

BÁLINT ATTILA – MÁJLINGER KORNÉL – SZLANCSIK ATTILA

Fém gömbhéj erősítésű szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságai

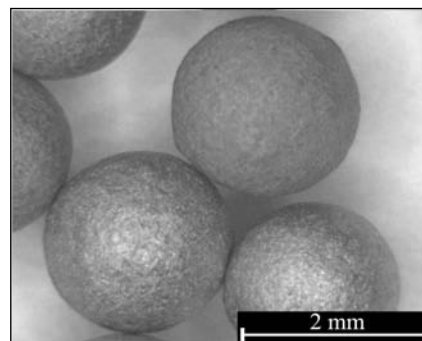
Fém gömbhéj (100% Fe) erősítésű Al99,5 (kohófém), AlSi12, AlMgSi1 és AlCu5 mátrixanyagú kompozitokat állítottunk elő kisnyomású infiltrálással, mely során a gömbhéjak térkitöltését ~ 64 tf%-on tartottuk. Az AlMgSi1 és AlCu5 mátrixú próbatestek felét oldó hőkezelés után vizsgáltuk, másik felét kiválasztásos keményítés után. Az előállított kompozitokon zömítő vizsgálatokat végeztünk a DIN 50134 szabvány szerint, három magasság-átmérő viszony mellett ($H/D=1 - 1,5 - 2$) esetenként 6-6 próbatesten.

A szerkezeti merevség, platófeszültségek, a teljes elnyelt energiaértékek mind növekedtek a nagyobb H/D viszsonnyal, az 1% alakváltozásig elnyelt energiaértékek pedig csökkentek. A fémhabjaink nyomószilárdsági értékei ~ 30–80 MPa közé estek, a legkisebb az Al99,5, a legnagyobb a kiválasztásos keményített AlCu5 mátrixú kompozitoké volt, a szerkezeti merevség értékek pedig ~ 1000–7000 MPa között változtak. A gömbhéj és mátrixanyagok közötti interfészréteg vastagsága az energiadisziperzív röntgenspektroszkópia szerint 6–12 μm vastagságú volt.

1. Bevezetés

A szintaktikus fémhabok olyan rézszeckeerősítésű fémmátrixú kompozitok, amelyekben az erősítőanyag gömbhéjak halmaza. A szintaktikus fémhabok kifejlesztésének célja olyan könnyű kompozitok létrehozása, amelyek nagy energiaelnyelő képességgel, kis önsúllyal és a „szokványos” (erősítőfázist nem tartalmazó) fémhabok között kiemelkedő fajlagos mechanikai tulajdonságokkal bírnak. Ezekkel a jellemzőikkel fontos szerepet játszhatnak a kisebb önsúly miatti kisebb energiaigényű berendezések megvalósításában is [1]. A szintaktikus fémhabok mátrixanyagaként (a fenti célok elérése érdekében) elsősorban könnyűfém ötvözeteket alkalmaznak. Az esetek többségében ez valamilyen alumíniumanyag (legelterjedtebben Al99,5 kohófém, gyártástechnológiai

szempontból vizsgálták még a Si ötvöztetésű öntészeti alumíniumötvözeteket, valamint a szilárdságnövelés érdekében a Cu-, Mg+Si-, illetve Zn-ötvözeteket is), bár előnyös tulajdonságai miatt a magnéziumötvözetek is potenciális mátrixanyagok [2, 3]. A szintaktikus fémhabok gyártására az egyszerű bekeverés [4] és gravitációs öntés [5] mellett legelterjedtebben a nyomásos infiltrálást alkalmazzák [6–12]. Ennek során általában inert gáz (Ar) nyomásával, a kisnyomású melegkamrás öntéshez hasonlóan történik meg a mátrixfém gömbhéjak közé juttatása. A technológia során az infiltrálási nyomásnak meg kell haladnia egy értéket, az úgynevezett küszöbnyomást, amit számos modellel meg lehet határozni [13–15], ez a feltétele (alsó korlátja) a sikeres kompozitgyártásnak. Az infiltrálási nyomásnak van egy felső küszöbértéke is, ami annak a nyomás-



■ 1. ábra. A vas gömbhéjakról készült sztereomikroszkópos felvétel

nak felel meg, amikor a gömbhéjak az infiltráló nyomás alatt berepednek és maguk is megtelnek az olvadt fémmel.

A gyártás mellett a szakirodalom legfőképpen az előállított kompozitok mikroszerkezeti vizsgálatával [16] és a nyomóvizsgálattal meghatározható mechanikai tulajdonságok mérésével [17] foglalkozik. Utóbbit az esetek többségében önálló gondolatmenet szerint, habár a fémhabok nyomóvizsgálatára 2008 óta már szabvány is létezik [18].

A szakirodalomban publikált esetek túlnyomó többségében az erősítőanyag valamilyen oxidkerámia. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy a kereskedelmi forgalomban fém gömbhéjak is elérhetőek [19]. Az ezekről összegyűjtött tudásanyag jóval kisebb [20–22], ezért azt a célt tűztük ki ebben a cikkünkben, hogy alumíniummátrixú, tiszta vas gömbhéj erősítéses szintaktikus fémhabokat állítsunk elő és megkapjuk az előállított kompozitok nyomóvizsgálatokkal meghatározható mechanikai tulajdonságait.

