

# Részecskeerősítésű, alumíniumötvözet mátrixú szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságai

## Mechanical properties of particle-reinforced aluminium matrix syntactic foams

MARÓTI JÁNOS ENDRE<sup>1,2</sup> – ORBULOV IMRE NORBERT<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Gépészmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

<sup>2</sup> MTA–BME Lendület Nagyteljesítményű Kompozit Fémhabok Kutatócsoport, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

\*E-mail: orbulov.imre.norbert@gpk.bme.hu, Telefon: +36 1 463 2386, Fax: +36 1 463 1366



*Kisnyomásos infiltrálással állítottunk elő mátrixanyagában erősített szintaktikus fémhabokat (SzF-okat). Mátrixanyagként AlSi7Mg ötvözetet alkalmaztunk, míg töltőanyagként kerámia gömbhéjat (KG) vagy duzzasztott agyagkavicsot (DA) használtunk. A mátrixot Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,6 mm vagy 1,2 mm névleges méretű) vagy SiC (0,4 mm névleges méretű) részecskékkel erősítettük. Az előállított mintákat szerkezetileg (mikroszerkezet) és mechanikailag (szabványos nyomóvizsgálat) vizsgáltuk. A mikroszkópos vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a kisnyomásos infiltráció alkalmazásnak bizonyult a mátrixanyagában erősített SzF-ok gyártására. A mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás görbéinek alakját főleg a töltőanyag határozta meg. A KG-at tartalmazó SzF-ok nagyfeszültségi csúcsot mutattak, míg a DA töltőanyag használata simább átmenetet biztosított az egyenes, rugalmas szakasz és a platós régió között. Az SzF-ok nyomószilárdsága jelentősen növekedett az erősítés hatására. Lineáris kapcsolatokat találtunk a nyomó szilárdság és az Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> részecskék névleges mérete között. Az SzF-ok platószilárdsága, és így az elnyelt mechanikai energia csökkent az erősítés jelenléte miatt. A csökkenést a feszültséggyűjtő részecskék okozták, amit csak az nagyobb keménységű SiC részecskékkel lehetett kompenzálni. Elmondhatjuk, hogy a SzF-ok meghibásodási módjai a töltőanyagtól függték.*

**Kulcsszavak:** szintaktikus fémhab, kompozitok, erősített fémhab

*Metal matrix syntactic foams (MMSFs) were produced by low-pressure liquid-state infiltration. AlSi7Mg alloy was used as matrix material, while the filler was a set of ceramic hollow spheres (CHSs) or light-expanded clay agglomerate particles (LECAPs). The matrix was reinforced by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.6 mm or 1.2 mm nominal size) or SiC (0.4 mm nominal size) particles. The produced samples were investigated structurally (microstructure) and mechanically (standardised compressive tests). According to the microscopic investigations, liquid-state low-pressure infiltration was found to be a suitable method to produce MMSFs with a reinforced matrix. The shape of the engineering stress – strain curves was mainly influenced by the filler. CHS filled MMSFs showed a high stress peak, while LECAP filling ensured a smoother transition from the linear elastic part to the plateau region. The compressive strength of the MMSFs was significantly increased by the reinforcing particles in the matrix. Linear connections were found in the compressive strength and the nominal size of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle relationships. The plateau strength of the MMSFs and thus the absorbed mechanical energy was decreased by the presence of the reinforcement. The decrement was caused by the stress-concentrating particles and could only be equalised by the stronger SiC particles. The failure modes of the MMSFs were dependent on the filler material.*

**Keywords:** syntactic metal foam, composites, particle reinforced metal foam

## 1. Bevezetés

A hagyományos fémhabokat kezdetben a természet ihlette [1], és polimer habokból fejlesztették ki, hogy nagyobb fajlagos szilárdságot és energiaelnyelést érjenek el a fémhabot alkotó tömbi anyagéhoz képest. A fémhabokat három fő csoportba lehet sorolni: i) nyílt cellás fémhabok, ii) zárt cellás fémhabok és iii) egy második, üreges vagy porózus fázissal előállított fémhabok. Az utóbbi csoport tagjait szintaktikus fémhaboknak (SzF-oknak) nevezzük. A SzF-ok egyedi kompozitanyagok, amelyek fém mátrixanyagból és egy második töltőanyagfázisból állnak, amely vagy üreges (például kerámia gömbhéj (KG)), vagy folytonos felülettel ellátott pórusok (például duzzasztott perlit, agyag vagy üveg). A SzF-ok legfontosabb tulajdonságai a nagy mechanikai energiaelnyelő képességük és a kiváló fajlagos (sűrűség szerinti) mechanikai tulajdonságaik. A nagy energiaelnyelés hasznos az autóiparban/közlekedésben (ütközéscsillapítás) [2] és a védelmi technológiákban (például golyóálló vagy robbanásálló alkatrészek) [3]. A nagy fajlagos mechanikai tulajdonságok hasznosak a közlekedés iparban (a tömegcsökkentés kisebb üzemanyagfogyasztást vagy több helyet eredményez nagyobb kapacitású akkumulátoroknak). A SzF-ok mátrixanyagai általában könnyűfémek. Az Al a leggyakrabban használt [4, 5] a kis sűrűsége, elfogadható ára, jó önthetősége, kiváló megmunkálhatósága és kedvező mechanikai tulajdonságai miatt, amelyek megfelelő hőkezelésekkel változtathatók.

A SzF-ok kis sűrűségét és kedvező fajlagos mechanikai tulajdonságait üreges vagy porózus töltőanyagok beépítésével lehet elérni. Az üreges gömbhéjak kerámiából vagy fémekből készülhetnek, mint például  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [6], üveg [7] vagy acél [8]. A porózus testek általában duzzasztott közetek, például duzzasz-

tott perlit [9], duzzasztott üveg [10] vagy duzzasztott agyagkavics (DA) [11].

