

Szálerősítéses ötvözetlen alumínium mátrixú, szintaktikus fémhabok mechanikai vizsgálata

Mechanical Investigation of Fibre-Reinforced, Unalloyed Aluminum-Matrix Syntactic Foams

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

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

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

Abstract

The mechanical properties of metal foams can be tailored over a wide range through appropriate selection of the matrix, filler, and reinforcing materials. The present study investigates the effect of fibre bundle reinforcement on the mechanical behavior of syntactic aluminum metal foams. The examined material consisted of an Al99.7 aluminum matrix, expanded clay aggregates as filler material, and randomly distributed copper-coated carbon fibre bundles as reinforcement. The random dispersion of the fibres was intended to achieve direction-independent mechanical properties. Based on quasi-static compression tests, the reinforced specimens exhibited significant improvements in crushing strength, plateau stress, and energy absorption capacity compared to the unreinforced reference samples, while the increase in density remained minimal.

Keywords: syntactic metal foam, aluminum matrix, fibre reinforcement, mechanical properties, energy absorption

Kivonat

A fémhabok mechanikai tulajdonságai széles tartományban alakíthatók a mátrix-, térkitöltő- és erősítőanyagok megválasztásával. Jelen kutatás a szálal erősítés hatását vizsgálja szintaktikus alumínium fémhabok mechanikai viselkedésére. A vizsgált anyag Al99,7 alumínium mátrixból, duzzasztott agyagkavics térkitöltőből és véletlenszerűen elosztatott, rézzel bevont szénszál erősítésből állt. A kvázi-statisztikus zömítővizsgálatok eredményei alapján az erősítés jelentős javulást eredményezett a törőszilárdságban, a platófeszültségben és az energiaelnyelő képességben, minimális sűrűsége-növekedés mellett.

Kulcsszavak: szintaktikus fémhab, alumínium mátrix, szálal erősítés, mechanikai tulajdonságok, energiaelnyelés

1. BEVEZETÉS

A cellás szerkezeteket egyre szélesebb körben alkalmazzák, az építőipartól [1] a gépjárműiparig [2], azonban jellemzően ezek az anyagok a felhasználás céljához igazított tulajdonságokkal bírnak. A fémhabok esetében a mechanikai tulajdonságok beállíthatók eltérő anyagi, méretű és mennyiségű térkitöltő anyagok [3] alkalmazásával. Ezen felül a mechanikai tulajdonságok (például törőszilárdság vagy energiaelnyelő-képesség) növelhetőek különböző erősítőanyagok alkalmazásával [4] [5] [6].

Ching Hao és munkatársai [7] tanulmányukban a rövidszál-erősítésű szintaktikus habok fejlesztését tekintették át, hangsúlyozva a száltartalom, a szálhossz és az orientáció meghatározó szerepét. Megállapították, hogy a szén- és üvegszálak hatékonyan növelik a nyomószilárdságot, azonban túlzott mennyiségük repedésindító hibák kialakulásához vezethet. A kritikus szálhosszt meghaladó méret javítja a terhelésátadást a mátrix és az erősítőfázis között. A természetes szálal rendszerek fenntarthatósági szempontból szintén ígéretes alternatívát jelentenek.

Zhuo-Kun Cao és munkatársai [8] rézzel bevont szénszálakkal erősített, zártcellás alumíniumhab előállítását tanulmányozták. A 0,35–1,70 térf.% száltartalmú kompozitokat 700 °C-on bekeveréses öntéssel homogenizálták. A rézbevonat javította a szálal nedvesíthetőségét és elősegítette azok egyenletes eloszlását a

mátrixban. A habosítást titán-hidrid (TiH_2) alkalmazásával végezték. Kimutatták, hogy a szénszálak a cellafalakban merevítő vázat alakítottak ki, amely gátolta a cellafalak felszakadását és a pórusok egyesülését. A nagyobb száltartalom (1,7 térf.%) finomabb és homogénebb cellaszervezetet, valamint jobb habstabilitást eredményezett, ugyanakkor már kis szálkoncentráció mellett is hatékony stabilizáló hatás volt megfigyelhető.