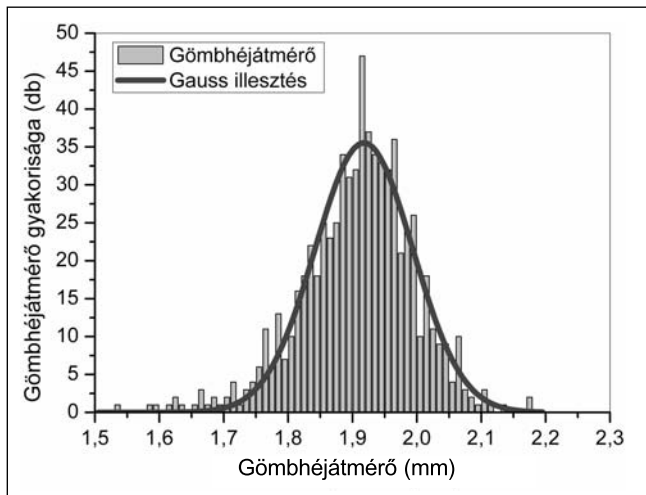
2. Alkalmazott anyagok és kísérleti módszerek

2.1. A kompozitok előállítása

Kísérleteink során kohófém tisztaságú

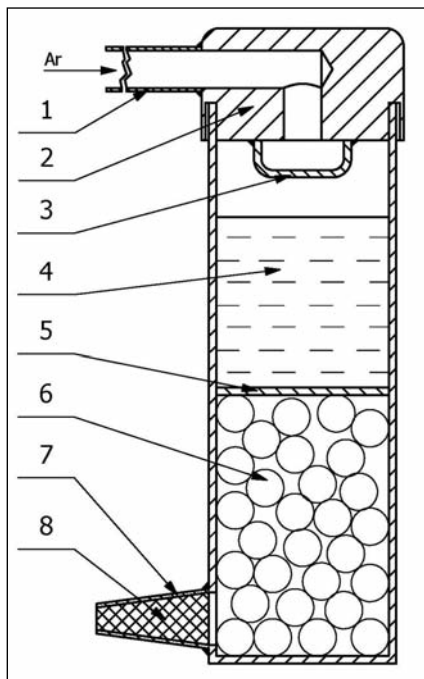
Bálint Attila és Szlancsik Attila harmadéves BSc-hallgató a BME Gépészmérnöki Karának Anyagtudomány és Technológia Tanszékén.

Májlinger Kornél okleveles gépészmérnök, nemzetközi hegesztőmérnök, a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékének adjunktusa. Öntöttvas motorblokkok futófelületének lézersugaras kezelése témaköréből szerzett PhD-fokozatot, 2010 óta kutatási területe a fémmátrixú kompozitok és hibridkompozitok fejlesztése és vizsgálatai.

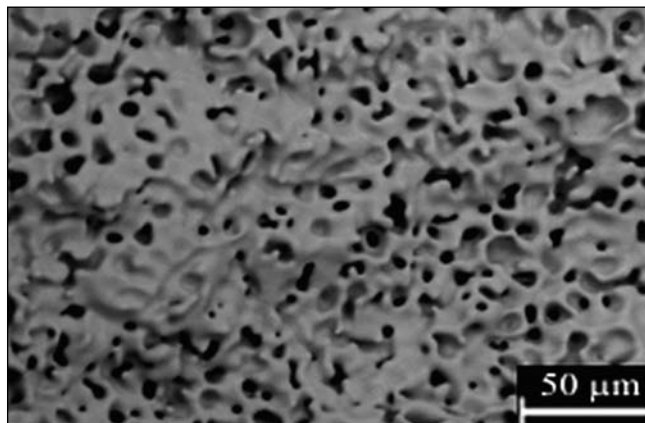


■ 2. ábra. A gömbhéját mérő értékek eloszlása és az illesztett Gauss-görbe

alumíniumot és különböző alumínium-ötvözeteket használtuk mátrixanyag-nak a fémhabjaink gyártásához (Al99,5, AISi12, AlMgSi1 és AlCu5). A kiválóan keményíthető ötvözeteket (AlMgSi1 és AlCu5) kétféle hőkezelési állapotban vizsgáltuk. Az első az ASM-ajánlás [23] szerinti oldó (O) hőkezelés, ami 1 óra hőntartás 520 °C-on, majd gyors hűtés vízben. A másik a T6 jelű kiválóan keményítő hőkezelés, amely során az oldó hőkezelést és gyors hűtést követően az ötvözetet 14 órán keresztül 170 °C-on öregítjük. Erősítőanyagként minden



■ 4. ábra. A kisnyomású infiltrálás schematikus elrendezése: 1. gázbevezetés, 2. zárófedél, 3. gázterelő lemez, 4. ömledék, 5. fémháló, 6. gömbhéjak, 7. gázvezetők, 8. Al₂O₃ paplan



■ 3. ábra. SEM-felvétel a vas gömbhéj faláról

Hollomet GmbH [19] által gyártott, Globomet márkajelzésű tiszta vas anyagú gömbhéjat használtuk.

Az erősítőanyagot részletesebben is megvizsgáltuk, mivel ez a fő teherviselő elem. A gömbhéjak átmérőjének a gyártó által megadott mérettartománya 1,4–1,8 mm. Saját vizsgálataink során 700 gömbhéj átmérőjét mértük meg sztereomikroszkóppal (1. ábra).

