



# **Alumínium és alumínium ötvözet mátrixú szintaktikus fémhabok gyártása és mechanikai tulajdonságai**

Tézisfüzet

Írta

**Orbulov Imre Norbert**

PhD, okleveles gépészmérnök

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Gépészmérnöki Kar  
Anyagtudomány és Technológia Tanszék  
MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport



**Budapest  
2017**

## 1 Bevezetés

A szintaktikus fémhabok (metal matrix syntactic foams) részecskeerősítésű társított anyagok, idegen szóval kompozitok, vagy kompozit-fémhabok (composite metal foams). Nevükben a „szintaktikus” kifejezés a görög „συντακτικός” szóból ered, amelynek jelentése szabad fordításban: „összerendezett” és arra utal, hogy az anyagban az erősítő- vagy töltőanyag részecskéi egymáshoz képest többé-kevésbé rendezett (például sűrű illeszkedésű) módon helyezkednek el. A szintaktikus fémhabok a részecskeerősítésű kompozitok és a fémhabok csoportjába is besorolhatók, így az Ashby-féle anyagcsoportosításban [1] a hibridek osztályában helyezkednek el. A szintaktikus fémhabok összetevőiket tekintve mátrixanyagból (a legtöbbször Al ötvözet, de elméletileg bármilyen más fém alkalmazható) és erősítőanyagból (üveg, kerámia vagy fém gömbhéjak [2-4]) állnak, amelyek között a terhelésátadásért felelős átmeneti réteg teremt kapcsolatot. A szintaktikus fémhabok legmeghatározóbb igénybevétele a nyomás, a fémhabokhoz kapcsolódó vizsgálatok közül jelen pillanatban egyedül ez a szabványosított [5, 6]. A fajlagos nyomószilárdság az alumínium mátrixú szintaktikus fémhaboknál (az azonos porozitású) „hagyományos” fémhabokhoz képest 5-10-szeres, míg az adott összehasonlító alakváltozásig elnyelt mechanikai munka 2-5-szörös értéket is elérhet. Külön hangsúlyozandó, hogy a szintaktikus fémhabok jellemző mechanikai tulajdonságai az összetevők változtatásával, utólagos kezelésekként széles határok között változtathatók és adott alkalmazási célra optimálhatók („tailoring”).

A szintaktikus fémhabok felhasználási területei jelenleg még viszonylag kiforratlanok. A közlekedéstechnikában elsősorban személygépjárművekben (jellemzően felsőkategóriás- és luxusautókban) merevítő és energiaelnyelő elemekként, tehergépjárművekben merevségnövelési céllal (például rakodókarok), és a környezetet terhelő zajt csökkentő árnyékoló falakként jelennek meg. Zártszelvényből készülő teherviselő szerkezetekben, szendvicsszerkezetekben a fémhab növeli az elemek mechanikai stabilitását. A hadiiparban réteges szerkezetekben, védelmi céllal jelennek meg, elsősorban járműveken, de stratégiai fontosságú építmények falazatában is alkalmazzák őket. Fontos felhasználási területek lehetnek még az öntéssel készülő, kis- és közepes mechanikai terhelésnek kitett különböző gépházak, burkolatok. A fémhabok, szintaktikus fémhabok elterjedőben vannak az építéstechnikában is: könnyűszerkezetes építmények padlólemezeiként, álmennyezetekként, kültéri burkolóelemekként, lépcsőkként, tűzálló szakaszoló ajtókként, felvonó rendszerek elemeiként alkalmazzák őket [7].

A világban több helyen foglalkoznak hagyományos fémhabok kutatásával és nagy volumenű gyártásával is. Hazánkban az első fémhabokat az 1980-as évek végén az Aluterv FKI-ban állították elő. Nemrégiben pedig hazánkban is megkezdte működését egy fémhabgyártó üzem (Aluinvent ZRt., Felsőzsolca [8]). Ezenkívül Magyarország több felsőoktatási intézményében foglalkoznak hagyományos fémhabokkal kutatási és fejlesztési tevékenységük részeként: például a Miskolci Egyetemen (fémhabok fejlesztése), a Széchenyi István Egyetemen (röntgentomográfia, digitális rekonstrukció), a Debreceni Egyetemen (végelelemes analízis) és az Eötvös Lóránd Tudományegyetemen (akusztikus emisszió). Kifejezetten szintaktikus fémhabokkal a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karának

Anyagtudomány és Technológia Tanszékén jelen doktori mű szerzője és kollégái, hallgatói foglalkoznak a fent felsorolt és külhoni intézményekkel, partnerekkel együttműködve. A kutatómunka 2003-ban indult meg, majd 2005-ben gyorsult fel prof. Blücher József kollégánk nagylelkű laborberendezés adományával. A munkát támogatta egy GVOP pályázat (amely létrehozta a Tanszék kompozitlaborját a 2005. augusztus 25-i ünnepélyes átadással), több OTKA (A, CK, PD) pályázat, két Bolyai János Kutatási Ösztöndíj és a Junior Prima Díj magyar tudomány kategóriájának elnyerése. Nagy támogatást jelentett az MTA–BME Fémtechnológiai Kutatócsoport, és az MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport.

