

Al-Si mátrixanyagú, szénszállal erősített szintaktikus fémhabok gyártása és mikroszerkezeti vizsgálata

Manufacturing and microstructural investigation of carbon fibre-reinforced Al-Si matrix syntactic foams

PRÉMUS Karina^{1,2}, GÁBRIEL Bálint^{1,2}, Dr. KEMÉNY Alexandra^{1,2}, Dr. ORBULOV Imre Norbert^{1,2}

1: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

2: MTA-BME Lendület Nagyteljesítményű Kompozit Fémhabok Kutatócsoport, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

Abstract

The aim of this study is to present in detail the low-pressure infiltration manufacturing process applied to the investigated specimens, and to analyze and evaluate the results obtained from stereomicroscopic and metallographic examinations. The matrix material of the metal foam used in the experiments was AlSi7Mg, a precipitation-hardenable aluminium alloy, while low-cost expanded glass particles were selected as the space-filling material. Fibre reinforcement was implemented using copper-coated carbon fibres.

Keywords: metal foam, AlSi7Mg matrix material, expanded glass, fibre reinforcement, microscopic investigations

Kivonat

Jelen kutatás célja a vizsgált próbatestek kisnyomásos infiltrációs gyártási technológiájának részletes bemutatása, valamint a sztereomikroszkópos és fémmikroszkópos vizsgálatok során kapott eredmények elemzése és értékelése. A vizsgálatok során alkalmazott fémhab mátrixanyaga AlSi7Mg, kiválósan keményíthető alumíniumötvözet, míg a térkitöltő anyagnak kis költségű üveghabot választottunk. A szálerősítést rézzel bevont szénszálak felhasználásával valósítottuk meg.

Kulcsszavak: fémhab, AlSi7Mg mátrixanyag, üveghab, szálerősítés, mikroszkópos vizsgálatok

1. BEVEZETÉS

A 21. századra a fémhabok kutatása egyre nagyobb jelentőségre tett szert, mivel ezek az anyagok kedvező fajlagos energiaelnyelést kínálnak kis sűrűség mellett. Ebből következően különösen alkalmasak lehetnek olyan korszerű műszaki alkalmazásokhoz, ahol a tömegcsökkentés, a fajlagos szilárdság növelése, valamint a nagyfokú energiaelnyelés meghatározó követelmény. [1], [2]

Felépítésük szerint megkülönböztetünk nyílt- és zártcellás fémhabokat [3], [4]; nyíltcellás esetben a pórusok egymással összeköttetésben állnak, míg zártcellás fémhaboknál az egyes pórusok egymástól teljesen el vannak választva. A szintaktikus fémhabok cellás szerkezetű kompozit anyagok, amelyek alapvetően mátrixból és töltőanyagból épülnek fel. A fémhabok szálerősítése megvalósulhat külső szendvicsszerkezetként [5] vagy a fémhab mátrixanyagába integrált [6] módon.

Yan és munkatársai [7] alumíniumhab szendvicsszerkezetek határfelületi szilárdságának növelését vizsgálták szénszálas kompozit lemezek alkalmazásával. A salétromsavas felületkezelés jelentősen javította a lemez-hab kötést; optimális paraméterek mellett a nyíró szilárdság 79%-kal, a hajlító maximális terhelés 33,95%-kal, az energiaelnyelés pedig több mint négyszeresére nőtt. Eredményeik igazolják, hogy a megfelelően kezelt és adagolt szénszálak hatékonyan javítják az alumíniumhab szendvicsszerkezetek mechanikai teljesítményét.

Isabel Duarte és José M. F. Ferreira [8] áttekintő tanulmányukban a kompozit és nanokompozit fémhabok, különösen az alumíniumötvözet-alapú rendszerek fejlesztési irányait foglalják össze. Bemutatják a

mikro- és nanorészecskés erősítést, az intermetallikus fázisokat létrehozó ötvözt, valamint a szintaktikus habok előállítását. Ezek a megoldások javítják a szilárdságot, merevséget és energiaelnyelést, ugyanakkor növelhetik a ridegséget és a gyártási költségeket. A szerzők hangsúlyozzák, hogy a homogén erősítőeloszlás és a stabil fáziskapcsolatok kialakítása kulcsfontosságú a jövőbeli ipari alkalmazások szempontjából.

