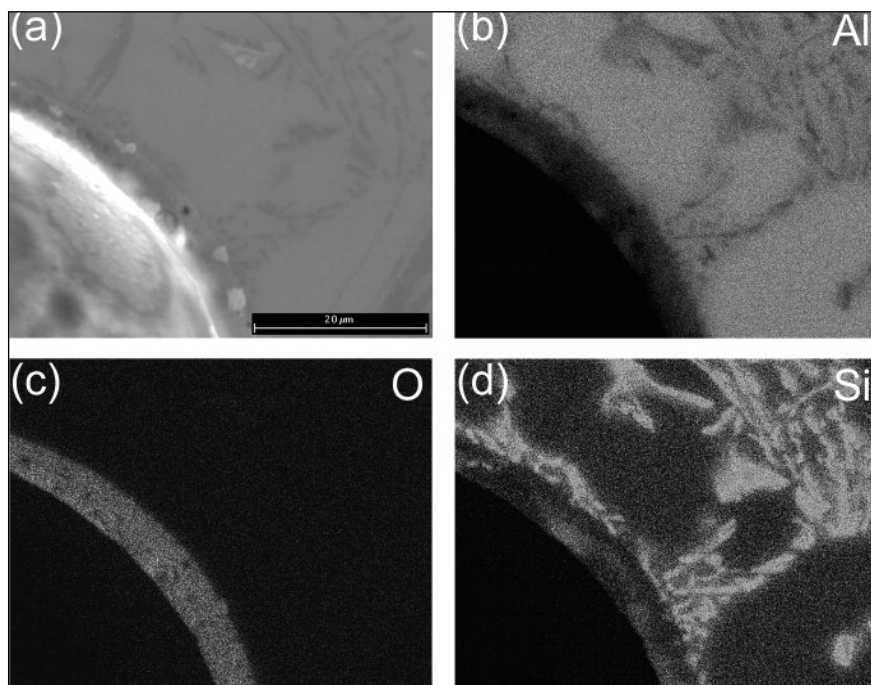
A jelenség, ahogy más publikációkban is láthattuk, jelentős nyomószilárdság-csökkenéshez és egyéb mechanikai tulajdonságok romlásához vezet [3, 13, 14]. Ugyanakkor a gyártás szempontjából kedvező is lehet, mert az oldódással járó reakciók általában javítják a nedvesítést. A reakció az AlSi12 mátrixanyag kivételével mindenhol végbement. Az infiltráció hőfoka is jelentősen befolyásolja a reakció sebességét, ezért is nem volt kimutatható reakció Al99,5-SL300 és AlSi12 mátrix esetén, mivel azokat alacsonyabb hőmérsékleten infiltráltuk (690 °C ill. 620 °C-on) [3]. Ez arra utal, hogy van egy határhőmérséklet, ami alatt a reakció nem megy végbe [3]. A reakció az AlSi12 mátrixanyagnál nem ment végbe, mivel a reakció diffúziós és hajtóereje a mikrogömbhéjak fala, illetve a mátrixanyag közötti Si-koncentráció különbsége. A mátrixanyag nagy szilíciumtartalma csökkentette ezt a hajtóerőt, így a reakció nem valósult meg. A *4b ábrán* jól látszik, hogy a gömbhéjak fala sértetlen maradt. A legtöbb  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  az AlMgSi1 mátrixú szintaktikus fémhabokban volt található. Az AlCu5 mátrix esetében a termodinamikai viszonyok még a  $\text{CuAl}_2$  fázis kialakulására is kedvezőek voltak.



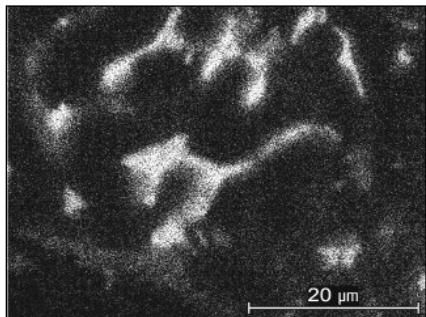
■ **3. ábra.** SEM-felvétel egy SL300 típusú kerámia mikrogömbhéj felületéről (a) és EDS-térkép erről a területről a következő elemek eloszlására: Al (b), O (c) és Si (d)



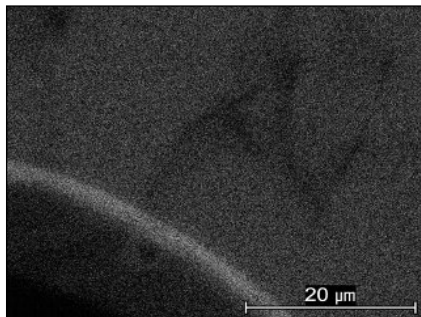
■ **4. ábra.** Fénymikroszkópi felvétel egy sérült SL150 (a) és egy hibátlan SL300 (b) gömbhéjről, Al99,5 (a) illetve AlSi12 (b) mátrixban