Liu és munkatársai [9] zártcellás Zn–22Al kompozit habokat vizsgáltak, amelyeket 3 térf.% Al_2O_3 rövid szálakkal erősítettek meg olvadákhabosítási eljárással, CaCO_3 gázképző alkalmazásával. A rövid szálak eloszlását pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) elemezték, míg a mechanikai viselkedést kvázi-statisztikus nyomóvizsgálatokkal jellemezték. Az eredmények szerint a Zn–22Al/ Al_2O_3 kompozit habok törőszilárdsága számottevően meghaladta a tiszta Zn–22Al ötvözet habokét. A kompozit habok nyomógörbéi egyenes, stabil platós szakaszt mutattak, és mind a nyomószilárdság, mind az energiaelnyelő-képesség sűrűségfüggő növekedése nagyobb mértékű volt, mint a szál nélküli ötvözet habok esetében.

Az áttekintett szakirodalom alapján a szálerősítés a fémhabokban javítja a cellafalak stabilitását, valamint növeli a nyomószilárdságot és az energiaelnyelő-képességet; a mechanikai teljesítményt elsősorban a száltartalom, a szálhossz és az eloszlás minősége határozza meg. Ugyanakkor nem találtunk példát agyagkavicsal töltött, szénszálás fémhab kompozitokra. Ezért jelen kutatásunk ezen anyagok alkalmazásával állítottunk elő próbatesteket.

2. ANYAGOK ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

2.1. Felhasznált anyagok

Mátrixanyagként Al99,7-et alkalmaztunk, amelynek kémiai összetételét az 1. táblázat tartalmazza.

Al99,7 összetétele tömeg%-ban kifejezve [10]

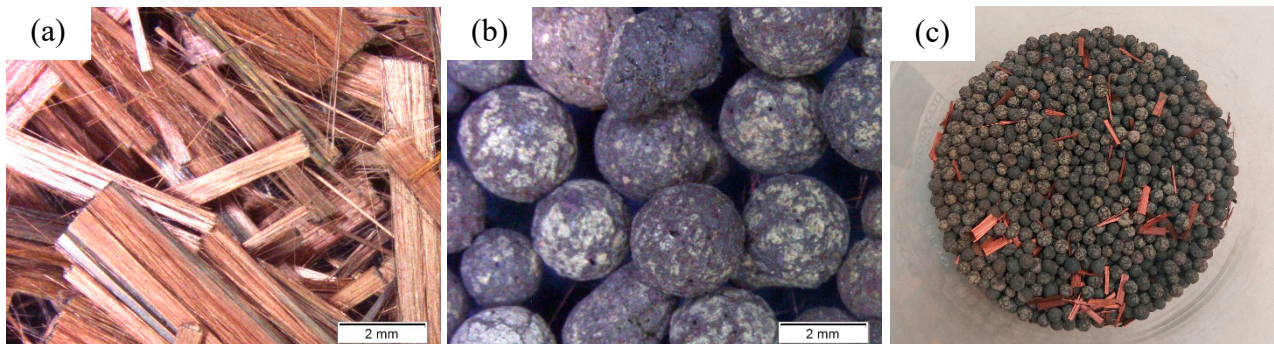
1. táblázat

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al	Egyéb
max. 0,1	max. 0,2	max. 0,01	max. 0,05	max. 0,02	max. 0,004	max. 0,04	min. 99,7	egyenként max. 0,03

Térkitöltőanyagként a Liapor GmbH által forgalmazott 3,0–3,5 mm átmérőjű duzzasztott agyagkavicsot (LECA) használtunk. Erősítőszálként pedig a Composite Materials, L.L.C. által forgalmazott rézzel bevont vágott szénszálakat alkalmaztunk. A szálak hossza $6,06 \pm 0,73$ mm és átmérője 7–10 μm volt.