A mért értékeket század milliméteres átmérőtartományokra felosztva gyakoriság-eloszlás diagramot készítettünk, és erre Gauss-görbét illesztettünk (2. ábra). Így az átlagos átmérő a gyártó által megadott értékekkel ellentétben 1,9 mm-re adódott. A gömbhéjak sűrűsége $\rho = 0,4 \text{ g cm}^{-3}$ volt. A sérült gömbhéjak mennyiségét vízben való lebegtetéssel határoztuk meg, ennek értéke 16%-ra adódott. A gömbhéjak összetétele elektronsugaras mikroanalízis (EDS) alapján 100% Fe, a többi elem a detektálási határ alatt volt.

A jó minőségű kompozitok előállításához elengedhetetlen a megfelelő felületi adhézió, ezért a gömbhéjak felületét is megvizsgáltuk pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM). A SEM-felvételeken (3. ábra) jól látszik a gömbhéj falának szivacsossága, ami nagy felületének köszönhetően várhatóan jó kapcsolatot létesít a mátrixanyag és a gömbhéj között.

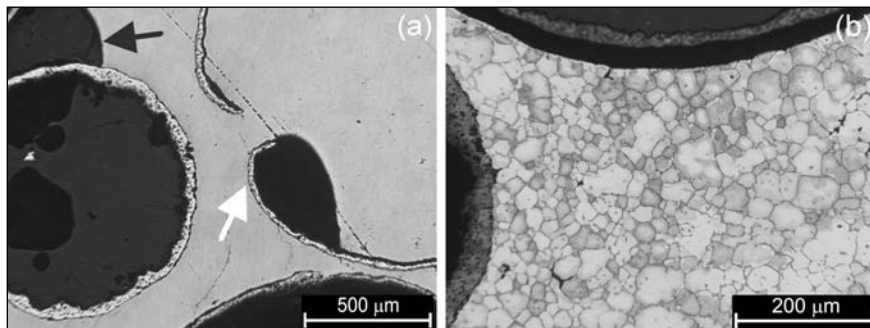
A szintaktikus fémhabokat többféle eljárással állíthatjuk elő, bekeveréses módszerrel, gravitációs öntéssel, valamint a kis- és nagynyomású infiltrálással is. Rövid vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy a kisnyomású infiltrálással lehet a legjobb minőségű Globomet gömbhéj erősítésű alumíni-

ummátrixú fémhabot előállítani. A gyártás során alkalmazott infiltráló berendezés elvi elrendezése a 4. ábrán látható. Öntőformának egy az alján behegesztett zártszelvény darabot használtunk, aminek az oldalára egy gázvezetőköt hegesztettünk, amit megtöltöttünk Al₂O₃ paplannal annak érdekében, hogy amikor ráadjuk a nyomást a rendszerre, az olvadt alumínium ne tudjon kifolyni a tégelyből. A tégely falát grafit sprayel bevontuk és a feléig megtöltöttük gömbhéjakkal, majd kézi ütögetéssel tömörítettük és a gömbhéjakat egy fémhálóra leszorítottuk. Az öntőformát kemencében előmelegítettük 315 °C-ra, majd beleöntöttük a 700 °C-os mátrixanyagot. A zárófedéllel lezártuk a tégelyt és 30 másodpercig 4 bar nyomást adtunk rá argon gázzal. Ezt követően a tégelyt kívülről vízzel hűtöttük.

A próbatetek elnevezése a következők szerint történt: mátrixanyag-erősítőanyag (hőkezelés). Például az AlCu5-GM (O) jelölés megfelel az AlCu5 mátrixanyagú, Globomet erősítőanyagú, oldó hőkezelésnek alávetett fémhabnak.

2.2. Vizsgálótechnikák

A fémhabok fontos tulajdonsága a sűrűségük, ezért elsőként ezt vizsgáltuk meg Archimédész-módszerrel a habokból készített zömítő próbatetekben, egyesével is, majd az eredményeket átlagolva. A fémhab sűrűségét számításokkal is becsültük, a jellemző 1,9 mm gömbhéját mérővel, 0,4 g cm⁻³ sűrűséggel és 64%-os térkitöltéssel számolva kaptunk egy ideális sűrűségértéket (ρ_{id}). Ezt az értéket korrigáltuk a sérült gömbhéjak infiltrálódása miatti sűrűség-növekedéssel, az így



■ 5. ábra. a) Az Al99,5-GM polírozott próbatesszt fénymikroszkópi képe, b) az AlCu5-GM (O) maratott próbatesszt fénymikroszkópi képe

1. táblázat. A próbatesszt sűrűségvizsgálatának eredményei

Kompozitok Sűrűségértékek (gcm ⁻³)	Al99,5-GM	AlSi12-GM	AlMgSi1-GM	AlCu5-GM
Ideális ($\rho_{id.}$)	1,37	1,35	1,37	1,48
Korrigált ($\rho_{kor.}$)	1,62	1,60	1,62	1,76
Mért sűrűség ($\rho_{mért}$)	1,41	1,42	1,60	1,72

2. táblázat. A gömbhéj és a mátrixanyag közötti átmeneti réteg vastagsága a különböző mátrixanyagú kompozitoknál