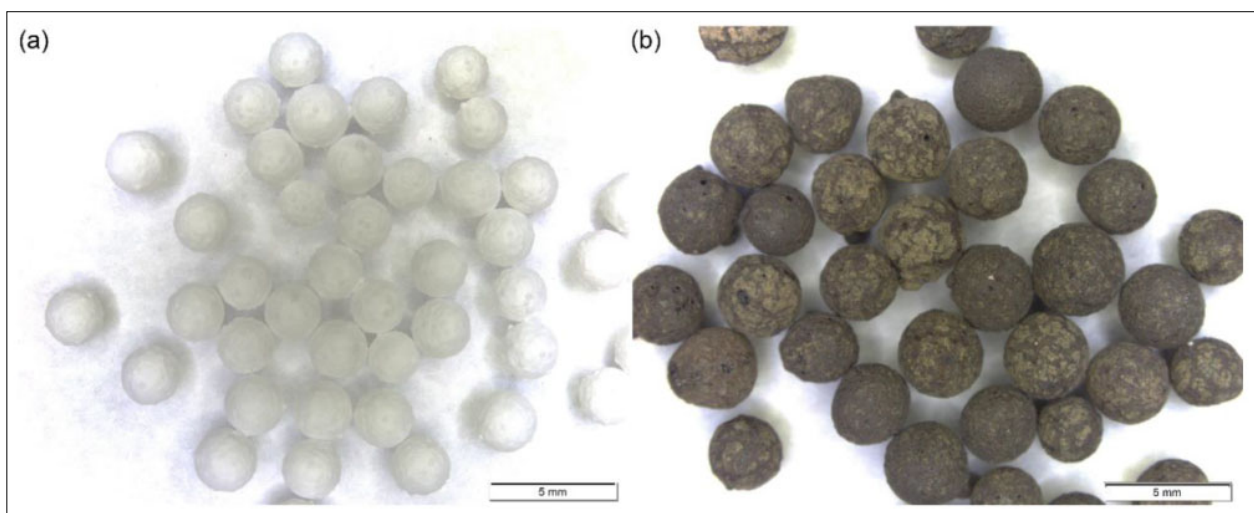
A kutatásunkban kisnyomásos infiltrálással gyártottunk mátrixanyagában erősített SzF-okat, és vizsgáltuk szerkezeti és mechanikai tulajdonságaikat. A mátrixot a kompozitoknál előszeretettel használt  $\text{Al}_2\text{O}_3$  és SiC szemcsékkel erősítettük. A szakirodalomban nem található adatok olyan fémhabokról, amelyek mátrixanyagként kompozitot használtak, így teljesen újszerű és érdekes tématerületet feszegettünk.