Jelen téziszüzethez tartozó doktori mű bemutatja, rendszerezi és összefoglalja a szintaktikus fémhabok fejlesztésének területén a PhD fokozat megszerzése (2009. november 12.) óta végzett kutatási munka eredményeit a gyártási sajátosságoktól kezdve a szintaktikus fémhabok elterjedését segítő mérőszámok, mutatók meghatározásáig. A kutatómunka eredményeinek összefoglalását tekintve az értekezés öt fő tartalmi részre tagolható. Az első fő rész a szintaktikus fémhabok gyártási lehetőségeivel és annak nehézségeivel foglalkozik. Az elemzés a gáznyomásos infiltráció, mint automatizálható, egyenletes minőséget biztosító, fizikai alapjait tekintve a kisnyomású meleg kamrás nyomásos öntéssel azonos és szériagyártásba emelhető módszerét emeli ki, különös tekintettel az adott paraméterekkel gyártható darabok méreteire, illetve megfordítva: egy adott próbatest gyártásához szükséges infiltrálási paraméterek meghatározására. A fejezet eredményei ezzel kiindulópontot adnak a szintaktikus fémhabok sorozatgyártásának tervezéséhez. A második fő rész a szintaktikus fémhabok kvázi-statisztikus körülmények közötti szabadzömítésével (sík lapok közötti zömítésével) foglalkozik. Az ismertetett szilárdsági, alakváltozási, merevségi és energiaelnyelési eredmények alapot adnak a szintaktikus fémhabok tervezéséhez. A mérések során számos változó (kémiai összetétel, gömbhéjtípus stb.) hatását nyomon követtük. Elemeztük a nyomóvizsgálati görbék leírásának matematikai lehetőségeit, illetve több megoldást ismertetek az effektív rugalmassági modulusz (a szintaktikus fémhabot homogén, izotróp anyagként helyettesítő képzeletbeli test rugalmassági modulusza) meghatározására. Külön alfejezet foglalkozik az úgynevezett hibrid szintaktikus fémhabok tulajdonságaival. A fejezet végén egy szintaktikus fémhab alapú hibrid kompozitot is bemutatok, mint alkalmazási példát. A harmadik fő rész a szabadzömítés módszerét megtartva vizsgálja az alakváltozási sebesség hatását. A mérések során ugyanazoknak a változóknak (összetétel, gömbhéjtípus stb.) a hatását követtük nyomon, mint a kvázi-statisztikus vizsgálatok során. A nagy alakváltozási sebességeket split-Hopkinson berendezés segítségével biztosítottuk. A negyedik fő rész a kvázi-statisztikus állapotbeli, de radiális irányban gátolt alakváltozású zömítést elemzi, szintén az eddig említett vizsgálati változók függvényében. A radiális irányban gátolt alakváltozás nagymértékben megnöveli a szintaktikus fémhabok energiaelnyelő képességét, mivel a darabot teljes térfogatában alakváltozásra kényszeríti, szemben a szabad zömítéssel, amikor érvényesül a fémhabok sérüléslokalizáló képessége. Végezetül az ötödik fő rész a szintaktikus fémhabok ismétlődő (lökötető), nyomó igénybevétel hatására mutatott viselkedését vizsgálja ugyancsak az összetétel és a gömbhéjak jellemzőinek, mint fő vizsgálati változóknak a függvényében.

## 2 Célkitűzés

Értekezésem célja a szintaktikus fémhaboknak, mint új, a kereskedelmi forgalomban még nem kapható anyagtípusnak az átfogó vizsgálata. Mivel egy ilyen jellegű vizsgálatsorozat a variációk, vizsgálati változók számosságából adódóan sohasem lehet egészen teljes, a szintaktikus fémhabok előállításával kapcsolatban az értekezésemben célul tűzöm ki:

- a szintaktikus fémhabok előállítási lehetőségeinek tanulmányozását különös tekintettel a nyomásos infiltrációra és a kis infiltrációs idő ( $t < 10s$ ) tartományára.

A szintaktikus fémhabok előállításán túllépve célul tűzöm ki a karakterisztikus mechanikai tulajdonságok mérését, meghatározását, különös tekintettel:

- a szintaktikus fémhabok effektív rugalmassági modulusának meghatározási lehetőségeinek elemzésére;
- a kvázi-statisztikus körülmények között végzett nyomóvizsgálatokból meghatározható karakterisztikus tulajdonságokra a hibrid szintaktikus fémhabokra vonatkozóan is;
- a nagy alakváltozási sebességgel végzett nyomóvizsgálatokból meghatározható mechanikai tulajdonságokra;
- a gátolt alakváltozási körülmények között végzett nyomóvizsgálatok kiértékeléséből meghatározható mechanikai tulajdonságokra és
- az ismétlődő, ciklikusan jelentkező nyomóigénybevétel hatására mutatott viselkedésre és mechanikai tulajdonságokra.

A karakterisztikus mechanikai tulajdonságokkal foglalkozó fejezetek kiegészülnek az adott igénybevételre jellemző tönkremeneteli módok elemzésével is. A fenti felsorolásokban szereplő pontokhoz kapcsolódóan fogalmazom meg az új tudományos eredményeket összefoglaló tézispontokat. Ezen túlmenően célul tűzöm ki a kvázi-statisztikus nyomóvizsgálat során rögzített feszültség – alakváltozási görbék matematikai leírását is.

Hangsúlyozom, hogy az értekezésben összefoglalt eredmények mind egy, azonos technológiával (nyomásos infiltrálás) előállított szintaktikus fémhabokra vonatkoznak és így teljeskörű képet adnak ennek az anyagfajtának a jellemző tulajdonságairól, ellentétben az egyes szakirodalmi forrásokban külön-külön szereplő adatokkal, amelyek egy-egy, általában különböző technológiával előállított anyagféleség egy-egy kiragadott tulajdonságát taglalják.

## 3 Felhasznált és előállított anyagok, kísérleti módszerek

A vizsgált szintaktikus fémhabok előállításához összesen négyféle mátrixanyag és háromféle gömbhéj kombinációját alkalmaztuk, a hibrid kompozitokban  $Al_2O_3$  szálakat tartalmazó kompozithuzalokkal [9] is kiegészítve. Mátrixanyagként Al99,5, AlSi12, AlMgSi1 és AlCu5 ötvözeteket használtunk fel, ezek fő összetevőit és tulajdonságait a 3.1. táblázat foglalja össze. A szintaktikus fémhabokba három különböző típusú gömbhéjat, vagy azok kombinációját építettük be. A kerámia gömbhéjak az Envirospheres Ltd-től [2] (SL300 típus, jelölése SL) és a Hollomet GmbH-től [3] (Globocer típus, jelölése GC) származtak. A harmadik gömbhéjtípus a Hollomet GmbH-től származó vas gömbhéjak csoportja (Globomet típus, jelölése GM), a gyártó kerámia gömbhéjaihoz hasonlatos mérettel. A gömbhéjak összetételét és főbb tulajdonságait a 3.2. táblázat foglalja össze. Az adatok saját méréseken alapulnak.