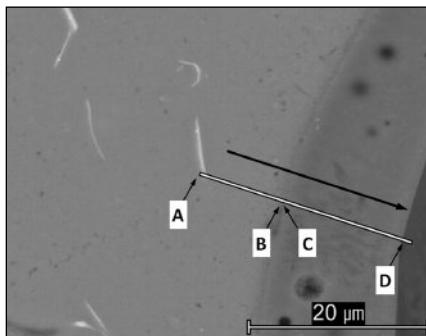
■ **5. ábra.** SEM-felvétel az Al99,5-SL300 szintaktikus fémhabról (a) és EDS-térképfelvételek ennek a területnek az elemeloszlásairól a következő elemekre: Al (b), O (c) és Si (d)



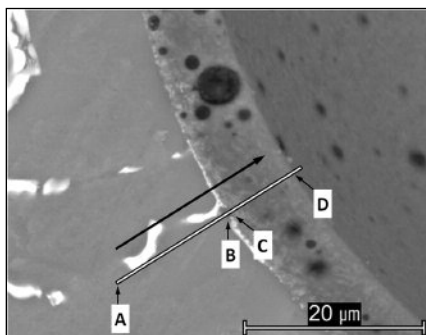
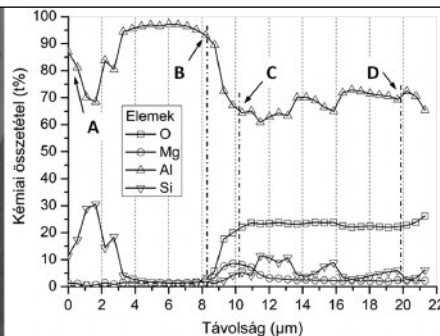
■ 6. ábra. EDS-térképfelvétel AlCu5 SL150 mintán a réz elemeloszlására, CuAl<sub>2</sub> kiválások láthatók



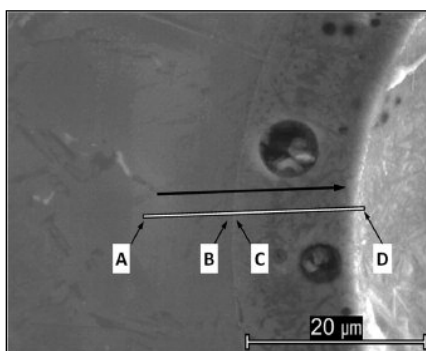
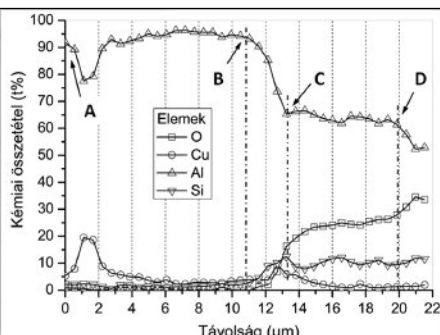
■ 7. ábra. EDS-térképfelvétel AlMgSi1-SL300 mintán a magnézium elemeloszlására, Mg-dúsulás látható a gömbhéj külső falán



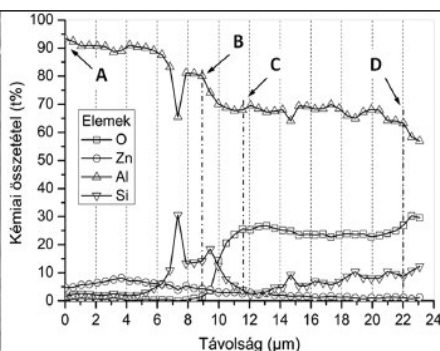
■ 8. ábra. SEM-BSE-felvétel AlMgSi1-SL150 mintáról, a vonalmenti EDS-mérés helye és eredménye



■ 9. ábra. SEM-BSE-felvétel AlCu5-SL300 mintáról, a vonalmenti EDS-mérés helye és eredménye



■ 10. ábra. SEM-BSE-felvétel AlZn5-SL300 mintáról, a vonalmenti EDS-mérés helye és eredménye



### 3.2. Az átmeneti réteg vizsgálata

Először áttekintő EDS-térképeket készítettünk a szintaktikus fémhabok

mikrogömbhéj-mátrix területéről, például az 5. ábrán az Al99,5-SL300 minta EDS-térképe látható.