A fémhabok mechanikai és szerkezeti tulajdonságai a mátrixanyag erősítésével tovább javíthatók, például az erősítőszálak jelenléte hozzájárulhat a szilárdság növeléséhez, a terhelés hatékonyabb elosztásához, valamint a deformációval és károsodással szembeni ellenállás fokozásához.

2. ANYAGOK ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

2.1. Felhasznált anyagok

Kutatásunk során mátrixanyagként AlSi7Mg ötvözetet (1. táblázat) alkalmaztunk, amely kedvező öntési, mechanikai és korrózióállósági tulajdonságai miatt széles körben használt anyag. Mivel kiválóan keményíthető ötvözet, az iparban széleskörben használják.

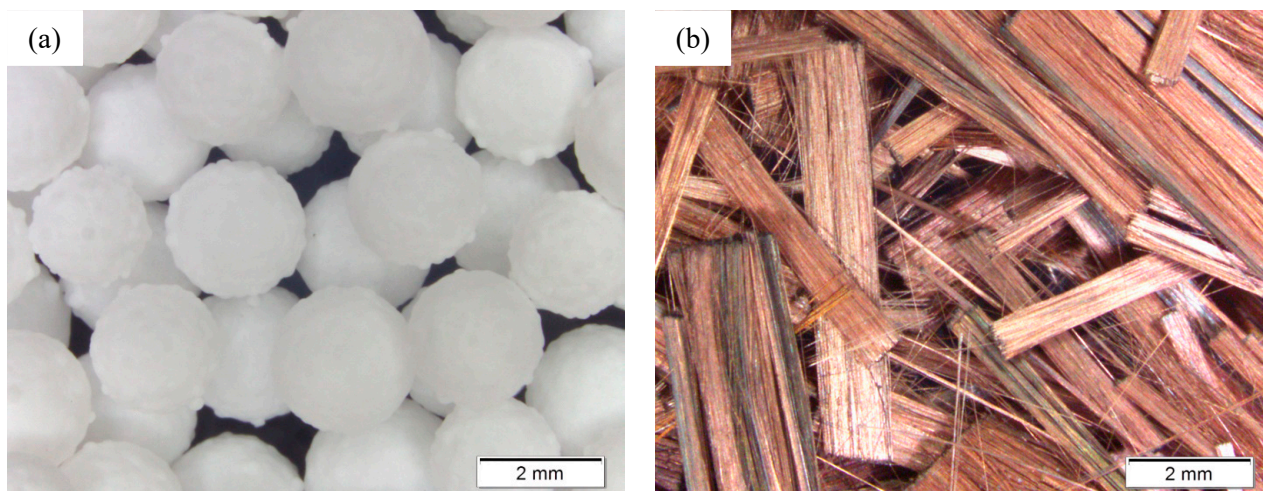
AlSi7Mg tömegszázalékos összetétele [9]

1. táblázat

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Egyéb
6,5 - 8,5	max. 0,2	max. 0,03	0,35 - 0,75	0,15 - 0,45	max. 0,03	max. 0,15	egyenként max. 0,05 összesen max. 0,15

Térkitöltő anyagként 2,5–3,0 mm átmérőjű, szitált üveghabot használtunk (1a ábra), amely kis sűrűsége révén hozzájárul a kompozit könnyűszerkezetes jellegéhez.

A szálerősítést rézzel bevont szénszál biztosította (1b ábra), amely a megfelelő felületi bevonatnak köszönhetően elősegíti a mátrix és az erősítőfázis közötti tapadást és a hatékony terhelésátadást.



1. ábra. Kutatás során használt üveghab (a) és erősítőanyag (b) sztereomikroszkopos felvétele

2.2. Gyártás

Az erősítőszálakat az üveghab részecskékhöz, 5 tömegszázalékos arányban kevertük. Referenciaként erősítőszál hozzáadása nélküli próbatesteket gyártottunk, a későbbi vizsgálatok összehasonlítási alapjául. A keveréket és a töltőanyagot egy acél tégelybe öntöttük. A tégely betöltése után a keverékeket felülről egy 1.4301 (X5CrNi18-10) jelű, 2,4 mm nyílású acélhálóval fedtük le annak érdekében, hogy az infiltráció során a kisebb sűrűségű térkitöltő szemcsék feluszását és az ebből adódó szerkezeti inhomogenitást megakadályozzuk.