3.1. táblázat A mátrixanyagok átlagos kémiai összetétele és fő tulajdonságai

| Mátrix  | ASM ekvivalens | Összetétel (t%) |      |     |     |     |       | $R_m$<br>(MPa) | $T_{olv}$<br>(°C) |
|---------|----------------|-----------------|------|-----|-----|-----|-------|----------------|-------------------|
|         |                | Al              | Si   | Fe  | Mg  | Cu  | egyéb |                |                   |
| Al99,5  | Al1050         | 99,5            | 0,1  | 0,1 | -   | -   | 0,3   | 75             | 660               |
| AlSi12  | A413.0         | 86,0            | 12,8 | 0,1 | 0,1 | -   | 1,0   | 115            | 575               |
| AlMgSi1 | Al6082         | 97,0            | 1,1  | 0,5 | 1,1 | -   | 0,3   | 125            | 650               |
| AlCu5   | Al2011         | 95,0            | -    | -   | -   | 4,5 | 0,5   | 190            | 630               |

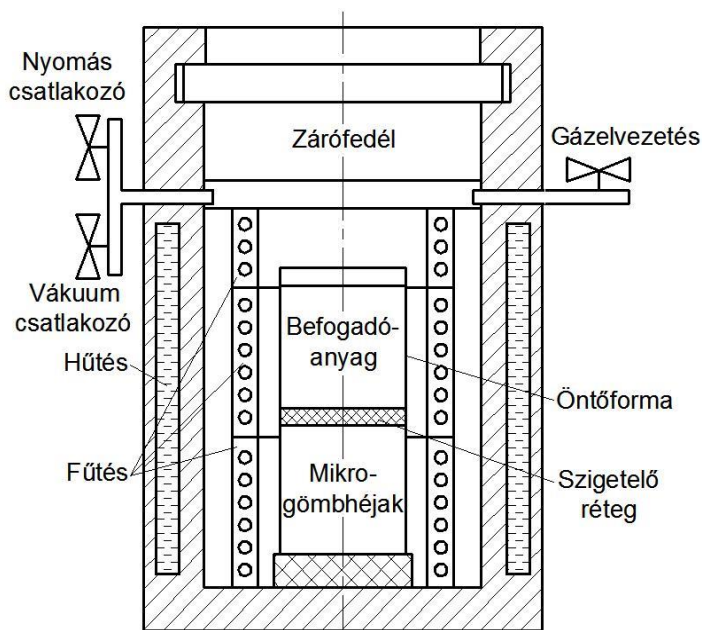
3.2. táblázat A gömbhéjak jellemző kémiai összetétele és fő tulajdonságai

| Típus | Összetétel (t%) |         |                         |     | $\varnothing D$<br>( $\mu m$ ) | $t$<br>( $\mu m$ ) | $\rho$<br>( $gcm^{-3}$ ) |
|-------|-----------------|---------|-------------------------|-----|--------------------------------|--------------------|--------------------------|
|       | $Al_2O_3$       | $SiO_2$ | $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ | Fe  |                                |                    |                          |
| SL    | 35,0            | 45,0    | 20,0                    | -   | $150 \pm 4,1$                  | $6,75 \pm 0,2$     | 0,691                    |
| GC    | 33,0            | 48,0    | 19,0                    | -   | $1425 \pm 42$                  | $60 \pm 1,7$       | 0,816                    |
| GM    | -               | -       | -                       | 100 | $1413 \pm 22$                  | $23 \pm 0,6$       | 0,704                    |

A szintaktikus fémhabok előállításához alkalmazott gyártási módszer a Blücher-féle nyomásos infiltrálás volt, amelyet egy vákuum és túlnyomás alá helyezhető kemencében hajtottunk végre. A kemence felépítését mutatja a 3.1. és 3.2. ábra.



3.1. ábra Infiltráló kemence



3.2. ábra Az infiltráló kemence vázlata

A gömbhéjakat egy öntőformába töltöttük, a formát félmagasságig feltöltöttük a gömbhéjakkal, majd ütögetéssel tömörítettük. Így úgynevezett véletlenszerű legsűrűbb illeszkedésű elrendezést (Random Close Pack, RCP) lehet elérni, amelynek térkitöltését ~65 tf%-ban határozták meg [10, 11]. A mintákat rövid ideig (30 s) nyomás alatt tartottuk, majd az infiltrálási nyomás megszüntetése után a kemencét kinyitva, abból kiemelve hűtöttük azokat. Az eljárás végeztével a hegesztett formát és a feleslegessé vált mátrixanyag réteget (a szigetelőpaplan alatt közvetlenül) levágtuk és eltávolítottuk. Így a felhasználásra kész szintaktikus fémhabtömb készen állt a további megmunkálásra. Az előállított fémhabok

összetételüknek megfelelő azonosítót kaptak, például: Al99,5-SL jelöli az Al99,5 mátrixú, ~65 tf% SL300 típusú gömbhéjakkal előállított kompozitokat. Hasonlóan, az AlSi12-20GC-80GM jelölés azonosítja a ~65 tf% gömbhéjat tartalmazó hibrid kompozitot, amelyben a teljes gömbhéj tartalom 20 tf%-a GC, 80 tf%-a GM típusú gömbhéj. Az előállított kompozitokból a makro- és mikroszkópi vizsgálatokhoz reprezentatív adatok szolgáltatására alkalmas méretű hasábokat, a nyomóvizsgálatokhoz hengeres próbatesteket munkáltunk ki. A megmunkálás után az előállított fémhabok oldó hőkezelést, az AlMgSi1 és AlCu5 mátrixanyagú kompozitok T6 hőkezelést is kaptak. Az alkalmazott hőkezelések paramétereit a 3.3. táblázat foglalja össze, a paraméterek az adott ötvözetek összetételének megfelelő ASM ajánlásokat tükrözik [12]. A próbatestek vizsgálatára közvetlenül a hőkezelések végeztével került sor.