A mátrix mikroszerkezete és a

megszilárdulás utáni szemcsehatárok is megfigyelhetők az alumínium (5b ábra) és szilícium (5d ábra) koncentrációjának eloszlásában. Az oxigén nagyobb koncentrációban csak a gömbhéj falában volt jelen (5c ábra), ezek a megállapítások az összes mintára érvényesek. Az AlSi12 mátrix esetében nagyobb szilíciumlemezek is jelen voltak. Az AlCu5 mátrix esetében rézben gazdag kiválások – az XRD-mérések szerint CuAl<sub>2</sub> fázis – voltak megfigyelhetőek (6. ábra, kb. 1 μm x 20 μm befoglaló mérettel). Az AlMgSi1 mátrix esetében a magnézium egyenetlen eloszlást mutatott az alumínium területeken, és a szilíciumlemezekben egyáltalán nem volt detektálható. Mg-dúsulás volt megfigyelhető a mikrogömbhéjak külső falán (7. ábra), ami a magnézium oldódására utal a gömbhéj falába. A mikrogömbhéj-mátrixanyag átmeneti rétegének részletesebb vizsgálatára nagyobb nagyítás mellett vonalmenti EDS-méréseket végeztünk.

Példaként a 8-10. ábrákon vonalmenti EDS-mérések eredményei láthatók AlMgSi1, AlCu5 és AlZn5 mátrixok esetére.

A 8. ábrán SL150 típusú gömbhéj nagy nagyítású SEM-BSE-felvétele látható. A gömbhéj külső fala rosszul definiált. Ez arra utal, hogy a mikrogömbhéj fala degradálódott az infiltráció során (cserereakció Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> képződéssel). A diffúziós folyamat a gömbhéj külső falán ~2-4 μm széles átmeneti réteg (a B-től a C pontig) képződéséhez vezetett. Korábbi munkáinkban 6 μm-es réteget is megfigyeltünk [14]. A C pont után az alumíniumtartalom a fal aktuális összetétele szerint változott. A D pont után a mérés a gömbhéj belsejének görbülete miatt nem megbízható. A mátrix anyagának lokális összetétele jól követhető az EDS-spektrumokban az alumínium- és szilíciumtartalom változásán, az összes mátrix ötvözet esetében.

Az AlMgSi1-SL150 minta esetében ilyen szilíciumdúsulást figyelhetünk meg az A és B pont között. A B és C pont közel van egymáshoz, ez arra utal, hogy viszonylag keskeny (~3 μm) a detektálható átmeneti réteg. A magnéziumkoncentráció B pont utáni növekedése szerint magnézium oldódott a gömbhéjak falába,

a C és D pont között jól megfigyelhető a kölcsönösen együtt változó alumínium- és szilíciumtartalom. A SEM-BSE-fevétellel összhangban a világosabb részen az Al-tartalom megnőtt, míg a Si-tartalom lecsökkent. Az oxigéntartalom tekintetében sem a mátrixban, sem a mikrogömbhéj falában nem volt nagy ingadozás. Ez az eredmény is arra utal, hogy a világosabb fázisok a gömbhéj falában  $\text{Al}_2\text{O}_3$  részecskék,  $\text{SiO}_2$ -ba és mullit mátrixba ágyazva.

Az AlCu5 mátrix esetében (9. ábra) A és B pont között  $\text{CuAl}_2$  kiválás figyelhető meg, az átmeneti réteg ~3  $\mu\text{m}$  széles volt az SL150 és az SL300 típusú mikrogömbhéjak esetében is. A gömbhéjak falának egy részét rézkiválások fedték, melyek jól láthatók a BSE-felvételen is. A vonalmenti EDS-mérések szerint (B és C pontok között) ezek valóban kiválások, réz nem oldódott a gömbhéjak falába.

Az AlSi12 mátrix esetében a gömbhéjak külső fala látszólag sértetlen, mivel a kémiai cserereakciót a viszonylag kis infiltrálási hőmérséklet és a matrix nagy szilíciumtartalma gátolta. Az átmeneti réteg vastagsága kevesebb, mint 1,5  $\mu\text{m}$  volt mindkét mikrogömbhéjtípus esetében.

Az AlZn5 mátrix esetében (10. ábra) az átmeneti réteg vastagsága >3  $\mu\text{m}$  volt mindkét mikrogömbhéjtípus esetében. A cinkeloszlás teljesen egyenletes volt az egész mátrixban. A vonalmenti EDS-mérés szerint a gömbhéjak külső falába ~4  $\mu\text{m}$  mélyen cink oldódott be.

## Összegzés

Az előzőekben tárgyalt mérések eredményeiből a következő megállapítások tehetők:

- A gömbhéjak mikroszerkezete, térfogataránya és tulajdonságai erősen befolyásolják a szintaktikus fémhabok tulajdonságait. A mérésekből kitűnt, hogy a gömbhéjak fala  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -tűket tartalmaz, amelyek mullitba, valamint  $\text{SiO}_2$ -be vannak ágyazódva.