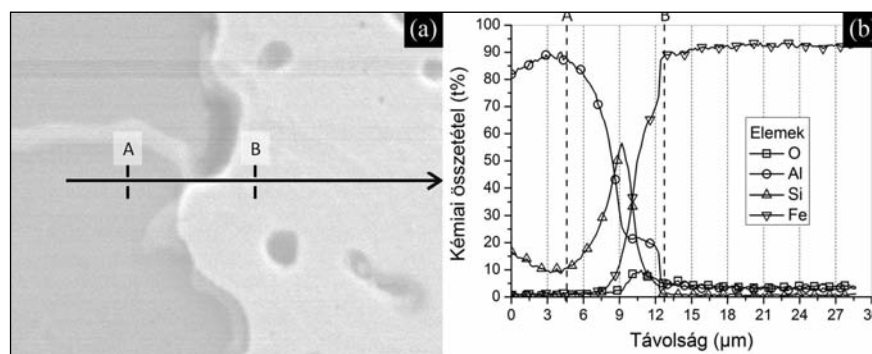
	Al99,5-GM	AlSi12-GM	AlMgSi1-GM	AlCu5-GM
Átmeneti réteg vastagsága (μm)	6–8	7–9	8–10	9–12

kapott értéket korrigált sűrűségnek ($\rho_{kor.}$) neveztük el.

Az infiltráció jóságát metallográfiai vizsgálatokkal is ellenőriztük. A legyártott minta egy jellegzetes részéből egy nagyjából 20×20×10 mm-es darabot levágtunk, és Duracryl Plus műgyantába ágyasztunk, 15 percig 2 bar nyomáson tartva. A mintákat először vizesen csiszoltuk, sorrendben P 80, 160, 320, 600, 1200 és 2500-as SiC szemcsézetű csiszolópapírokon. Ezt követte a minták polírozása először 3 μm-es majd 1 μm-es szemcsenagyságú gyémántsuszpenzióval 40 percig ill. 30 percig, végül 0,05 μm-es szemcsenagyságú γ -Al₂O₃ szuszpenzióval 20 percig.

Az ömledék állapotban lévő alumínium rendkívül reakcióképes anyag, az infiltrálás során a gömbhéj falát is képes oldani, így a két anyag között létrejön egy úgynevezett interfész réteg. A réteg vastagságát Phillips XL-30 pásztázó elektronmikroszkóppal vonal menti energiadisziperzív röntgenanalízissel (vonali EDS) vizsgáltuk meg. A vizsgálat során EDAX Genesis detektort használtunk, a gyorsítófeszültség 20 kV volt 35 μs-os detektorki olvasási és 15 s gerjesztési idő mellett.

A szintaktikus fémhabok fő igénybevétele a nyomás, ezért zömítővizsgálatokat végeztünk a mechanikai tulajdonságaik meghatározásához. A nyomóvizsgálathoz a hengeres D=14 mm átmérőjű próbatessztet a kompozit tömbökből esztérgálással munkáltuk ki, H/D=1 - 1,5 - 2 magasság/átmérő viszony mellett. Karcsúságoként 6-6 próbatessztet, tehát kompozitonként 18 darabot zömítettünk. A vizsgálatokat MTS 810 típusú hidraulikus, univerzális anyagvizsgáló gépen végeztük el. A nyomófelületeken kettős kenést (alumíniumfóliával elválasztva) alkalmaztunk Loctite Anti-size kenőanyaggal. A próbatessztet



■ 6. ábra. a) Az AlSi12-GM polírozott próbatessztének SEM-felvétele és az EDS-mérés vonala, b) a vonal menti EDS-mérés szerinti elemeloszlás. Az átmeneti réteg kezdete (A) és vége (B) szaggatott vonallal jelölve

állandó sebességgel nyomtuk, a H/D=1 próbatessztet 0,1 mms⁻¹, a H/D=1,5 próbatessztet 0,15 mms⁻¹, valamint a H/D=2 próbatessztet 0,2 mms⁻¹ sebességgel. Ezek az értékek 0,01 s⁻¹ integrálközepű alakváltozási sebességnek felelnek meg. Az anyagvizsgáló gép erő – elmozdulás értékeit regisztrált. A kapott görbékénél korrigáltuk a beállási pontatlanságot. Az erő – elmozdulás görbét karcsúságoként (6-6 darabot) Origin program segítségével átlagoltuk, majd átszámoltuk mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás görbéké. A diagramok értékelését a DIN 50134 szabvány [18] szerint végeztük.