## 2. Anyagok és vizsgálati módszerek

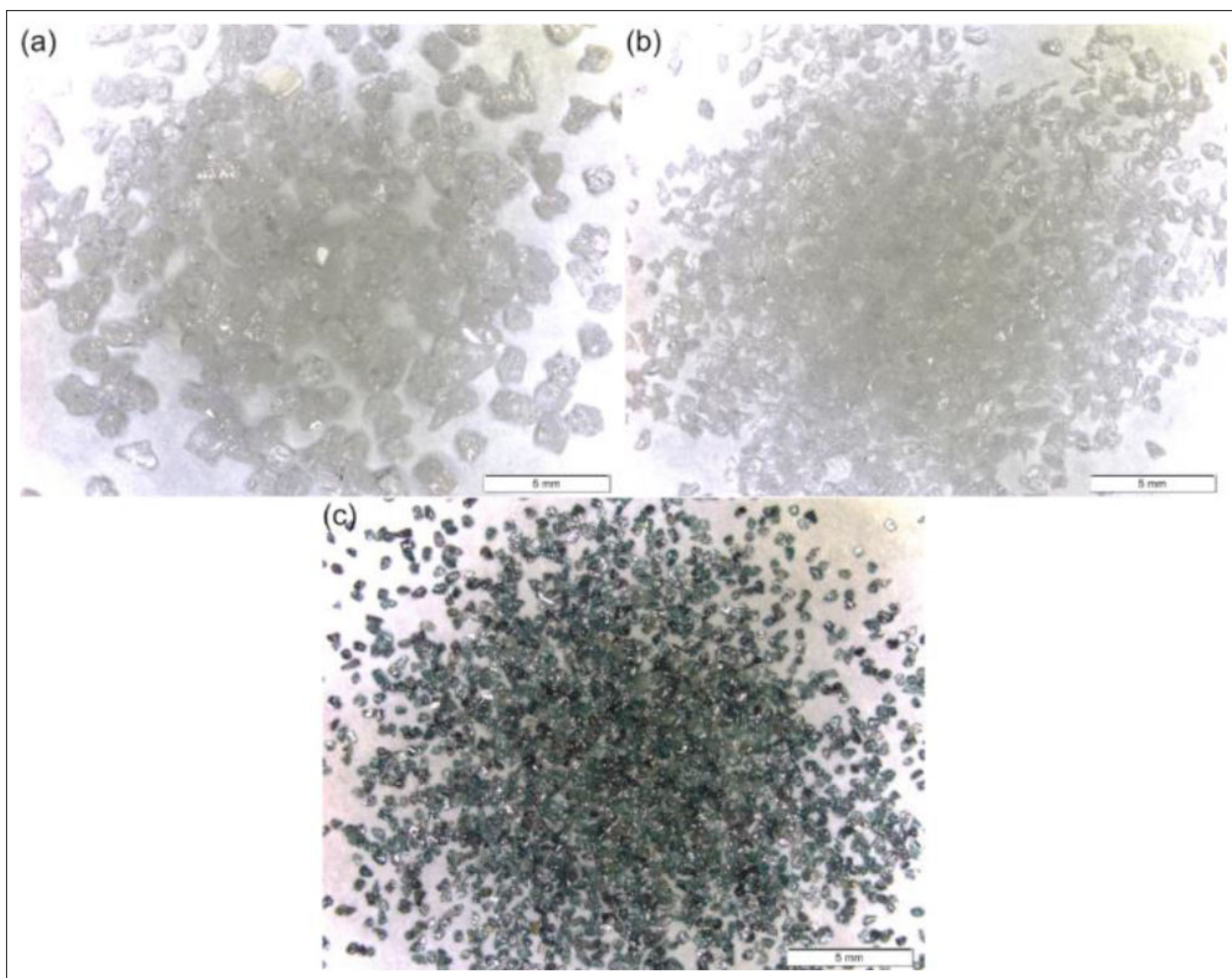
### 2.1. Felhasznált anyagok

A kutatásunkban vizsgált SzF-okhoz mátrixanyagként  $\text{AlSi7Mg}$  (A356, névleges összetétele: 92 t% Al, 7 t% Si, 0,3 t% Mg, 0,2 t% Fe, 0,2 t% Cu, 0,1 t% Mn, 0,1 t% Zn, 0,1 t% egyéb) alumíniumötvözetet használtunk. Ez az alumíniumötvözet ideális mátrixanyag kis sűrűsége, viszonylag nagy szilárdsága és jó korrózióállósága miatt. A szilícium ötvözésével növeli az ötvözet önthetőségét.

A porózus fázist biztosító töltőanyagként KG-t vagy DA-t alkalmaztunk. A KG-ak nagy szilárdságú, mérnöki tervezésű üreges testek, míg a DA olcsó, porózus töltőanyag. A KG-ak átmérője  $\varnothing 2,29 \pm 0,16$  mm volt, pásztázó elektronmikroszkópi (SEM) méréseken alapuló (500 véletlenszerűen kiválasztott töltőanyagszemcse) eredmények alapján, sűrűségük (a gömbhéj tömegének és térfogatának hányadosa) pedig  $0,92 \pm 0,05$  g/cm<sup>3</sup>. A KG-ak anyaga tiszta  $\text{Al}_2\text{O}_3$  volt. A DA részecskék átmérője  $\varnothing 3,24 \pm 0,65$  mm volt, a sűrűségük pedig  $0,76 \pm 0,20$  g/cm<sup>3</sup>. A DA kémiai összetétele  $60 \pm 5$  t%  $\text{SiO}_2$ ,  $17 \pm 3$  t%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $14 \pm 2$  t%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  és kb. 9 t% egyéb oxidok (CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O). A töltőanyagok sztereomikroszkó-



1. ábra. A töltőanyagokról készült sztereomikroszkópos képek (a) KG és (b) DA



2. ábra. Az alkalmazott erősítőanyagokról készült mikroszkópi képek (a) 1,2 mm névleges méretű  $Al_2O_3$ , (b) 0,6 mm névleges méretű  $Al_2O_3$  és (c) 0,4 mm névleges méretű SiC

képe az 1. ábrán látható. A töltőanyag fő szerepe az, hogy csökkentse az alkatrész sűrűségét és megadja a fémhabokra jellemző porózus szerkezetet. A fajlagos tulajdonságok (pl. energiaelnyelés, nyomószilárdság) a sűrűség csökkentésével növekednek, ezért a töl-

tőanyag térfogataránya viszonylag nagy értékre volt beállítva, nevezetesen 60%-ra.

Erősítőanyagként három különböző részecskét alkalmaztunk: két különböző méretű  $Al_2O_3$  (1,2 mm és 0,6 mm névleges mérettel) és egy méretű SiC-ot (0,4 mm

1. táblázat. A minták elnevezése, valamint a töltő- és erősítőanyagok összefoglalása

Elnevezés	Töltőanyag		Erősítőrészecske			Sűrűség $\rho$ (gcm <sup>-3</sup> )
	Típus	Átmérő $D$ (mm)	Összetétel	Névleges méret $d$ (mm)	Mért méret $d$ (mm)	
UR-DA	DA	3,24 ± 0,65	–	–	–	1,58 ± 0,01
A-1,2-DA			$Al_2O_3$	1,2	1,20 ± 0,22	1,71 ± 0,05
A-0,6-DA			$Al_2O_3$	0,6	0,63 ± 0,10	1,69 ± 0,11
S-0,4-DA			SiC	0,4	0,44 ± 0,06	1,71 ± 0,06
UR-KG	KG	2,29 ± 0,16	–	–	–	1,66 ± 0,02
A-1,2-KG			$Al_2O_3$	1,2	1,20 ± 0,22	1,90 ± 0,07
A-0,6-KG			$Al_2O_3$	0,6	0,63 ± 0,10	1,82 ± 0,06
S-0,4-KG			SiC	0,4	0,44 ± 0,06	1,80 ± 0,04



névleges mérettel). Az erősítőanyagokat elérhetőségük és az általuk már bizonyított alkalmazhatóságuk alapján választottuk ki. Minden esetben a mátrixanyag térfogatához képest 20 tf%-ban alkalmaztunk erősítőanyagokat (megfelel a teljes SzF 9 tf%-ának). Az erősítőanyagokat a Gránit Csiszolószerszám Kft. szállította. Az ezekről készült mikroszkópi képek a 2. ábrán láthatók.

Kutatásunk során az erősítőanyagok tf%-át nem változtattuk, mivel a vizsgálatok fő céljai azok voltak, hogy i) az előállítás megvalósíthatóságát vizsgáljuk, ii) először közöljünk a részecskeerősítés hatásának szilárdság- és energiaelnyelés-változásáról, valamint iii) összehasonlítsunk különböző méretű és anyagú erősítő részecskéket az azonos tf%-os értékűekkel. Az 1. táblázatban foglaltuk össze az alkalmazott töltő- és erősítőanyagok méreteit és fajtáit, valamint hogy az egyes próbatetekhez milyen kombinációkban használtuk azokat. Az 1. táblázat továbbá tartalmazza az elkészült SzF-ok sűrűségét (a SzF-ok tömegének és térfogatának hányadosa) is. Az egyes próbatetek elnevezésében az első rész leírja az alkalmazott erősítést (UR az erősítés nélküli SzF-ot jelöli, A az  $Al_2O_3$  részecskeerősítést, míg az S a SiC részecskét), ezt követi a részecskék névleges méretének megadása. Az utolsó rész az alkalmazott töltőanyagra utal, például, az A-0,6-DA jelölés egy olyan SzF-ot jelöl, amelynek a töltőanyaga DA és mátrixanyagát 0,6 mm névleges méretű  $Al_2O_3$  részecskékkel erősítettünk.