Az előkészített tégelyeket 550 °C-ra hevítettük, majd ezen a hőmérsékleten 30 perces hűtést alkalmaztunk. Ezzel párhuzamosan az alumíniumötvözetet indukciós kemencében megolvastottuk, majd a teljes megolvadást követően a grafit-tégelyt 750 °C hőmérsékleten kiemeltük, az oxidréteget eltávolítottuk, és az olvadékat a tégelybe öntöttük. Az infiltrációt 5 bar nyomású argon gáz alkalmazásával végeztük.

A folyamat során az olvadt alumínium egyenletes leáramlása és a tégely egyenletes felmelegedése alapján megállapítható volt az infiltráció zavartalan lefolyása. Az eljárás befejezését követően a tégelyeket

termikus egyensúlyig hagyjuk lehűlni, majd a fémháb tömböt a tégely falától sérülésmentesen elválasztottuk. Az így előállított tömböket Struers Discotom 10 típusú precíziós vágógépen daraboltuk.

A próbatesteket ezt követően oldó hőkezelésnek vetettük alá, 300 °C/óra felfűtési sebességgel 535 °C-ra melegítettük, majd ezen a hőmérsékleten 4 órán át hőntartottuk őket. Ezt követően a mintákat vízben gyorsan lehűtöttük. Az öregítési szakaszban az anyagot 200 °C/óra sebességgel 150 °C-ra melegítettük, ahol 15 órán keresztül tartottuk, majd a folyamat végén ismét vízben hűtöttük le. [10]

A próbatestek hőkezelésére azért került sor, mert az anyagot a gyakorlatban jellemzően ebben az állapotban alkalmazzák, mivel a bemutatott hőkezelési ciklus megnöveli a szilárdságát.

A próbatestekből csiszolatot készítettünk. A felületet fokozatosan csökkenő szemcseméretű SiC csiszolópapírokkal (P60–P4000) csiszoltuk, majd 1 µm szemcseméretű alumínium-oxid tartalmú szuszpenzióval políroztuk tükörsima, vizsgálatra alkalmas felület kialakítása céljából.

2.3. Vizsgálati módszerek

A próbatestek mikroszerkezeti jellemzését fémmikroszkópos és sztereomikroszkópos vizsgálatokkal végeztük. A sztereomikroszkópos vizsgálatok során (Olympus SZX16) a minták felületi tulajdonságait, topográfiáját és hibáit elemeztük, kismértékű nagyítás mellett is valóság-hű képet nyerve a felületi egyenetlenségekről.

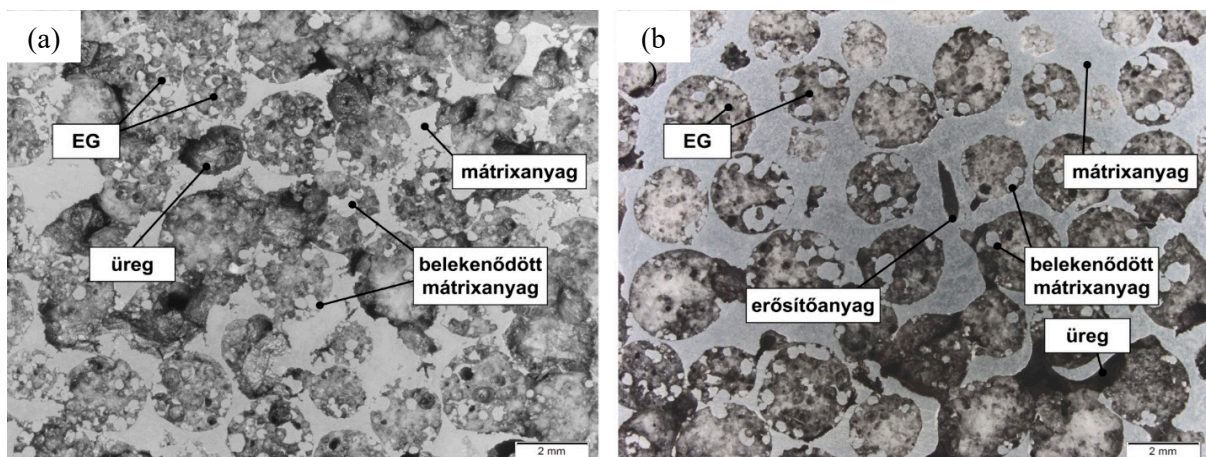
A fémmikroszkópos vizsgálatokat Olympus PMG-3 készülékkel végeztük, amely a mikroszerkezet és a póruseloszlás áttekinthető rögzítését biztosítja, alapot adva a későbbi elektronmikroszkópos elemzésekhez.