2.2. Gyártás

Az erősítőszálakat 5 tömeg%-os arányban, a töltőanyaghoz kevertük hozzá. FDM 3D nyomtatással készítettünk egy saját tervezésű keverőfejet, amelyet akkumulátoros csavarbehajtóval hajtottunk meg, ezzel biztosítva, hogy a keverés hatékony és gyors legyen, mert egy sokáig tartó keverés során az erősítőszálak töredezhettek volna, ilyet azonban nem tapasztaltunk.



1. ábra. Erősítőanyag (balra), töltőanyag (középen), keverék (jobbra)

Az elkészült keveréket egy öntőtégelybe öntöttük figyelve, hogy ne szegregálódjanak az összetevők, ezek tetejére került egy elválasztó papírlap, majd referenciamintaként agyagkavicsot töltöttünk a tégelybe. Végezetül egy acélhálóval szorítottuk le a szemcséket, hogy azon ne ússzanak majd fel az olvadátkban kisebb sűrűségük révén.

Az elkészült tégelyt egy hőkezelő kemencében melegítettük és 550 °C-n hűtöttük 45 percig. Ezzel párhuzamosan egy indukciós kemencében megolvasztottuk a mátrixanyagot, amelyet aztán 750 °C-on öntöttünk a tégelybe. Ezt követően 5 bar nyomású argongázt engedtünk a rendszerre, hogy a töltőanyag és az erősítőanyag infiltrálódjon. Végül levegőn hagytuk kihűlni a tégelyt a további feldolgozás megkezdése előtt.

A mintaelőkészítés során a tégelyt eltávolítottuk a fémhabról, és a tömbből egy precíziós vágógépen 26 mm élhosszúságú kockákat munkáltuk ki. Végezetül egy marógépen az egymással szemközti oldalakat párhuzamossá munkáltuk, hogy a későbbi mérések során ne jelentkezzen szöghiba, a próbatestek végső méretei ezért változóak attól függően, hogy melyikből mennyit kellett lemunkálni.

2.3. Vizsgálatok

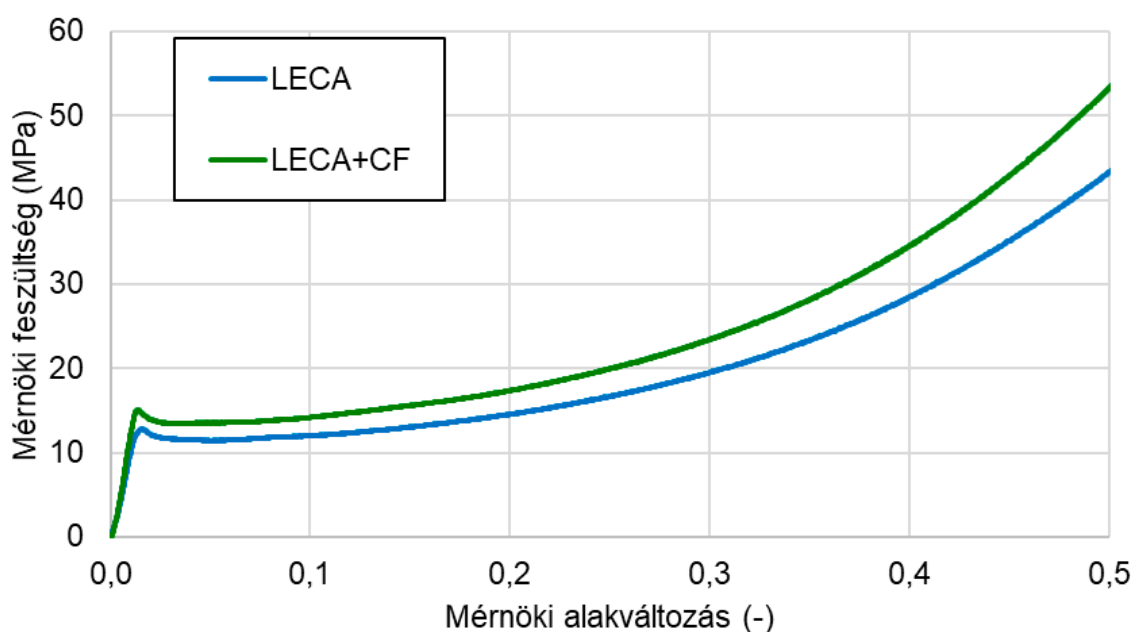
Meghatároztuk a próbatestek sűrűségét egy precíziós mérleg és egy tolmérő segítségével, hogy a zömítővizsgálat eredményeit sűrűsége fajlagosítva is össze tudjuk hasonlítani. A referenciaminták sűrűsége $1,385 \pm 0,025 \text{ g/cm}^3$, a szénszállal erősítetteké pedig $1,433 \pm 0,008 \text{ g/cm}^3$. A szénszállak alkalmazása kis mértékben növelte a sűrűséget, amely egy kisebb összporozítású, tömörebb szerkezetre utal, továbbá a rézbevonat sűrűsége is nagyobb, mint az alumíniumé.