3.3. táblázat Hőkezelési paraméterek

| Mátrix  | Oldó hőkezelés |       | Hűtőközeg | T6 hőkezelés |       |
|---------|----------------|-------|-----------|--------------|-------|
|         | T (°C)         | t (h) |           | T (°C)       | t (h) |
| Al99,5  | 500            | 1     | víz       | -            | -     |
| AlSi12  | 500            | 1     | víz       | -            | -     |
| AlMgSi1 | 500            | 1     | víz       | 170          | 14    |
| AlCu5   | 500            | 1     | víz       | 170          | 14    |

A kompozitokról készült fénymikroszkópi felvételeket kisebb nagyításokban Olympus SZX16, nagyobb nagyításokban Olympus PMG3 típusú mikroszkóppal készítettük. Az elektronmikroszkópos felvételek Phillips XL-30 típusú elektronmikroszkópon készültek, amelyhez az energiadiszperzív röntgen spektroszkópiás (EDS) mérések elvégzéséhez EDAX Genesis berendezés csatlakozott.

A nyomóvizsgálatokat (sík lapok közötti szabad zömítés) egy MTS 810 típusú univerzális, hidraulikus anyagvizsgálógépen végeztük el, kétoszlopos zömítőszerszámban. A köszörült nyomólapokat és a próbatesteket Molydal NB 1200 típusú kenőanyaggal kentük. A reprezentatív eredmények érdekében minden mérést legalább hat próbatesten ismételtünk meg. A mérési eredményekből átlagokat és tapasztalati szórásokat képeztünk. A szerkezeti merevség mérésekor 25 mm jeltávú, tapintó finomnyúlásmérőt alkalmaztunk, amelyet a zömítőszerszám merevnek tekinthető nyomólapjaira rögzítettünk fel. A méréseket 50%-os mérnöki alakváltozásig végeztük  $0,01\text{ s}^{-1}$  integrálközepű alakváltozási sebesség mellett. A nyomóvizsgálatok a vonatkozó szabványok [5, 6] alapján értékeltük ki. Síklapok közötti, kvázi-statisztikus nyomóvizsgálatokat végeztünk akusztikus emissziós méréssel kiegészítve is, a vizsgálatok során terhelőeszközként egy Instron 5882 típusú univerzális anyagvizsgálógépet alkalmaztunk  $0,03\text{ mms}^{-1}$  keresztfejsebességgel. Az akusztikus emisszió jeleit egy 10 mm átmérőjű, Micro30S típusú mikrofon szolgáltatatta. A mikrofont gumiszalaggal és szilikonszírral rögzítettük a próbatest felületén. A jelet egy 2/4/6 típusú előerősítő erősítette (40 dB) és egy Micro-II adatgyűjtő berendezés rögzítette. A próbatestek négyzetes keresztmetszetű (14×14 mm), 30 mm magas hasábok voltak [13].

Az effektív rugalmassági modulusz méréséhez a modális analízis módszerét is alkalmaztuk, aminek során mérni kell a próbatest sajátfrekvenciáját. A sajátfrekvencia méréséhez szükség

volt egy modális kalapácsra (Brüel & Kjaer type 8203), egy érzékeny mikrofonra (Brüel & Kjaer type 4189), egy alkalmas adatgyűjtőre (Brüel & Kjaer type 3050-B-060) és nem utolsósorban egy olyan szoftverre (Brüel & Kjaer Pulse Labshop), amivel a kalapácsból, és a mikrofonból érkező jeleket időben összehangoltan lehet rögzíteni, alkalmas az átviteli függvény kiértékelésére és így a modális paraméterek meghatározására. A próbatestek 170×25×15 mm méretű rudak voltak, a kiértékeléshez a Timoshenko-féle rúdelméletet alkalmaztuk.

A nagy alakváltozási sebességű méréseket split-Hopkinson módszerrel hajtottuk végre. Az átvivő és továbbító rúd is C350 jelű nagyszilárdságú acélból készült. A rudak hossza és átmérője rendre 1,8 m és Ø19,05 mm volt. A létrejövő feszültség hullámok felerősített jeleit egy PicoScope oszcilloszkóp gyűjtötte össze. A 72,2 mm hosszúságú ütőrudat (strike bar) egy nyomáskamrából lehet működtetni, amelyben 138 vagy 552 kPa nyomás volt beállítható. Az adott nyomásokkal működtetett ütőrúd a minta 933, illetve 2629 s<sup>-1</sup>-os alakváltozási sebességű zömítését eredményezte. A próbatestek hengeresek voltak és a mérőberendezés specifikációinak megfelelően Ø12,7 mm-es átmérővel és magassággal (H/D=1) készültek.

A szabad zömítés mellett a szintaktikus fémhabokat radiálisan gátolt alakváltozási állapotban is vizsgáltuk, a nyomóvizsgálatok célszerű kiegészítésével, amely egy, a próbatestek külső átmérőjének megfelelő méretű polírozott furatú szerszámot jelent. A vizsgálatokat 15 mm magas, Ø10 mm átmérőjű próbatesteken végeztük (H/D=1,5), amelyeket az eddig ismertetett négy mátrixanyag (Al99,5, AlSi12, AlMgSi1 és AlCu5), valamint az SL és GC jelű gömbhéjak kombinálásával állítottunk elő. A kiválasztott keményítésre alkalmas próbatesteket T6 hőkezelésnek vetettük alá (3.3. táblázat). A vizsgálat egyéb körülményei megegyeztek a szabad zömítésnél alkalmazottakkal, azzal, hogy a minták teljes felületét kentük.