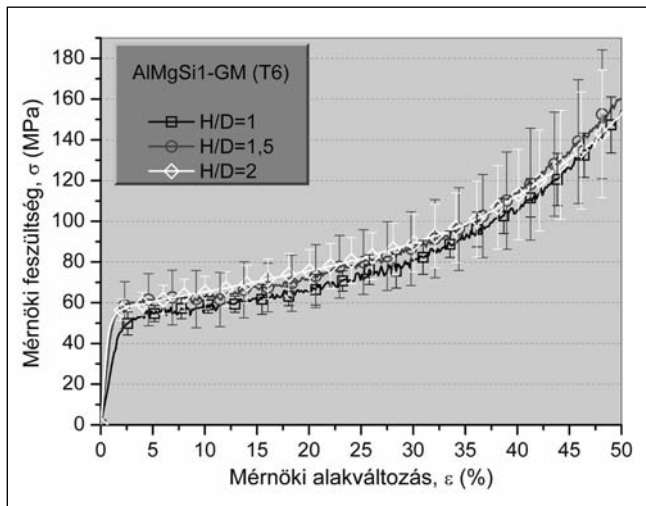
3. Eredmények és kiértékelésük

3.1. Az infiltráció jóságának vizsgálata

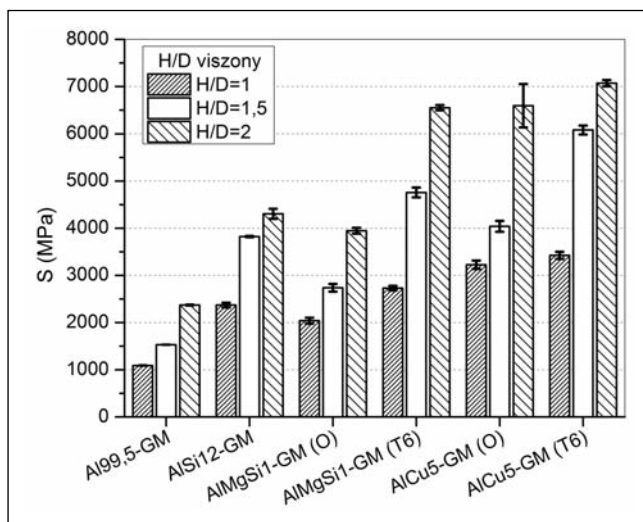
A sűrűségmérések eredményeit, a számolt és mért értékeket az 1. táblázatban foglaljuk össze. Az eredményekből látható, hogy a mért sűrűségek minden esetben a korrigált és az ideális sűrűség közé estek, de igen közel az elméleti értékhez. Ez azzal magyarázható, hogy az infiltráció nem volt teljesen tökéletes, nem kívánt porozítások miatt a sűrűség kisebb a korrigált értékeknél.

Két kompozit szerkezetét mutatja az 5. ábra. Elvértve található infiltrálási hibák a szerkezetükben, az 5a ábrán a fehér nyíl egy a sérült fal miatt infiltrálódott gömbhéjra mutat, míg a fekete nyíl a gömbhéjak közötti kis-mértékű porozításra.

Látható, hogy a gömbhéjak nem változtatták meg jelentős mértékben a szemcseszerkezetet. A mátrixanyag polygonális szemcsékből áll, de a



■ 7. ábra. Az AlMgSi1-GM (O) próbatestének átlagolt mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás görbéi három magasság/átmérő viszony mellett



■ 8. ábra. A kompozitok szerkezeti merevség értékei H/D viszonyonként

gömbhéjak falának közelében a kiválások mértéke megnőtt az erősen ötvöztött mátrixanyagok esetében. Ezek a kiválások az EDS-mérések tanúsága szerint főként szilíciumot tartalmaztak.

A vonal menti EDS-vizsgálatok során a gömbhéj belsejéből kifelé haladva, a falra merőlegesen a gömbhéj falán áthaladva, egy egyenes mentén megmértük az elemösszetételt és ábrázoltuk a távolság függvényében (6a ábra). Ezek alapján a gömbhéjakban a kemencében töltött idő alatt egy enyhe oxidációs folyamat ment végbe, ezt jelzi a fal felszínénél megnövekvő oxigén mennyisége (6b ábra). Emellett a vonal menti EDS-mérések során kapott görbéről meghatároztuk mind a négy anyagra az átmeneti réteg vastagságát (2. táblázat). Megállapítható,

hogy az átmeneti réteg vastagsága minden esetben 6–12 μm között változott.

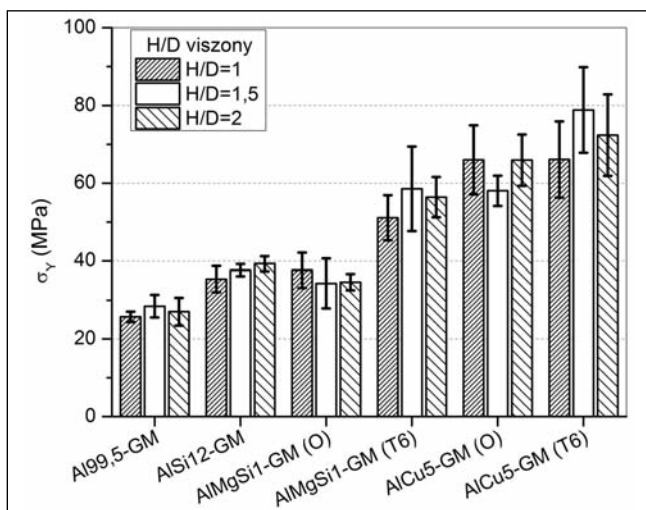
3.2. A nyomószervezeti tulajdonságok

Átlagolt nyomógörbét mutat a 7. ábra a három magasság/átmérő (H/D) viszony esetére. Jól látható, hogy a görbék kezdeti meredeksége a H/D viszony növekedésével egyre nagyobb, tehát nagyobb szerkezeti merevségre számíthatunk, valamint a H/D viszonyal nő még a platófeszültség és a teljes elnyelt energia mértéke is.