3. EREDMÉNYEK

A mikroszkópi vizsgálatok kiértékelését összehasonlító módon tesszük meg, a szállal erősített próbatesteket az erősítősál nélküli referenciamintákhoz hasonlítjuk.

Az erősítetlen és az erősített minták esetében is jelentős mennyiségű nem kívánatos porozitás volt megfigyelhető. Ennek oka, hogy magas hőmérsékleten (700 °C felett) az üveghab stabilitása csökken, és az alumíniummal történő infiltrálás során részben összetömrödik [11]. Ennek következtében a sűrűsége növekszik, miközben az alumínium megszilárdulása során zárványok alakulnak ki.

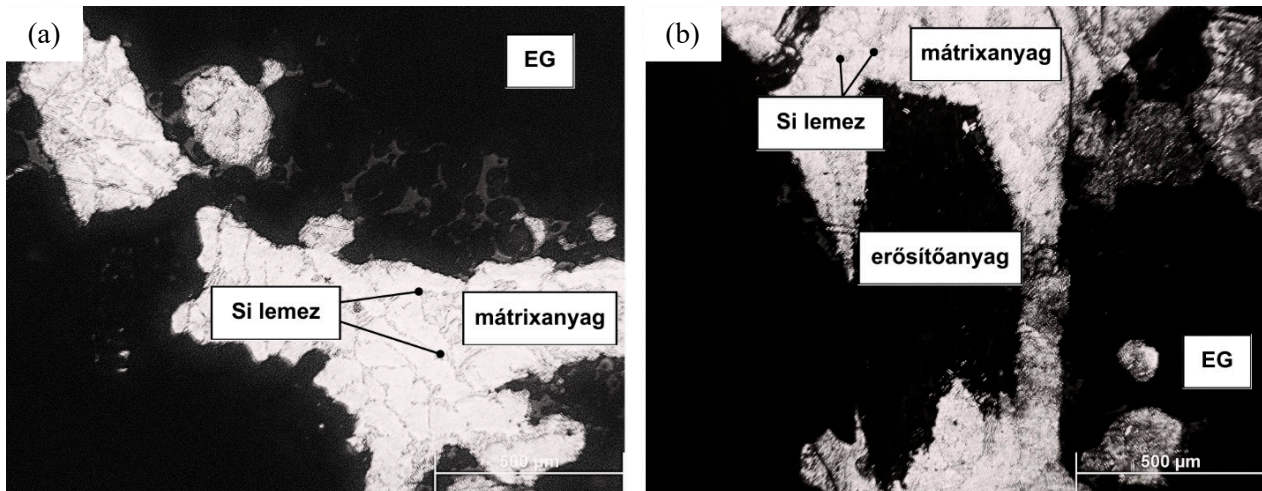
A szemcsék részleges alumíniummal való kitöltődése is megfigyelhető, azonban a mikroszkópos felvételeken látható részecskékben jelen lévő alumínium döntően a mintaelőkészítés során rákenődött anyagnak tekinthető. Mindazonáltal az üveghab térkitöltő anyag (EG jelöléssel) mindkét próbatestben egyenletesen és homogén módon oszlott el. Ennek ellenére mindkét esetben több üreg jelenlétét is tapasztaltuk.