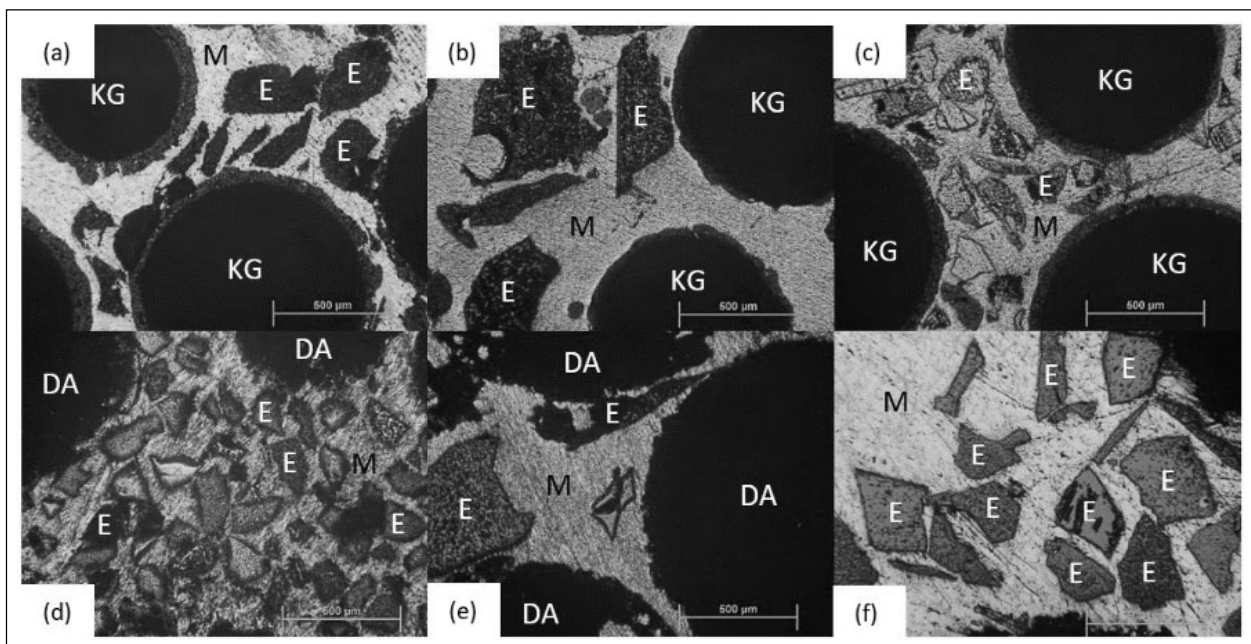
## 2.2. Gyártási módszer

A mintákat kisnyomásos infiltrálással gyártottuk. A töltő- és erősítőanyagokat mechanikusan kevertük

addig, amíg homogén keveréket nem kaptunk. Az öntőforma belsejét a fémhabok könnyebb eltávolítása érdekében grafitral vontuk be (N-77 grafit spray, a DUE-CI ELECTRONIC s.n.c. terméke). A keverék tetejére rozsdamentes acélhálót helyeztünk, hogy megakadályozzuk az erősítő- és töltőanyag felúszását a folyékony mátrixanyagba, mivel ez inhomogenitási problémákat okozhatna. Az előkészített öntőgölygőket 30 percig 600 °C-on előmelegítettük, majd a 840 °C-on megolvastott és túlhevített AlSi7Mg mátrixanyagot a formába öntöttük. A gyártás utolsó lépéseként, inert argon-gáz segítségével juttattuk a mátrixanyagot az erősítő- és töltőanyag közé, a nyomás 500 kPa volt, és 5 s-ig tartottuk fent. A tégelyben lévő gáz a beáramló mátrixanyag előtt a forma alján található furaton távozott. A próbatetekhez használt AlSi7Mg ötvözet kiválóan keményíthető, ezért minden mintán egy T6-os hőkezelést alkalmaztunk. A T6-os hőkezelés első lépése egy 535 °C-os, 4 órán át tartó homogenizáció, a második egy 150 °C-os, 15 órás mesterséges öregítésből áll.

## 2.3. Mérési módszerek

A kutatásunk során készített mátrixanyagában erősített SzF-ok mikroszerkezeti vizsgálatát egy Olympus PMG3 optikai mikroszkóppal, egy Olympus SZX16 sztereomikroszkóppal és egy Zeiss EVO MA10 pásztázó elektronmikroszkóppal végeztük. A minták előkészítése három lépésből állt: i) P320-as SiC szemcséket tartalmazó csiszolópapíron való csiszolás (5 perc, 20 N-os terhelés, 220 1/min), ii) 6 µm-es és 3 µm-es gyémánt szuszpenzióval történő polírozás



3. ábra. A kutatásunk során vizsgált fémhabok mikroszerkezetéről készült felvételek (a) A-0,6-KG, (b) A-1,2-KG, (c) S-0,4-KG (d) A-0,6-DA, (e) A-1,2-DA, (f) S-0,4-DA (M a mátrixot, E az erősítőanyagot jelöli)

2. táblázat. Mátrixanyagában erősített SzF-ok mechanikai tulajdonságainak (nyomószilárdság, platószilárdság és energiaelnyelés) abszolút és fajlagos értékei