- Az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  egyenlőtlen eloszlása miatt a mikrogömbhéjak falában  $\text{SiO}_2$ -ben gazdag zónák keletkeztek. A szintaktikus fémhab gyártása során az olvadt alumínium kémiaiilag megtámadta ezeket a részeket, és ez a redukciós kémiai reakció a gömbhé-

jak falának jelentős károsodásához vezetett.

- Az Al99,5, AlCu5, AlMgSi1 és AlZn5 mátrixanyagok esetében intenzív reakciót tapasztaltunk, és a diffúzió irányította folyamat fő hajtóereje a gömbhéjak és a mátrix közti szilíciumkoncentráció-különbség volt. Ennek megfelelően a reakciót az AlSi12 mátrixú szintaktikus fémhabok esetében a mátrix jelentős szilíciumtartalma gátolta.

- Az AlCu5 mátrixanyag esetében helyenként rézkiválásokat találtunk a mikrogömbhéjak falán, míg az AlMgSi1 mátrixnál magnézium oldódott a mikrogömbhéjak falának külső rétegébe.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönet dr. Sajó Istvánnak az XRD-mérésekért. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását a TÁMOP-4.2.2.B-10/1-2010-0009 program támogatja. A kutatást az NKTH-OTKA PD 83687 szerződés támogatta. A kutatás és a cikk a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

## Irodalom

- [1] Babcsán, N. – Leitmeier, D. – Banhart, J.: Metal foams–High temperature colloids Part I: Ex situ analysis of metal foams. *Colloids and Surf A: Physicochem Eng* (2005) Asp 261:123-130DOI:10.1016/j.colsurfa.-2004.12.030
- [2] Babcsán, N. – García Moreno, F. – Banhart, J.: Metal foams–High temperature colloids Part II: In situ analysis of metal foams. *Colloids and Surf A: Physicochem Eng* (2007) Asp 309:254-263DOI:10.1016/j.colsurfa.2007.02.044
- [3] Orbulov, I. N. – Dobránszky, J.: Producing metal matrix syntactic foams by pressure infiltration. *Period Polytech Mech Eng.* (2008:1) 52:35-42 DOI:10.3311/pp.me.2008-1.06
- [4] Orbulov I. N. – Kientzl I. – Németh Á.: Fémhabok és kompozitok előállítása infiltrációs eljárással. *BKL Kohászat* (2007) 140/5: 41–45.

- [5] Envirospheres Ltd., <http://www.envirospheres.com/products.asp>, 09.08.2010.
- [6] Rohatgi, P. K. – Kim, J. K. – Gupta, N. – Alaraj, S. – Daoud, A.: Compressive characteristics of A356/fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration technique. (2006) *Compos Part A* 37:430–437.DOI:10.1016/j.compositesa.2005.05.047
- [7] Palmer, R. A. – Gao, K. – Doan, T. M. – Green, L. – Cavallaro, G.: Pressure infiltrated syntactic foams – Process development and mechanical properties. *Mater Sci Eng* (2007) A 464:85-92DOI:10.1016/j.msea.2007.01.116
- [8] Balch, D. K. – O'Dwyer, J. G. – Davis, G. R. – Cady, C. M. – Gray III G.T. – Dunand, D. C.: Plasticity and damage in aluminium syntactic foams deformed under dynamic and quasi-static conditions. *Mater Sci Eng* (2005) A 391:408–417. DOI:10.1016/j.msea.2004.09.012
- [9] Balch, D. K. – Dunand, D. C.: Load partitioning in aluminum syntactic foams containing ceramic microspheres. *Acta Mater* (2006)54: 1501–1511. DOI:10.1016/j.actamat.005.11.017
- [10] Ramachandra, M. – Radhakrishna, K.: Synthesis-micro-structure-mechanical properties-wear and corrosion behaviour of an Al-Si (12%)-Flyash metal matrix composite. *J Mater Sci* (2005) 40:5989-5997 doi:10.1007/s10853-005-1303-6
- [11] Bárczy, T. – Kaptay, Gy.: Modeling the infiltration of liquid metals into porous ceramics. *Mater Sci Forum* (2005) 473–474:297–302.
- [12] Trumble, P. K.: Spontaneous infiltration of non-cylindrical porosity: close-packed spheres. *Acta Mater* (1998) 46:2363–2367.
- [13] Orbulov, I. N. – Németh, Á. – Dobránszky, J.: Hardness testing of metal matrix syntactic foams. In: *Proceedings of 7th International Conference on Mechanical Engineering*, (2010) 25–26 May, Budapest, Hungary
- [14] Orbulov, I. N. – Dobránszky, J. – Németh, Á.: Microstructural characterization of syntactic foams. *J Mater Sci* (2009)44:4013-4019DOI:10.1007/s10853-009-3552-2