2. ábra. Sztereomikroszkópos vizsgálat; referenciaminta (a), erősített minta (b)

A vizsgálatok során megfigyelhető az erősítősál jelenléte az erősített mintákban sztereomikroszkópos vizsgálattal (2. ábra) és fémmikroszkópos vizsgálattal (3. ábra) egyaránt. A mikroszkópos felvételek alapján az erősített mintákban a mátrix, a térkitöltő és az erősítőanyag egyértelműen elkülöníthető egymástól, ami a kompozit szerkezet sikeres kialakulását igazolja. Ugyanakkor egyes területeken nem kívánt porozitás, üregek is észlelhetők.

A nagyobb nagyítású fémmikroszkópos képeken a szilícium részecskék láthatóak, és a hőkezelés hatására jellemzően nem tús, hanem lemezes és gömbszerű morfológiával rendelkeznek, primer szilícium kiválások nem jellemzőek (3. ábra).



3. ábra. Fémmikroszkópos vizsgálat; referenciaminta (a), erősített minta (b)

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során szénszállal erősített szintaktikus fémhabokat gyártottunk, üveghab töltőanyaggal. A vizsgálati eredmények alapján megállapítható, hogy a térkitöltő és a mátrixanyag jól elkülöníthető egymástól, továbbá az erősítőszál az erősített mintákban egyértelműen azonosítható volt, és kedvező eloszlást mutatott. Ugyanakkor a mintákban nemkívánatos porozitás is megfigyelhető volt, ami arra utal, hogy a gyártási technológia további optimalizálást igényel, elsősorban az öntési hőmérséklet és a nyomás módosításával. Összességében azonban elmondható, hogy a térkitöltő anyagok nagyrészt egyenletesen oszlottak el a próbatestekben, és az erősítőszálak is megfelelően diszpergált állapotban voltak jelen.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetünket fejezzük ki a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszékének a kutatás elvégzéséhez szükséges laboratóriumi infrastruktúra, anyagok, valamint vizsgálati és mérőeszközök rendelkezésre bocsátásáért.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Smith BH, Szyniszewski S, Hajjar JF, Schafer BW, Arwade SR. Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties. *J Constr Steel Res* 2012;71:1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.10.028>.
- [2] Zewdie F, Srivastava A, Punia R, Bhatnagar N. Experimental investigation on the development of hybrid composite metal foam reinforced with steel hollow spheres for higher energy absorption applications. *J Manuf Process* 2024;123:60–82. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.05.046>.
- [3] Jang W-Y, Kyriakides S. On the crushing of aluminum open-cell foams: Part I. Experiments. *Int J Solids Struct* 2009;46:617–34. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.09.008>.
- [4] Ningzhen Wang és mtsai. Cell size controlling of closed-cell aluminum foams. *Journal of Materials Research and Technology* 2025;36:1294–313. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.03.151>.
- [5] Yan C és mtsai., Aluminum foam sandwich interface enhanced at micro-scale. *Appl Surf Sci* 2025;682:161662. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161662>.
- [6] Movahedi N, Murch GE, Belova I V, Fiedler T. Manufacturing and compressive properties of tube-filled metal syntactic foams. *J Alloys Compd* 2020;822:153465. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153465>.
- [7] C. Yan és mtsai., „Study on the regulation mechanism of interfacial mechanical properties of carbon fiber reinforced aluminum foam sandwich interface”, *Materials Science and Engineering: A*, köt. 900, o. 146484, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146484>

-
- [8] I. Duarte és J. M. F. Ferreira, „Composite and Nanocomposite Metal Foams”, Materials, köt. 9, sz. 2, 2016. <https://doi.org/10.3390/ma9020079>
- [9] MAGYAR SZABVÁNYÜGYI TESTÜLET, „MSZ EN 1706:2020+A1 Alumínium és alumíniumötvözetek. Öntvények. Vegyi összetétel és mechanikai tulajdonságok”, 2020. (Utolsó letöltés dátuma: 2026. 02. 21.)
- [10] Peng JH, Tang XL, He JT, Xu DY. Effect of heat treatment on microstructure and tensile properties of A356 alloys. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 2011;21:1950–6. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60955-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60955-2)
- [11] JSC Stikloporas. STIKLOPORAS Expanded Glass Technical Data Sheet 2021. (Utolsó letöltés dátuma: 2026. 02. 21.)