Elnevezés	$\sigma_C$ (MPa)	$\sigma_C/\rho$ (MPa/(gcm <sup>-3</sup> ))	$\sigma_{PLT}$ (MPa)	$\sigma_{PLT}/\rho$ (MPa/(gcm <sup>-3</sup> ))	$W_{50}$ (Jcm <sup>-3</sup> )	$W_{50}/\rho$ ((Jcm <sup>-3</sup> )/(gcm <sup>-3</sup> ))
UR-DA	60,8 ± 0,30	36,5 ± 0,19	53,8 ± 0,47	34,1 ± 0,29	21,23 ± 0,083	13,5 ± 0,05
A-1.2-DA	66,1 ± 2,11	38,7 ± 1,23	50,2 ± 0,61	29,4 ± 0,36	20,80 ± 0,386	12,2 ± 0,23
A-0.6-DA	63,1 ± 0,65	37,3 ± 0,38	41,7 ± 1,23	24,7 ± 0,73	21,93 ± 0,249	13,0 ± 0,15
S-0.4-DA	79,3 ± 0,59	46,4 ± 0,35	54,7 ± 1,09	32,0 ± 0,64	22,33 ± 0,213	13,1 ± 0,12
UR-KG	101,8 ± 0,37	61,3 ± 0,22	87,9 ± 0,12	53,0 ± 0,07	45,09 ± 0,183	27,2 ± 0,11
A-1.2-KG	130,2 ± 0,92	68,5 ± 0,48	81,5 ± 1,05	42,9 ± 0,55	41,04 ± 0,431	21,6 ± 0,23
A-0.6-KG	118,4 ± 1,55	65,1 ± 0,85	74,3 ± 1,67	40,8 ± 0,92	35,48 ± 0,321	19,5 ± 0,18
S-0.4-KG	137,3 ± 1,13	76,3 ± 0,63	87,6 ± 0,58	48,7 ± 0,32	46,57 ± 0,465	25,9 ± 0,26

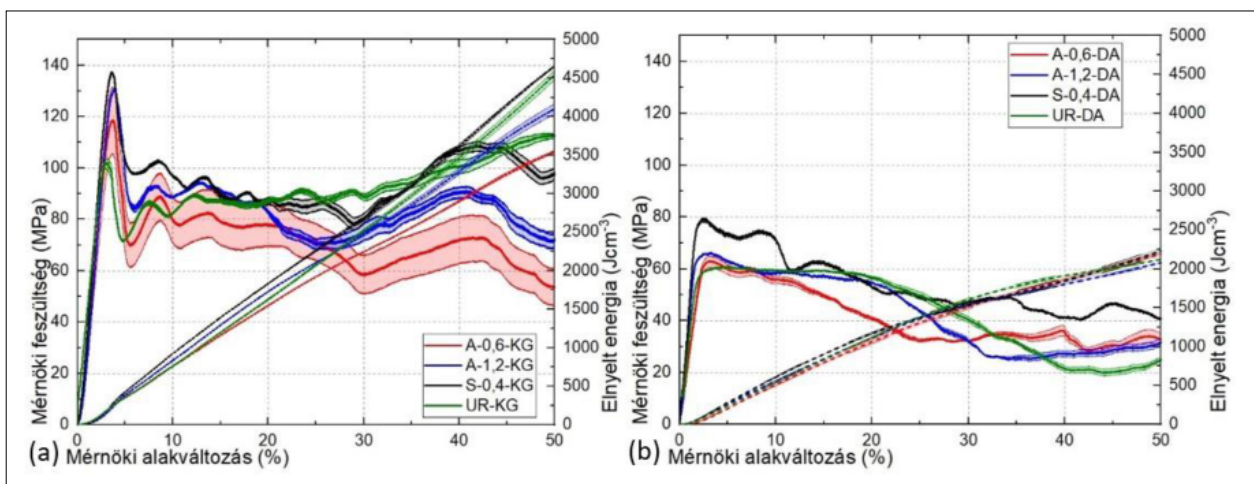
(15-15 perc, 20 N-os terhelés, 150 l/min), végezetül iii) 0,05 SiO<sub>2</sub> szuszpenziós polírozás (10 perc, 15 N terhelés, 150 l/min). A minták mechanikai tulajdonságait egy MTS810 hidraulikus univerzális anyagvizsgáló géppel vizsgáltuk. Az eszköz 250 kN-os mérés határral rendelkezik, a mintákat legalább 50%-os mérnöki alakváltozásig terheltek 4 mm/perc keresztfejjel, az ISO13310:2011 szabvány alapján. A nyomólapok és a minták közé Kolofol teflonfóliát helyeztünk a fellépő súrlódási erők csökkentése érdekében. A tömbökből típusonként négy darab 30 mm átmérőjű és 40 mm magasságú, henger alakú próbatesteket munkáltunk ki. Az eredményekből az alábbi mechanikai tulajdonságokat számítottuk ki: i) nyomószilárdság ( $\sigma_c$  a görbe első maximuma a rugalmas alakváltozási szakaszt követően), ii) platószilárdság ( $\sigma_{PLT}$  az átlagos feszültség a 10% és 40%-os deformációs tartományban), iii) energiaelnyelés ( $W_{50}$  a mérnöki alakváltozás – mérnöki feszültség görbéinek az integrálja 50%-os alakváltozásig).

### 3. Eredmények és következtetések

#### 3.1. A mátrixanyagában erősített fémhabok mikroszerkezete

Először a gyártás jóságát és a minták mikroszerkezetét vizsgáltuk. A mintákról készült mikroszkópi képeket mutat a 3. ábra. Az első sorban a KG, míg a második sorban a DA töltőanyagú szintaktikus fémhabok láthatóak. Vízszintesen az ábra három oszlopra van bontva, jobbról balra: 1,2 mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,6 mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> és a 0,4 mm SiC részecskékkel erősített mintákat jelenítettük meg.