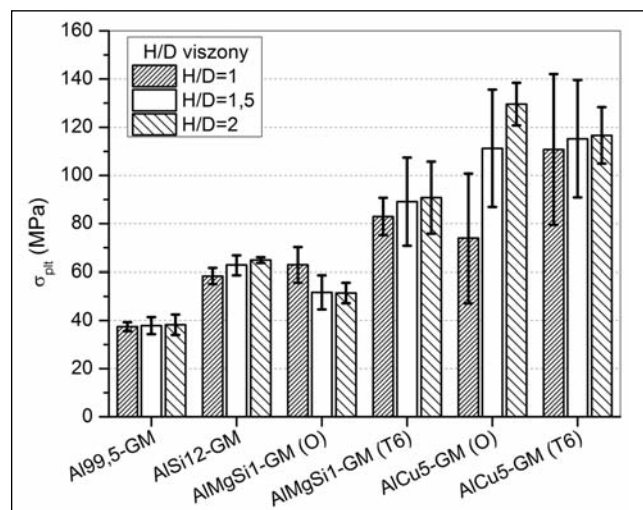
A 8. ábrán is megfigyelhető a szerkezeti merevség (S) növekedése a H/D viszony növekedésével az összes mátrixanyag esetében. Ahogy várható volt, a kiválások keményíthető ötvözeteknél az öregítő hőkezelés hatásá-

ra a merevség növekedett az oldó hőkezeltekhez képest. A többi mátrixanyag hatása is jól megfigyelhető, nagyobb szilárdságú mátrixanyag esetében nagyobb merevségi értékeket kaptunk. Az erősebben ötvöztött AlSi12-GM és AlCu5-GM (O) jelű minták oldó hőkezelt állapotban is merevebbnek bizonyultak az Al99,5 és AlMgSi1 mátrixanyagú kompozitoknál. A H/D viszony növekedésével általában a szórás nagysága is növekedett, ennek oka az, hogy a szintaktikus fémhabokban is vannak különböző infiltrálási hibák, minél nagyobb a próbatest, annál nagyobb a valószínűsége annak, hogy egy adott próbatesten több/nagyobb hiba forduljon elő.

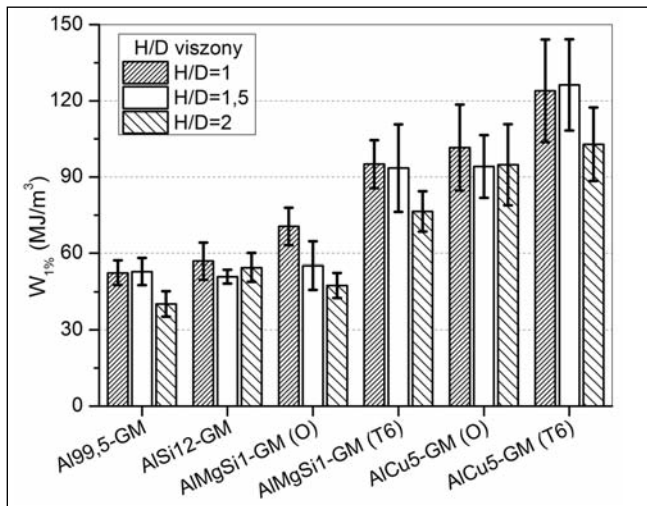
Az 1% maradó alakváltozáshoz tartozó nyomófeszültség, (σ_y) értékeit a 9. ábra szemlélteti. Ebben az eset-



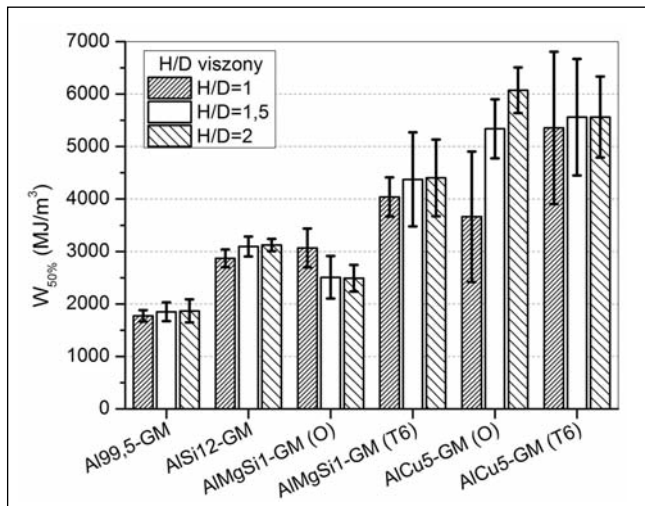
■ 9. ábra. Az 1% maradó alakváltozáshoz tartozó nyomófeszültség H/D viszonyonként



■ 10. ábra. A kompozitok platófeszültség értékei H/D viszonyonként



■ 11. ábra. A kompozitok 1% maradó alakváltozásához tartozó munkaértékek H/D viszonyonként



■ 12. ábra. A kompozitok 50% maradó alakváltozásához tartozó munkaértékek H/D viszonyonként

ben nem volt egyértelmű az értékek H/D viszonytól való függése, a szilárdságok minden esetben szóráson belül változtak. A kiválasztott keményített minták ebben az esetben is magasabb értékeket adtak, mint az oldott minták, hozzávetőlegesen 30%-kal, ez jelentős szilárdságnövekedésnek mondható.