Az egytengelyű kvázi-statisztikus zömítővizsgálatokat a ISO 13314:2011 szabványnak megfelelően végeztük el 50%-os mérnöki alakváltozásig, 3 mm/min keresztfej elmozdulási sebességgel, 3–3 darab próbatesten.

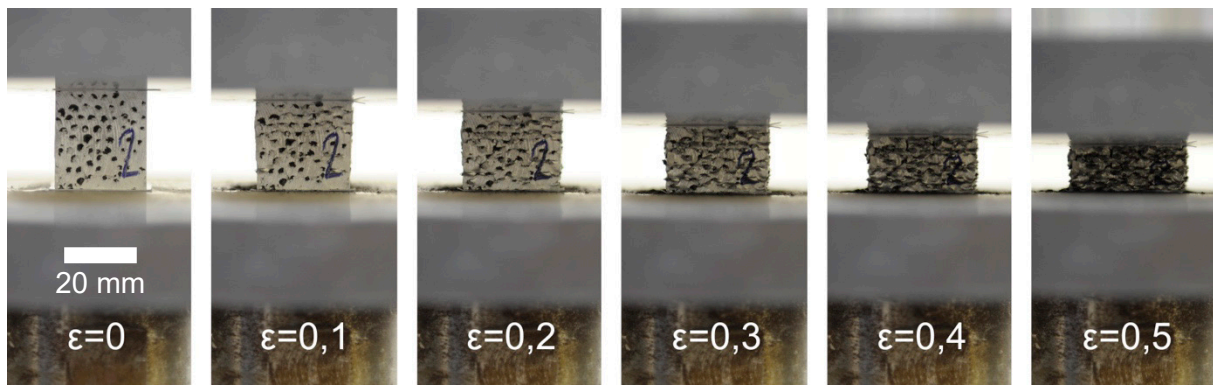
A mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozás diagramokon vizsgáltuk a törőszilárdságot (σ_c), amely az első lokális feszültségcsúcs feszültségértéke; a platófeszültséget (σ_p), amelyet a 20% és 30% közötti mérnöki alakváltozásokhoz tartozó feszültségértékek átlagolásával határoztunk meg; illetve az 50%-os mérnöki alakváltozásig elnyelt energiát (W_{50}), amely megegyezik a görbe alatti területtel.