A mikroszerkezeti képek azt mutatják, hogy a mátrixanyag teljesen kitöltötte a teret a DA, vagy KG, valamint az erősítő részecskék között is. Ráadásul nem tapasztaltuk a töltő- vagy erősítőanyag dúsulását, csoportosulását. Ezek alapján elmondható, hogy a kisnyomásos infiltráció a mátrixanyagában erősített szintaktikus fémhabok hatékony gyártási módja.



4. ábra. A vizsgált próbatestek mérnöki feszültség – mérnök alakváltozás görbéi és az elnyelt energia az alakváltozás függvényében, KG (a) és DA (b) töltőanyagok esetében

### 3.2. A mátrixanyagában erősített SzF-ok mechanikai tulajdonságai

A mikroszerkezeti vizsgálatokat követően nyomóvizsgálatot végeztünk a próbatesteken. Az eredményeket négy szempont alapján hasonlítottuk össze: i) erősítőanyag mérete és ii) anyaga, iii) a töltőanyagok anyaga és iv) az erősített minták tulajdonságainak változása az erősítetlen referenciamintákhoz képest. A 4. ábrán láthatóak a KG és DA töltőanyagú erősített és erősítetlen próbatesteken mért mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás görbék, valamint az elnyelt energia az alakváltozás függvényében. Minden görbe négy próbatést mérésének átlaga, az árnyékolt terület pedig a szórásáv.

A mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás diagramok követik a SzF-ok klasszikus viselkedését. A KG töltőanyagú SzF-ok görbéi a rugalmas alakváltozás szakaszával kezdődnek, majd első lokális maximumot követően egy jelentős feszültségcsökkenés következik be (erősített esetben megközelítőleg  $44,7 \pm 4,2$  MPa, erősítetlen esetben  $30,0$  MPa  $\pm 1,1$  MPa). Ennek a feszültségcsökkenésnek az oka az első nyírási sáv működése. Ezt követi a plató szakasz, ahol a görbe majdnem állandó feszültséget mutat. A platós régió egészen 30%-os alakváltozásig figyelhető meg, ahol ismétlenül elkezd növekedni a feszültség, az erősített minták esetében a második nyírási sáv megjelenését követően egy újabb feszültségcsökkenés figyelhető meg. Ez a feszültségcsökkenés, valamint a második nyírási sáv erősítetlen minták esetében nem figyelhető meg. A DA töltőanyagú minták viselkedése jelentősen eltér ettől. A rugalmas alakváltozást követően eléri a görbe globális maximumát, és ezt követően a feszültség értéke folyamatosan csökken, amit a töltőanyag tönkremenetele okozza. Az ISO13314:2011 szabvány alapján a fémhabok nyomóvizsgálata során néhány jellemző tulajdonság kinyerhető a diagramokból. A SzF-oknak nemcsak az abszolút mechanikai tulajdonságai, hanem a fajlagosított (sűrűséggel normált) értékeik is nagyon fontosak. A mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás görbékből kapott abszolút és fajlagos eredményeket foglaltuk össze a 2. táblázatban.

A KG töltőanyagú SzF-ok esetén a nyomószilárdság átlagosan 20%-kal növekedett az erősítetlen mintákhoz képest. Az 1,2 mm és 0,6 mm névleges méretű  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -al erősített minták esetében rendre 16,6 MPa (16,3%) és 28,4 MPa (27,9%) növekedést okoztak az erősítő részecskék. A SiC erősítéssel értük el a legnagyobb 35,5 MPa erősítést, amely 34,9%-os növekedést jelent. A DA töltőanyag esetében átlagosan 10%-al sikerült növelnünk a nyomószilárdság értékét. A kisebb  $\text{Al}_2\text{O}_3$  szemcsék esetében 2,3 MPa (3,8%), a nagyobb névleges méretű  $\text{Al}_2\text{O}_3$  használatával 5,3 MPa (8,7%), míg SiC alkalmazásával 18,5 MPa (30,4%) növekedést értünk el.

Fontos hangsúlyozni, hogy a két különböző névleges méretű  $\text{Al}_2\text{O}_3$  erősítőanyag csupán a méretükben különböztek, minden másban megegyeztek. Így lehetséges összefüggést felállítani az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  erősítőanyag mérete és a nyomószilárdság között. Az adatokra (4 adatpont) egyenest illesztve (rendre 0,981  $R^2$  és 0,988  $R^2$  értékkel) kaptuk az alábbi összefüggéseket:

$$\sigma_C = 102,6 + 23,7d, \quad (1)$$

$$\sigma_C = 60,7 + 4,4d, \quad (2)$$

$$\sigma_C/\rho = 61,4 + 6,0d, \quad (3)$$

$$\sigma_C/\rho = 36,4 + 1,8d, \quad (4)$$

ahol  $d$  az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  erősítőanyag méretét jelöli. Így megállapítottuk, hogy lineáris összefüggés van a nyomószilárdság és a erősítőanyagok névleges mérete között.

A töltőanyag hatását vizsgálva megállapíthatjuk, hogy a KG töltőanyagú SzF-okkal nagyobb szilárdságnövekedést értünk el (átlagosan 20%), mint DA töltőanyagú társaikkal (átlagosan 10%). Érdekes, hogy ez a hatás SiC-nal erősített esetekben kevésbé érvényesül, itt 34,9% és 30,4%-os növekedést értünk el.