A platófeszültség értéke (σ_{plt}) (10. ábra) a H/D viszony növelésével növekszik, az AlMgSi1-GM (O) minta kivételével. A mátrixanyag szilárdsága a σ_{plt} -re, és a σ_f -ra is hatással van, a nagyobb szilárdságú mátrixanyag esetében nagyobb értékeket kaptunk. Az eltérések jelentősek lehetnek, a technikai tisztaságú Al99,5 mátrixhoz képest akár háromszoros növekedés érhető el AlCu5 mátrixanyag alkalmazásával. A vártak megfelelően az öregített minták nagyobb feszültségértékeket mutattak ebben az esetben is, mint az oldó hőkezelték.

Az 1% maradó alakváltozásig elnyelt energia, ($W_{1\%}$) a H/D viszonyal fordítottan arányos, az értékek enyhén csökkenő tendenciát követtek (11. ábra). Ennek oka a már említett jelenséggel – nagyobb térfogatban nagyobb a hibalehetőség – magyarázható, bár megjegyezzük, hogy az energiaértékek lényegében a szórási sávon belül maradtak. Ez az érték egy határ arra vonatkozólag, hogy olyan energiaelnyelő alkalmazásokban, amelyek során mechanikai terhelés éri a darabot, de a képlékeny alakváltozás nem megengedett, mekkora az a maximális megengedett energiamennyiség, amelyet még törések, vagy jelentős képlékeny alakváltozás nélkül el tud viselni az anyag.

Az 50% maradó alakváltozásig elnyelt energia, ($W_{50\%}$), ezzel ellentétesen, egyenesen arányos a karcsúsággal (12. ábra). A különböző szilárdságú mátrixanyagok esetében az értékek között akár 2-2,5-szeres különbség is megjelent.

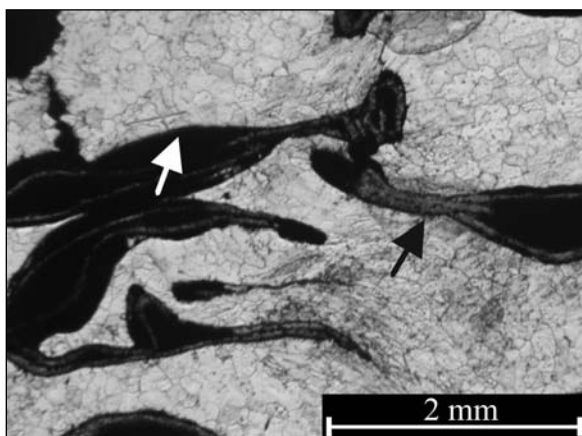
Általánosan elmondható, hogy a kerámia gömbhéjas fémhabok nyomóvizsgálati görbéhez képest a vas gömbhéjjal erősítették (ld.: 7. ábra) eltérő alakú, a görbéken nem látható kezdeti feszültségcsúcs, vagyis nincsen kifejezett nyomószilárdságuk, a görbe folyamatosan lép át a platós szakaszba. Ez a fém

gömbhéjak magasabb alakváltozási képességéből adódik, szemben a kerámia gömbhéjak rideg viselkedésével. Emellett az is megmutatkozott, hogy a zömítés során a fém gömbhéjjal erősített fémhabok tönkremeneteli módja eltér a kerámia gömbhéj erősítésű fémhabokra jellemző hasadásos jelleget mutató tönkremeneteltől, minden esetben képlékeny alakváltozás és hordós zömülés figyelhető meg. Ezt támasztják alá a zömített próbatesten végzett metallográfiai vizsgálatok is. A zömített minták csiszolati képeiből (13. ábra) is arra lehet következtetni, hogy a próbatestben a zömítés során képlékeny stabilitásvesztés lépett fel, a gömbhéjak a nyomás hatására összeroppantak (pl. fekete nyíl), a mátrixanyag pedig képlékenyen alakváltozva próbálta követni a gömbhéjak alakváltozását (pl. fehér nyíl).

4. Összefoglalás

Mérési eredményeinkre alapozva az alábbi összefoglaló megállapításokat tehetjük:

- A kisnyomású infiltráció alkalmas reprodukálható módon, jó minőségű (kis mátrixporozitású), alumínium és különböző alumíniumötvözet (Al99,5 (kohófém), AlSi12, AlMgSi1, AlCu5) mátrixú, vas gömbhéjjakkal erősített szintaktikus fémhabok előállítására. Az átlagos mért sűrűségek a korrigáltakhoz képest kis eltérést mutattak. A mátrixanyag és a gömbhéj közötti kapcsolat megfelelő, ezt egy anyagonként eltérő vastagságú átmeneti réteg (6-12 μ m) biztosítja.