A fárasztóvizsgálatokat egy Instron 8872 típusú gépen végeztük el egy négy oszlopos zömítő szerszám segítségével. A próbatestek hengeres alakúak voltak 12,75 mm-es magassággal és Ø8,5 mm-es átmérővel (H/D=1,5). A szerszám nyomófelületei 45 HRC keménységértékre hőkezelték. A terhelés szinuszosan változó nyomás volt R=0,1 aszimmetria tényezővel 60 és 100% közötti terhelési szinteken. A terhelés frekvenciája f=10 Hz volt. Az eredményeket a Weibull eloszlás alkalmazásával értékeltük ki 50%-os törési valószínűségi szinten. Tönkremeneteli kritériumnak alakváltozási limitet alkalmaztunk: a próbatest töröttnek minősült, ha a mérnöki alakváltozás elérte az  $\varepsilon_{krit}=2\%$ -ot.

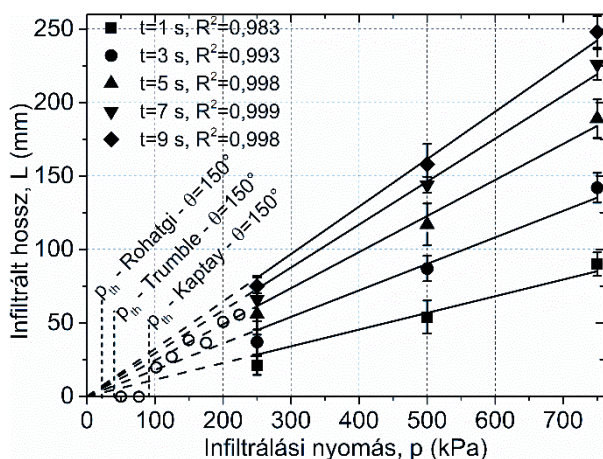
## 4 Új tudományos eredmények, tézisek

Ebben a fejezetben az értekezés fő részfejezeteinek végén összefoglalt megállapításokat, a dolgozat eredményeit összesítő következtetéseket ismertetem és foglalom tézispontokba.

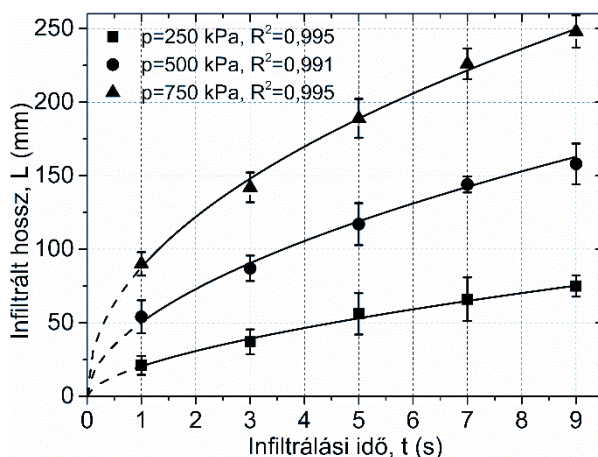
### Első tézis – infiltrálás [14-19]

Az általam kifejlesztett nyomásos infiltráló berendezéssel igazoltam, hogy a vizsgált nemreaktív rendszerben (AlSi12 mátrix és SL típusú, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> és SiO<sub>2</sub> tartalmú kerámia gömbhéjak) és a rövid infiltrálási idő tartományban (t<10 s) az infiltrált hossz az infiltrálási időnek közel négyzetgyökös, az infiltrálási nyomásnak lineáris függvénye, azaz követi az elméleti úton becsült eredményeket. A küszöbnyomás értékét becsülő (szakirodalmi) elméleti

és félempirikus összefüggéseket vizsgálva mérésekkel igazoltam, hogy a Kaptay György és Bárczy Tamás által adott elméleti megfontolásokon nyugvó összefüggés biztosítja a legjobb becslést adott (reális) fizikai jellemzők (felületi feszültség, nedvesítési peremszög) mellett.



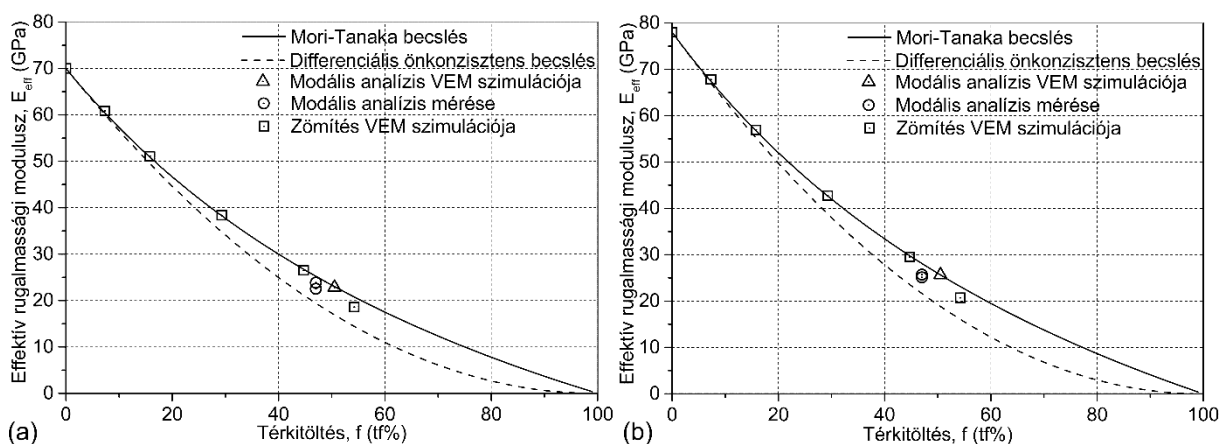
4.1. ábra Az infiltrált hossz az infiltrálási nyomás függvényében



4.2. ábra Az infiltrált hossz az infiltrálási idő függvényében

## Második tézis – effektív rugalmassági modulusz [13, 20]

Megállapítottam és akusztikus emissziós mérésekkel igazoltam, hogy a szintaktikus fémhabokban már igen kis (a folyáshatár töredékénél kisebb) terheléseknél is megindul a maradó képlékeny alakváltozás. Ezért igen körülményes a szintaktikus fémhabok effektív rugalmassági moduluszáinak mérése és a nyomóvizsgálatok során meghatározott szerkezeti merevség értékek nem feleltethetők meg az effektív rugalmassági moduluszoknak. Az effektív rugalmassági moduluszt meghatároztam mérésekkel (modális analízis), tisztán rugalmas alakváltozást feltételező és megengedő végesselemez modellezéssel, illetve rugalmasságtani alapokon nyugvó homogenizációs eljárásokkal.