A következő, általunk vizsgált mechanikai tulajdonság a platószilárdság. Ennek értéke nagyon fontos, hiszen ez felelős a fémhabok energiaelnyeléséért: minél nagyobb feszültség szinten minél egyenletesebb a görbének ez a szakasza, annál nagyobb lesz az energiaelnyelés is. Az erősítetlen minták nagyon jól teljesítettek ebből az aspektusból. Az erősített minták esetében két folyamat játszott fontos szerepet: i) az erősítő részecskék mint feszültséggyűjtő helyek működtek a minták rugalmas tönkremenetele közben, így csökkentve a platószilárdságot, ii) a másik folyamatnál mint erősítés jelennek meg, és a platószilárdság növekedését okozzák. Az erősítetlen mintákhoz képest mindkét típusú töltőanyag és mindkét névleges méretű  $\text{Al}_2\text{O}_3$  erősítőanyag esetében csökkent a platószilárdság. Az 1,2 mm nominális méretű  $\text{Al}_2\text{O}_3$  esetén 6,4 MPa (7,3%) és 3,6 MPa (6,7%) volt KG és DA töltőanyagok használatkor. A csökkenés nagyobb mértékű volt a kisebb méretű  $\text{Al}_2\text{O}_3$  részecskék alkalmazásakor, KG és DA esetén rendre 13,6 MPa (15,5%) és 12,1 MPa (22,5%) volt. A platószilárdság terén az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  részecskék nem tudták betölteni erősítő szerepüket, a deformáció során lejátszódó folyamatok közül a feszültséggyűjtő helyek negatív hatása érződött inkább. A helyzett sokkal jobb volt a SiC-nal erősített mintáknál, itt az erősítő hatás tudta egyensúlyozni a feszültséggyűjtő helyek által okozott csökkenést, így a platószilárdság az erősítetlen minták szintjén mozgott.

A harmadik és egyben utolsó vizsgált paraméter a SzF-ok energiaelnyelése volt. Ez az egyik legfontosabb paraméter az ipar számára. Az energiaelnyelés és

a platószilárdság között erős kapcsolat áll fenn, mivel az energiaelnyelést a mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás görbe integráljaként kapjuk meg. A KG töltőanyagú, erősített SzF-ok követték a platószilárdságnál megállapított trendet. Az erősítés csupán SiC esetén tudta kompenzálni az energiaelnyelés veszteségét. Általánosságban elmondható, hogy az energiaelnyelési képesség főleg a KG töltőanyagtól függött. A DA esetében is hasonló megállapításokat tehetünk, mint az előzőekben, ezzel is bizonyítva, hogy az energiaelnyelés töltőanyagfüggő tulajdonság.

#### 4. Következtetések

Összefoglalva, kisnyomásos infiltrációval sikeresen állítottunk elő AlSi7Mg mátrixú részecskeerősítésű szintaktikus fémhabokat. Kétféle töltőanyagot használtunk: nagy szilárdságú kerámia gömbhéjakat és kisebb szilárdságú duzzasztott anyagkavicsot. A töltőanyag mennyiségét 60 t%-ra állítottuk be. Újdonságként a szintaktikus fémhabok mátrixanyagát Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1,2 mm és 0,6 mm névleges méretű) és SiC (0,4 mm névleges méretű) részecskékkel erősítettünk (9 t%). Vizsgáltuk a minták mikroszerkezetét, valamint nyomóvizsgálattal a mechanikai tulajdonságait. Az elvégzett mérések alapján a következő megállapításokat tehetjük:

- A minták mikroszerkezeti vizsgálata azt mutatja, hogy a mátrix teljesen kitöltötte a kerámia gömbhéjak, a duzzasztott agyagkavicsok, valamint az erősítőanyagok közötti teret, nem kívánt porozítások és üregek nem figyelhetők meg. Ennek alapján a kisnyomásos infiltrálást alkalmas gyártási módszernek tartjuk.
- A mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás görbék alakját elsősorban a töltőanyagok határozták meg. A kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok nagyobb feszültségcsúcsot értek el a lineáris, rugalmas alakváltozás szakaszában. A görbék kezdeti szakaszát követően nagy platófeszültséget figyelhetünk meg. A duzzasztott agyagkavics töltőanyag esetében kisebb feszültségi csúcs figyelhető meg a rugalmas alakváltozást követően, és a plató régióban is folyamatosan csökken a feszültség az alakváltozás növekedésével.
- Lineáris kapcsolatot találtunk az Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> részecskék névleges mérete és a nyomószilárdság között. Ezek az összefüggések abszolút és fajlagos esetben is fennállnak.
- Az erősítés jelenléte az Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> részecskék esetében csökkentette a platószilárdság értékét, mivel feszültséggyűjtő helyekként viselkedtek, így negatív hatást gyakoroltak a platószilárdság értékére. Ezt a hatást csak a nagyobb szilárdságú SiC részecskék tudták kiegyenlíteni.

- Az elnyelt energia változása az erősített szintaktikus fémhabok esetén követte a platószilárdság trendjét (az energiaelnyelés és a platószilárdság között erős kapcsolat van).

#### Köszönetnyilvánítás

Ezt a munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatta az OTKA-FK\_21 138505 támogatási szerződés keretében.