3. EREDMÉNYEK

A mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozás görbék (2. ábra) mindegyike a fémhabokra jellemző klasszikus mechanikai viselkedést mutatta. A terhelés kezdeti szakaszában egy meredeken emelkedő régió figyelhető meg, amely a szerkezet rugalmas deformációját tükrözi. Ezt a növekvő szakaszt egy lokális maximum, vagyis a törőszilárdság elérése követi, amely a cellák elsődleges, lokális összeroppanásának felel meg. A görbék ezt követően egy kiterjedt, viszonylag lapos platórégióba mennek át, ahol a cellák egymás utáni összeomlása dominál, miközben a feszültség gyakorlatilag állandó marad, a mátrix pedig képlékenyen alakváltozik (3. ábra). Végül, körülbelül 40–50% alakváltozásnál, a feszültség ismét emelkedni kezd, ami a fémhab teljes összetömörödésének és a szilárd anyagként való viselkedés kialakulásának jele.

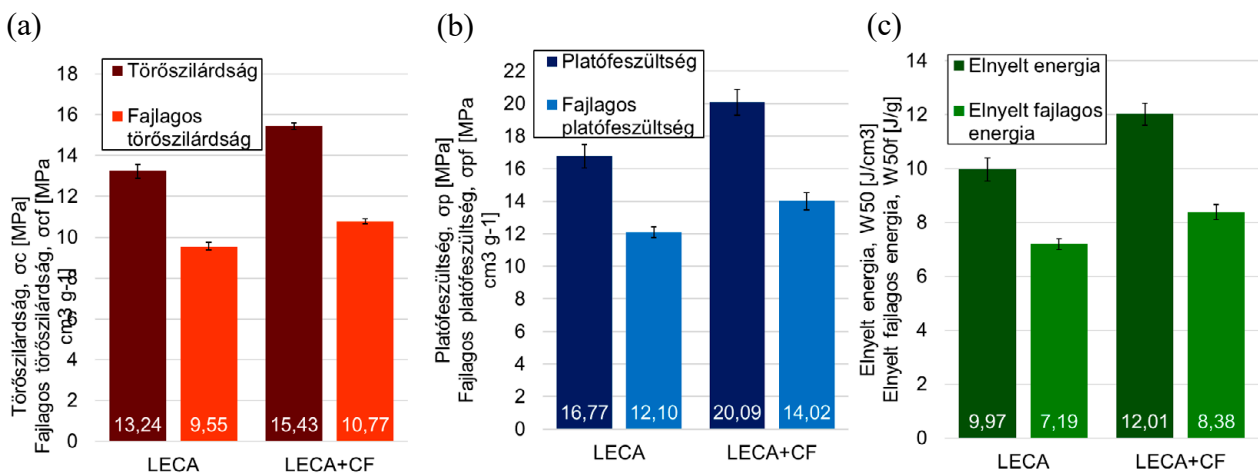


2. ábra. A zömítővizsgálatok átlagos mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozás diagramja



3. ábra. Különböző alakváltozáshoz tartozó felvételek zömítés közben

A nyomóvizsgálatok során meghatározott törőszilárdsági értékek alapján megállapítható, hogy a szénzálás erősítés hatása egyértelműen kedvező: az erősítőszálak alkalmazása növelte a fémhab kezdeti teherbírását (4. ábra (a)). A jelenség magyarázható azzal, hogy a rézbevonattal ellátott szénzálak hatékonyan késleltették a lokális mikrorepedések kialakulását, ezáltal mérsékelve a lokális feszültségkoncentrációk kialakulását, azonban ennek verifikálására mikroszkópi vizsgálatok is szükségesek.



4. ábra. A zömítővizsgálatok eredményei: törőszilárdság (a), platófeszültség (b) és elnyelt energia (c)

A platófeszültség értékei esetében szintén kimutatható volt a szénzál kedvező hatása (4. ábra (b)). A szénzálak alkalmazása növelte a platószakasz átlagos feszültség szintjét, ami arra enged következtetni, hogy a szénzál jelenléte késleltette a cellaszerkezetek lokális összeomlását, ezáltal stabilabb deformációs viselkedést eredményezett.