4.3. ábra Az effektív rugalmassági modulusz meghatározását célzó mérések és modellek összefoglaló diagramja (a) Al99,5 és (b) AlSi12 mátrixanyag

## Harmadik tézis – hibrid kompozitok [21, 22]

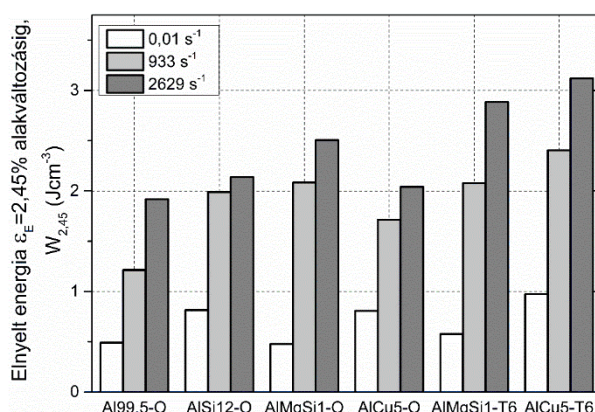
Kimutattam, hogy az AlSi12 mátrixú, különböző anyagú (GC típusú,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  és  $\text{SiO}_2$  tartalmú kerámia, illetve GM típusú, Fe összetételű), de azonos méretű gömbhéjakkal előállított hibrid

szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságait ( $P_{\text{hibrid}}$ ) a tisztán GC vagy tisztán GM gömbhéjakkal készített szintaktikus fémhabok önálló tulajdonságainak (rendre  $P_{\text{GC}}$  és  $P_{\text{GM}}$ ) és a kerámia gömbhéjak teljes gömbhéj tartalom belüli térfogatarányának ( $C$ ) ismeretében a 4.1. egyenlet írja le (a tulajdonságra jellemző szórássávon belül).

$$P_{\text{hibrid}} = CP_{\text{GC}} + (1 - C)P_{\text{GM}} \quad (4.1.)$$

#### Negyedik tézis – nagy alakváltozási sebességű zömítés [23, 24]

A technikai tisztaságú alumínium (Al99,5), illetve alumínium ötvözet (AlSi12, AlMgSi1 és AlCu5) mátrixú, GC típusú ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  és  $\text{SiO}_2$  tartalmú kerámia) gömbhéjakat tartalmazó szintaktikus fémhabok nagy alakváltozási sebességgel ( $933 \text{ s}^{-1}$ , illetve  $2629 \text{ s}^{-1}$ ) végzett, síklapok közötti szabad zömítővizsgálataival kimutattam, hogy a növelt alakváltozási sebesség hatására a szintaktikus fémhabok szilárdsági tulajdonságai (nyomószilárdság, szerkezeti merevség) növekedtek ( $933 \text{ s}^{-1}$  esetén átlagosan rendre  $\sim +20\%$  és  $\sim +215\%$ , illetve  $2629 \text{ s}^{-1}$  esetén átlagosan rendre  $\sim +45\%$  és  $\sim +310\%$ ), míg az alakváltozási képességet jellemző törési alakváltozás jelentősen ( $933 \text{ s}^{-1}$  és  $2629 \text{ s}^{-1}$  esetén is átlagosan  $\sim -45\%$ ) csökkent. Ezzel összefüggésben megállapítottam továbbá, hogy az adott (összehasonlító) alakváltozásig számított elnyelt mechanikai munka a növelt alakváltozási sebességnél jelentősen ( $933 \text{ s}^{-1}$  esetén átlagosan  $\sim +190\%$ , illetve  $2629 \text{ s}^{-1}$  esetén átlagosan  $\sim +275\%$ ) nagyobb, mint kvázi-statisztikus körülmények között.

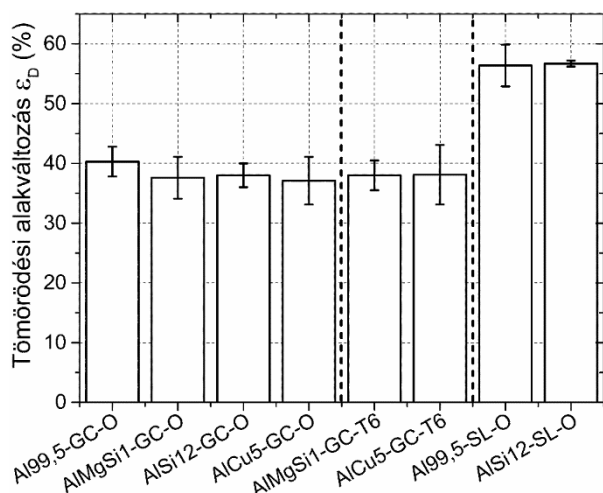


4.4. ábra A vizsgált szintaktikus fémhabok által elnyelt fajlagos energia  $\epsilon_E=2,45\%$  érték mellett