■ 13. ábra. Az AlCu5-GM (O) zömített próbatest maradt mintájának fénymikroszkópi képe

- A kvázistatikus nyomóvizsgálatok alapján kijelenthető, hogy a szerkezeti merevség egyenesen arányos a karcsúsággal, a platófeszültség és az 1%-os maradó alakváltozáshoz tartozó nyomószilárdság független a magasság/átmérő viszonytól. Az 1%-os maradó alakváltozásig elnyelt energia fordítottan, az 50%-os maradó alakváltozásig elnyelt energia egyenesen arányos a karcsúsággal. A kísérletekkel igazoltuk azt a feltételezést, hogy a kiválóan keményített minták nagyobb szilárdságúak, mint az oldó hőkezelésen átesettek.
- Az általunk előállított szintaktikus fémhabok szerkezeti merevsége ~1000–7000 MPa közé esett.
- Az 1%-os maradó alakváltozáshoz tartozó nyomófeszültségi értékek ~25–80 MPa között változtak.
- A platófeszültség ~35–130 MPa közötti értékeket vett fel.
- 1%-os maradó alakváltozásig ~40–125 MJm⁻³ energiát nyeltek el, míg 50%-os maradó alakváltozásig ~1750–6050 MJm⁻³-t.
- Fémhabjaink nyomószilárdsági értékei ~30–80 MPa közé estek. A szakirodalomban található fémhabokkal összevetve az általunk gyártottakról elmondható, hogy tulajdonságaikat és minőségüket tekintve jól illeszkednek a más kutatócsoportok által előállított szintaktikus fémhabok csoportjába.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Irodalom

- [1] Dévényi L. – Orbulov I. N.: (2010) A fémhabok szerepe a fenntartható fejlődésben. ISD Dunaferri Műszaki Gazdasági

Közlemények 158(2):71–77.

- [2] Dobránszky J. – Bernáth A. – Orbulov I. N.: (2005) Magnezium: a fém, mely nagyon könnyű, de fontosnak találtatott (1. rész). BKL Kohászat 138: 35–40.
- [3] Dobránszky J. – Bernáth A. – Orbulov I. N.: (2005) Magnezium: a fém, mely nagyon könnyű, de fontosnak találtatott (2. rész). BKL Kohászat 138: 33–40.
- [4] Mondal D. P. – Das S. et al.: (2009) Cenosphere filled aluminum syntactic foam made through stir-casting technique. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 40(3): 279–288.
- [5] Daoud A.: (2008) Synthesis and characterization of novel ZnAl₂₂ syntactic foam composites via casting. Materials Science and Engineering: A 488(1–2): 281–295.
- [6] Tao X. F. – Zhang L. P. et al.: (2009) Al matrix syntactic foam fabricated with bimodal ceramic microspheres. Materials & Design 30(7): 2732–2736.
- [7] Rohatgi P. K. – Kim J. K. – Gupta N. – Alaraj S. – Daoud A.: (2006) Compressive characteristics of A356/fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration technique. Composites Part A 37: 430–437.
- [8] Palmer R. A. – Gao K. – Doan T. M. – Green L. – Cavallaro G.: (2007) Pressure infiltrated syntactic foams – Process development and mechanical properties. Mater Sci Eng A 464: 85–92.
- [9] Németh Á. – Orbulov I. N.: (2006) Fémhabok, porózus fémanyagok előállítása és tulajdonságai. Anyagvizsgálók Lapja 16(2):58–66.
- [10] Orbulov I. N. – Kientzl I. – Németh Á.: (2007) Fémhabok és kompozitok előállítása nyomásos infiltrációs eljárással. BKL Kohászat 140(5):41–46.
- [11] Kientzl I. – Orbulov I. N.: (2007) Fémmátrixú kompozithuzalok, dupla kompozitok és kompozitbővítők tulajdonságai. Anyagok

Világa 7(1):1–9.

- [12] Kun P. – Orbulov I. N.: (2011) AlCu₅ és AlMgSi₁ mátrixú szintaktikus fémhabok előállítása és vizsgálata. BKL Kohászat 144(3):51–55.
- [13] Kaptay G. – Kelemen K. K.: On the Drag Force Acting on Ceramic Particles during Processing of Cast MMCs – in: „State of the Art in Cast MMCs”, szerk. Rohatgi P.K. TMS, 2000; 45–60.
- [14] Bárczy P. – Kaptay Gy.: (2005) Modeling the infiltration of liquid metals into porous ceramics. Mater Sci Forum 473–474: 297–302.
- [15] Trumble P. K.: (1998) Spontaneous infiltration of non-cylindrical porosity: close-packed spheres. Acta Mater 46: 2363–2367.
- [16] Orbulov I. N.: (2011) Szintaktikus fémhabok mikroszerkezeti vizsgálata. Gép 61(11):4–8.
- [17] Orbulov I. N.: (2009) Szintaktikus fémhabok keménységmérése. Anyagvizsgálók Lapja 53(2):93–99.
- [18] DIN 50134 (2008) Testing of metallic materials – Compression test of metallic cellular materials
- [19] <http://hollomet.com/en/home.html> – utoljára letöltve 2013.10.10.
- [20] Vendra L. J. – Rabiei A.: (2007) A study on aluminum–steel composite metal foam processed by casting. Materials Science and Engineering A 465:59–67.
- [21] Rabiei A. – García-Avila M.: (2013) Effect of various parameters on properties of composite steel foams under variety of loading rates. Materials Science and Engineering A 564:539–547.
- [22] Rabiei A. – Vendra L. J.: (2009) A comparison of composite metal foam's properties and other comparable metal foams. Materials Letters 63:533–536.
- [23] ASM Handbook, Properties and Selection: Nonferrous alloys and special purpose materials. Vol. 2, 2nd printing. ASM International (1995) p. 54.