Az elnyelt energia értékei, mind abszolút, mind fajlagos formában szintén megerősítik a mechanikai tulajdonságok javulását. A szénzál erősítésű minták nagyobb energiaelnyelő képességet mutattak, ami arra utal, hogy a szénzálak nem csupán a teherbírás növeléséhez járultak hozzá, hanem a szerkezet disszipatív tulajdonságait is kedvezően befolyásolták (4. ábra (c)). Az energiaelnyelés fokozódása különös jelentőséggel bír, mivel ez a paraméter alapvető fontosságú energiaelnyelő szerkezeti elemek, például ütközésvédelmi komponensek tervezése és méretezése során.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálati eredmények alapján megállapítható, hogy a szénzál-erősítés alkalmazása az erősítetlen referenciamintákhoz viszonyítva számottevő mechanikai tulajdonságjavulást eredményezett. A törőszilárdság $16,60 \pm 3,19\%$ -kal, a platófeszültség $19,77 \pm 7,01\%$ -kal, míg az energiaelnyelés $20,53 \pm 6,78\%$ -kal növekedett, miközben a sűrűség emelkedése mindössze $3,44 \pm 1,95\%$ volt.

Az eredmények azt igazolják, hogy a szénzálak beépítése hatékony módszer a fémhabok teherbírásának és energiaelnyelő képességének fokozására anélkül, hogy jelentős tömegnövekedést okozna. A mechanikai teljesítmény arányos javulása a viszonylag csekély sűrűsége-növekedés mellett különösen kedvező a könnyűszerkezetes, energiaelnyelő alkalmazások szempontjából.

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] Saini D, Dokhaei B, Shafei B. Aluminum foam structural wall panels under single and repeated windborne debris impacts. *Journal of Building Engineering* 2025;116:114603. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114603>.
- [2] Garai F, Béres G, Weltsch Z. Development of tubes filled with aluminium foams for lightweight vehicle manufacturing. *Materials Science and Engineering: A* 2020;790:139743. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139743>.
- [3] Wu Y, Guo Y, Yi S, Lv Z, Fan Z. Impact Resistance of Aluminum Foam Composites with Filler and Coating Materials. *Polymers (Basel)* 2024;16. <https://doi.org/10.3390/polym16233286>.
- [4] Ching Hao L, Abdan K. Effect of Short Fibers Reinforcement in Syntactic Foam: A Review. *J Phys Conf Ser* 2020;1529:32097. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1529/3/032097>.
- [5] Ding X, Qian H, Su G, Hu X, Liu Y, Peng G, et al. Reinforcement effect of fly ash with different morphologies on aluminum foam prepared via powder metallurgy. *Powder Technol* 2024;443:119944. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119944>.
- [6] Tete PR, Gupta MM, Joshi SS. Aluminium metal foam production methods, properties and applications- a review. *Mater Today Proc* 2023;77:673–9. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104041>.
- [7] ching hao L, Abdan K. Effect of Short Fibers Reinforcement in Syntactic Foam: A Review. *J Phys Conf Ser* 2020;1529:32097. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1529/3/032097>.
- [8] Cao ZK, Li B, Yao GC, Wang Y. Fabrication of aluminum foam stabilized by copper-coated carbon fibers. *Materials Science and Engineering: A* 2008;486:350–6. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.09.013>.
- [9] Liu J, Yu S, Zhu X, Wei M, Li S, Luo Y, et al. Effect of Al₂O₃ short fiber on the compressive properties of Zn–22Al foams. *Mater Lett* 2008;62:3636–8. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2008.04.013>.
- [10] MAGYAR SZABVÁNYÜGYI TESTÜLET. MSZ EN 1706:2020+A1 Alumínium és alumíniumötvözetek. Öntvények. Vegyi összetétel és mechanikai tulajdonságok 2020.