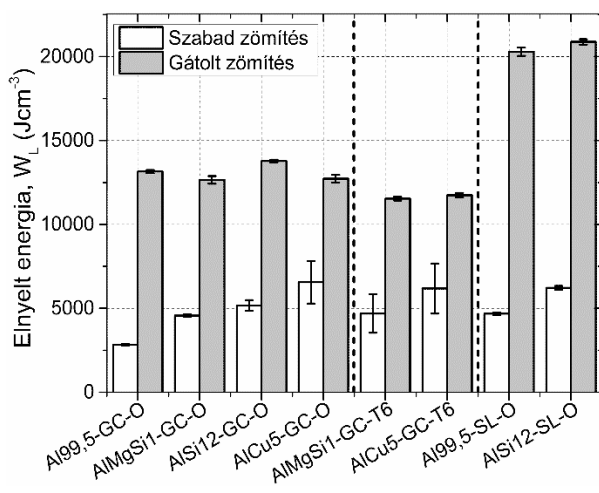
#### Ötödik tézis – radiális irányban gátolt zömítés [25]

A technikai tisztaságú alumínium (Al99,5), illetve alumínium ötvözet (AlSi12, AlMgSi1 és AlCu5) mátrixú, SL vagy GC típusú ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  és  $\text{SiO}_2$  tartalmú kerámia) gömbhéjakat tartalmazó szintaktikus fémhabok radiális irányban gátolt zömítéseinek eredményeiből megállapítottam, hogy a nyomószilárdságot, a törési alakváltozást és a szerkezeti merevséget elsősorban a mátrixanyag kémiai összetétele, a gömbhéjak mérete és a hőkezeltégi állapot befolyásolja. A tömörödési alakváltozás mértékét elsősorban a gömbhéjak mérete határozza meg, a mátrixanyag kémiai összetételének és a hőkezeltégi állapotnak nem volt kimutatható hatása. A teljes elnyelt mechanikai energia radiálisan gátolt alakváltozású nyomóvizsgálatok és azonos alakváltozási határok mellett (minimum) kétszerese a szabad zömítések során mértnek. A

tönkremeneteli módot tekintve kimutattam, hogy radiálisan gátolt alakváltozás során a próbatest axiális irányban tömörödik, a gömbhéjak axiális irányban összeroppannak és a mátrixanyag a próbatest egészen belül jelentős képlékeny alakváltozást szenved.



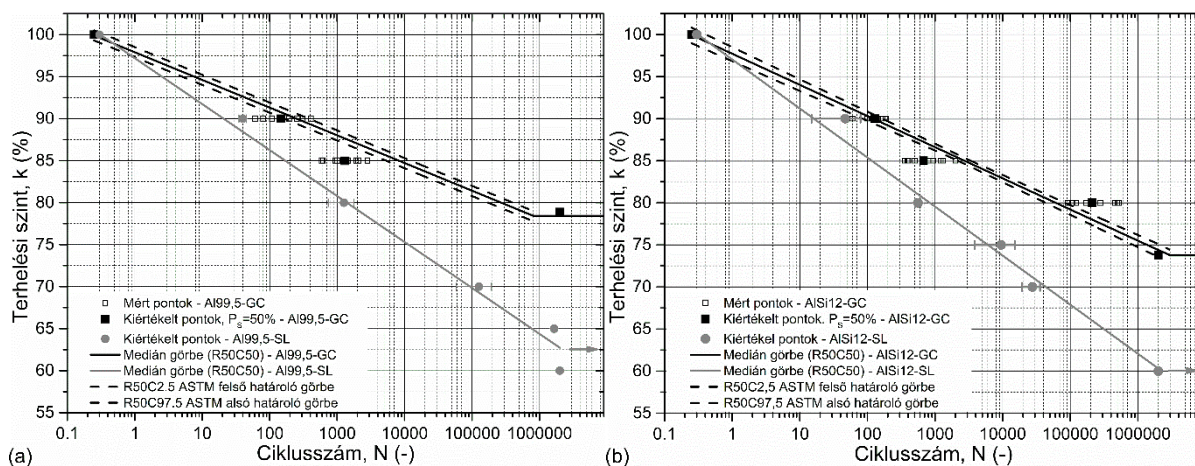
4.5. ábra Radiális irányban gátolt alakváltozású szintaktikus fémhabok tömörödési alakváltozása



4.6. ábra Radiális irányban gátolt alakváltozású szintaktikus fémhabok teljes elnyelt energiája

## Hatodik tézis – ismétlődő nyomóigénybevétel [26-28]

A ciklikus nyomó igénybevétel hatására mutatott viselkedésüket tanulmányozva, a tervezési megismételhetőség szintjén elsőként megszerkesztettem az Al99,5, illetve AlSi12 mátrixú, GC típusú ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  és  $\text{SiO}_2$  tartalmú kerámia) gömbhéjakat tartalmazó szintaktikus fémhabok 50%-os túlélési valószínűséghez tartozó Wöhler görbéjét, amelyek magukba foglalják az élettartam szakaszra vonatkozó mediángörbéket, a hozzájuk tartozó 95%-os konfidencia sávokat és a  $2 \cdot 10^6$  igénybevételhez tartozó kifaradási határhoz tartozó terhelési szintet (rendre 78,44% és 73,75% Al99,5 és AlSi12 mátrixanyagnál). Megállapítottam, hogy adott terhelési (kihasználtsági) szinten az Al99,5 mátrixanyag hosszabb élettartamot biztosított, mint az AlSi12. Megállapítottam, hogy adott terhelési (kihasználtsági) szinten a nagyobb átlagos átmérőjű GC ( $\varnothing 1425 \pm 42 \mu\text{m}$ ) típusú gömbhéjak hosszabb élettartamot biztosítottak, mint a kisebb, SL ( $\varnothing 150 \pm 4,1 \mu\text{m}$ ) típusúak.



4.7. ábra A vizsgált fémhabok Wöhler-görbéi (a) Al99,5-GC és (b) AlSi12-GC próbatestek

## 5 Hasznosítási lehetőségek

Az infiltrálási paraméterek vizsgálataihoz kapcsolódó fejezetben részletezett vizsgálatok alapot adnak a szintaktikus fémhabok meleg kamrás kisnyomású nyomásos öntéssel történő gyártására és segítséget nyújtanak az eljárás beállítási paramétereinek megválasztásához adott geometriai jellemzőkkel bíró alkatrész és adott anyagpár számára.