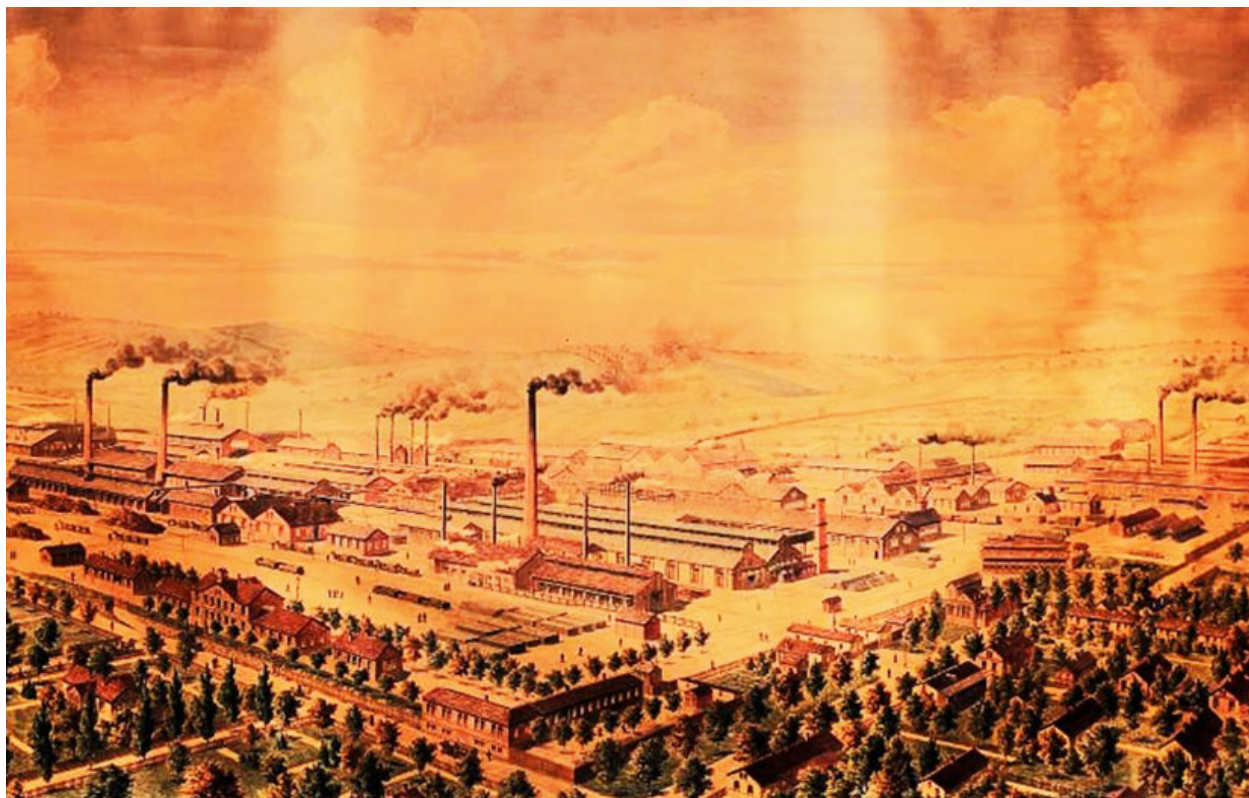
#### IRODALOM

- [1] Ashby MF: Chapter 3 – Engineering Materials and Their Properties. In: Ashby MFBT-MS in MD (Fourth E, ed., Oxford: Butterworth-Heinemann; 2011, p. 31–56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-663-7.00003-5>
- [2] Song J, Xu S, Xu L, Zhou J, Zou M: Experimental study on the crashworthiness of bio-inspired aluminum foam-filled tubes under axial compression loading. *Thin-Walled Struct* 2020; 155: 106937. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106937>
- [3] Rabiei A, Portanova M, Marx J, Scott C, Schwant J: A study on puncture resistance of composite metal foam core sandwich panels. *Adv. Eng. Mater.* 2020; n/a. <https://doi.org/10.1002/adem.202000693>
- [4] Alteneji M, Krishnan K, Guan ZW, Cantwell WJ, Zhao Y, Langdon G: Dynamic response of aluminium matrix syntactic foams subjected to high strain-rate loadings. *Compos. Struct.* 2023; 303: 116289. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.116289>
- [5] Thalmaier G, Sechel NA, Csapai A, Popa CO, Batin G, Gábora A, et al.: Aluminum perlite syntactic foams. *Materials (Basel)* 2022; 15. <https://doi.org/10.3390/ma15155446>
- [6] Ferguson JB, Santa Maria JA, Schultz BF, Rohatgi PK: Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> syntactic foams – Part II: Predicting mechanical properties of metal matrix syntactic foams reinforced with ceramic spheres. *Mater. Sci. Eng. A* 2013; 582: 423–32. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.06.065>
- [7] Son YG, Lee YC, Jung SS, Kwon HS, Lee W, Park Y: Synthesis and characterization of hollow glass sphere containing aluminum syntactic foam by spark plasma sintering and hot pressing. *Metals (Basel)* 2019; 9. <https://doi.org/10.3390/met9121266>
- [8] Vendra LJ, Rabiei A: A study on aluminum–steel composite metal foam processed by casting. *Mater. Sci. Eng. A* 2007; 465: 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.04.037>
- [9] Wiener C, Chmelík F, Ugi D, Máthis K, Knapke M: Damage characterization during compression in a perlite-aluminum syntactic foam. *Materials (Basel)* 2019; 12. <https://doi.org/10.3390/ma12203342>
- [10] Wright A, Kennedy A: The processing and properties of syntactic al foams containing low cost expanded glass particles. *Adv. Eng. Mater.* 2017; 19:1–6. <https://doi.org/10.1002/adem.201600467>
- [11] Kemény A, Leveles B, Károly D: Functional aluminium matrix syntactic foams filled with lightweight expanded clay aggregate particles. *Mater. Today Proc.* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.164>



## FÜGGELÉK

Rövidítések és mennyiségek	Értelmezésük
SzF	Szintaktikus Fémhab
KG	Kerámia gömbhéj
DA	Duzzasztott agyagkavics
t%	Tömegszázalék
tf%	Térfogatszázalék
UR	Erősítetlen minta
A	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> részecskékkel erősített minta
S	SiC részecskékkel erősített minta
Töltőanyag sűrűsége ( $\rho_B$ )	A töltőanyag tömegének és térfogatának hányadosa
Szintaktikus fémhab sűrűsége ( $\rho$ )	A szintaktikus fémhab tömegének és térfogatának hányadosa
Nyomószilárdság ( $\sigma_C$ )	A görbe első maximuma a rugalmas alakváltozási szakaszt követően
Platószilárdság ( $\sigma_{PLT}$ )	Az átlagos feszültség a 10% és 40%-os deformációs tartományban
Energiaelnyelés ( $W_{50}$ )	A mérnöki alakváltozás – mérnöki feszültség görbék integrálja 50%-os alakváltozásig



Diósgyőrvasgyár látképe, 1895 (lásd Harscsik Béla: „A diósgyőrvasgyári lakótelep kialakulása, 1868–1945” c. írása ebben a számban, a 32. oldalon)