A kvázi-statisztikus nyomóvizsgálatokkal meghatározott mechanikai tulajdonságok hasznos mérőszámokat szolgáltatnak a konstrukciós mérnökök számára a (hibrid) szintaktikus fémhabból készülő alkatrészeik megtervezéséhez. Hasonlóan a tönkremeneteli módok és károsodási formák ismerete is a tervezést segítő információ.

A növelt alakváltozási sebességű nyomóvizsgálatok eredményei – különös tekintettel az energiaelnyelésre –, alapot adnak azoknak az alkalmazásoknak, alkatrészeknek a tervezéséhez, amelyek során a fémhabot nagy sebességgel becsapódó test érheti (például védelmi funkciók). A radiális irányban gátolt nyomóvizsgálatok elemzéséből nyert eredmények a fémhabokkal kitöltött zárt szerkezetek, héjak (például lökéscsillapítók, -hárítók) tervezéséhez alkalmazhatók. Végezetül a szintaktikus fémhabok ismétlődő (lökettető), nyomó igénybevétel hatására mutatott viselkedésének ismerete hasznos lehet a ciklikus igénybevételeknek kitett alkalmazásokban, mint például a különféle teherviselő héjszerkezetekben.

## Hivatkozások

- [1] Ashby MF. Materials Selection in Mechanical Design. 3rd edition. Elsevier Butterworth-Heinemann (2005) p 29.
- [2] Envirospheres Ltd. <http://www.envirospheres.com/products.asp>.
- [3] Hollomet GmbH <http://www.hollomet.com/home.html>.
- [4] Deep Springs Technology [http://teamdst.com/pdf/HollowShells\\_MTG119-A%20Web.pdf](http://teamdst.com/pdf/HollowShells_MTG119-A%20Web.pdf).
- [5] DIN 50134 Testing of metallic materials - Compression test of metallic cellular materials (2008).
- [6] ISO 13314 Mechanical testing of metals - Ductility testing - Compression test for porous and cellular materials (2011).
- [7] Gupta N, Rohatgi PK. Metal Matrix Syntactic Foams. DEStech Publications Inc. (2014)
- [8] Aluinvent ZRt. <http://www.aluinvent.com/>.
- [9] Kientzl I. Alumínium mátrixú kompozithuzalok és kettőskompozit szerkezetek (2010) PhD disszertáció.
- [10] Jaeger HM, Nagel SR. Physics of the Granular State. Science 5051 (1992) 1523-1531.
- [11] Torquato S, Truskett TM, Debenedetti PG. Is Random Close Packing of Spheres Well Defined? Physical Review Letters 84 (2000) 2064-2067.
- [12] ASM Handbook. Heat treating (vol. 4) 3rd printing. ASM International (1995) p 1861.
- [13] Kádár Cs, Máthis K, Orbulov IN, Chmelik F. Monitoring the failure mechanisms in metal matrix syntactic foams during compression by acoustic emission. Materials Letters 173 (2016) 31-34.

- [14] Orbulov IN. Syntactic foams produced by pressure infiltration-the effect of pressure and time on infiltration length. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 55 (2011) 21-27.
- [15] Orbulov IN. Metal matrix syntactic foams produced by pressure infiltration—The effect of infiltration parameters. *Materials Science and Engineering A* 583 (2013) 11-19.
- [16] Orbulov IN, Dobránszky J. Producing metal matrix syntactic foams by pressure infiltration. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 52 (2008) 35-42.
- [17] Orbulov IN, Ginsztler J, Kun P. Infiltration characteristics and compressive behaviour of metal matrix syntactic foams. *Materials Science Forum* 729 (2013) 68-73.
- [18] Orbulov IN. Mikrogömbhéjak nyomásos infiltrációjának vizsgálati módszere. In XIX. Nemzetközi Gépész Találkozó, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Csíksomlyó, Románia (2011) 296-299.
- [19] Orbulov IN. Infiltration and mechanical characteristics of hollow spheres reinforced metal matrix composites. In 8th Conference on Mechanical Engineering, BME Gépészmérnöki Kar, Budapest, Magyarország (2012) 403-411.
- [20] Szlancsik A, Katona B, Bobor K, Májlínger K, Orbulov IN. Compressive behaviour of aluminium matrix syntactic foams reinforced by iron hollow spheres. *Materials & Design* 83 (2015) 230-237.
- [21] Májlínger K, Orbulov IN. Characteristic compressive properties of hybrid metal matrix syntactic foams. *Materials Science and Engineering A* 606 (2014) 248-256.
- [22] Májlínger K, Orbulov IN. Hibrid szintaktikus fémhabok szilárdsági jellemzői. *Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat* 147 (2014) 29-34.
- [23] Myers K, Katona B, Cortes P, Orbulov IN. Quasi-static and high strain rate response of aluminum matrix syntactic foams under compression. *Composites Part A* 79 (2015) 82-91.
- [24] Bálint K, Orbulov IN. Kerámiagömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok kvázistatikus és nagy alakváltozási sebességű nyomóvizsgálata. *Bányászati és Kohászati Lapok - Kohászat* 149 (2016) 30-35.
- [25] Orbulov IN, Májlínger K. Compressive Properties of Metal Matrix Syntactic Foams in Free and Constrained Compression. *JOM* 66 (2014) 882-891.
- [26] Orbulov IN, Katona B, Szebényi G. Fatigue properties of metal matrix syntactic foams. In International Conference on Cellular Materials, Dresden, Germany (2014) 1-6.
- [27] Katona B, Szebényi G, Orbulov IN. Fémmátrixú szintaktikus fémhabok fáradási tulajdonságai. *Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat* 148 (2015) 30-33.
- [28] Katona B, Szebényi G, Orbulov IN. Fatigue properties of ceramic hollow sphere filled aluminium matrix syntactic foams. *Materials Science and Engineering A* 679 (2017) 350-357.

\*\*\*

Budapest  
2017