



Alternatív eljárás irányított szállal erősített szintaktikus fémhabok gyártására

An Alternative Process for the Production of Oriented Fibre Reinforced Syntactic Metal Foams

Szovák Benedek,^{1,2,a} Kemény Alexandra,^{1,2,b} Orbulov Imre Norbert^{1,2,c}

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, szovak.benedek@edu.bme.hu

² MTA-BME Lendület Nagyteljesítményű Kompozit Fémhabok Kutatócsoport, Budapest, Magyarország

^a szovak.benedek@edu.bme.hu, ^b kemeny.alexandra@gpk.bme.hu, ^c orbulov.imre.norbert@gpk.bme.hu

Abstract

Metal foams are cellular materials with outstanding specific mechanical properties, such as high specific energy absorption capacity, owing to its cellular structure. Metal foams are cellular materials with good specific mechanical properties, such as high specific energy absorption, owing to the metal matrix. The aim of this study is to simplify the reinforcement of syntactic metal foams with directional fibres. In previous studies, the fibres were positioned using an external orientation frame. To avoid this, reinforcing material layers in a prefabricated mesh form were placed in the crucible, which is thus perpendicular to the direction of the casting. The fabrication resulted in syntactic metal foam samples reinforced with fibres oriented along two axes.

Keywords: *metal foam, syntactic foam, fibre reinforcement.*

Összefoglalás

A fémhabok cellás szerkezetű anyagok, amelyek a fém mátrixnak köszönhetően jó fajlagos mechanikai tulajdonságokkal, például nagy fajlagos energiaelnyelő képességgel rendelkeznek. A kutatás célja a szintaktikus fémhabok irányított szállal történő megerősítésének egyszerűsítése. Korábbi vizsgálatok során a szálakat egy külső orientáló keret segítségével helyeztük el. Ennek elkerülése érdekében előre elkészített hálós formában helyeztük el az erősítőanyag-rétegeket, amelyek így merőlegesek az öntés irányára. A gyártás eredményeként két tengely mentén irányított szállal erősített szintaktikus fémhabmintákat kaptunk.

Kulcsszavak: *fémhab, szintaktikus fémhab, szálerősítés.*

1. Bevezetés

Napjainkban egyre növekszik az igény olyan anyagokra, amelyek kis sűrűség mellett nagy szilárdságúak. Hagyományos anyagokkal, például fémekkel és kerámiákkal ezek az egyre szigorúbb elvárások nem minden esetben teljesíthetőek.

Két irányból közelíthető meg a probléma: vagy a nagy szilárdságú anyagok tömegét kell csökkenteni, vagy a kis tömegű anyagok szilárdságát növelni. Ezekre alkalmas a kompozit anyagok alkalmazása, amelyek ötvözik a nagy szilárdságú és a kis tömegű anyagokat oly módon, hogy azok kompenzálják egymásnak a támasztott igények-

kel szembeni hiányosságait, miközben kihasználják az előnyeiket.

1.1. Kompozitok

A kompozit anyag olyan anyagok kombinációja, amelyek összetételükben vagy formájukban makroszinten különböznek egymástól. Az alkotóelemek megtarthatják identitásukat. Általában az alkotórészek fizikailag azonosíthatók, és van közöttük egy határfelület [1]. Az alkotórészek a nagy szilárdságú erősítőanyag, amely képes felvenni a terhelést, míg a mátrixanyag összefogja az erősítőanyag egységeit, továbbítja a terhelést azok-

nak, illetve védi azokat a környezeti hatásokkal szemben. A két fő alkotórész közti kapcsolat nagy jelentőséggel bír, a kialakuló kötés erőssége befolyásolja a kompozit viselkedését. Kialakulhat átmeneti réteg, ennek hatása azonban sok esetben nem előnyös a felhasználás szempontjából [2–4].

Alumínium mátrixú kompozitok esetén vizsgálják különböző erősítőanyagok hatását, ezek az erősítőanyagok lehetnek szemcséként, szálakként, szálkötegekként vagy paplan formában alkalmazva [5–7]. A szálerősítés esetén lehet vágott, rövid szál, ami véletlenszerű elrendeződése miatt a szemcsékhez hasonlóan minden irányban ugyanolyan mértékben fejti ki hatását. Valamint lehet irányított szállal erősített a kompozit [8, 9], ebben az esetben csak a szálak tengelyének irányába fejti ki hatást az erősítőanyag, de nagyobb mértékű az erősítő hatás.

1.2. Fémhabok

A fémhabok olyan cellás szerkezetű anyagok, amelyekbe nem erősítőanyagot alkalmaznak, hanem cellás belső szerkezetet alakítanak ki a tömeg csökkentése érdekében [10]. A belső cellás szerkezet alapján csoportosíthatóak nyílt cellás szerkezetű habokra, amelyekben a belső cellák átjárhatóak [11], illetve zárt cellás szerkezetű habokra, amelyekben az egyes cellákat cellafal választja el egymástól [12]. A zárt cellás szerkezetű habok alcsoportját képezik a szintaktikus habok, ezekben a porózus szerkezetet töltőanyagként az olvadt mátrixba történő bejuttatásával alakítják ki [13]. A szintaktikus fémhabok a kompozit anyagok csoportjába tartoznak. A kis sűrűség miatt nagy fajlagos mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, azonban a cellás szerkezet miatt húzó igénybevételnek nem állnak ellen.

1.3. Célkitűzés

Korábbi kutatásainkban [14, 15] az öntés irányával párhuzamosan elhelyezett szálerősítést vizsgáltuk a húzással szembeni igénybevétel növelése érdekében. Azonban ennek a struktúrának a létrehozása egy bonyolult gyártási eljárást vont maga után. Ebben a munkában egy egyszerűsített gyártási eljárás lehetőségét vizsgáltuk, aminek eredményeképpen két tengely mentén irányított szállal erősített szintaktikus fémhabmintákat kaptunk.

2. Felhasznált anyagok

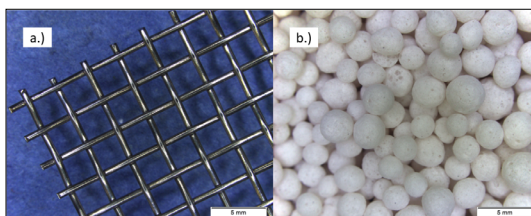
Mátrixanyagként Al99,5 kohóalumíniumot választottunk nagy képlékenysége miatt. Az alumínium pontos összetételét WAS PMI-MASTER SORT

optikai spektrométerrel (Worldwide Analytical Systems AG, Uedem, Németország) mértük meg, az összetételt mutatja be az **1. táblázat**.

1. táblázat. Az Al99,5 mátrixanyag átlagos összetétele

Elem	Tömeg %
Al	99,5
Si	0,0293
Fe	0,335
Cu	<0,0050
Mn	<0,0050
Mg	<0,0010
Zn	0,0100
Cr	<0,0050
Ni	0,0108
Ti	<0,0010
Sn	0,0367

Cellaképző anyagként $\varnothing 2,87 \pm 0,50$ mm méretű duzzasztott üveggyöngyöt használtunk, amelyet a Stikloporas cégtől (Stikloporas UAB, Druskinikai, Litvánia) szereztünk be. Erősítőanyagként 1.4307 (X2CrNi18-9) rozsdamentes acél hálót alkalmaztunk $\varnothing 0,64 \pm 0,02$ mm szálátmérővel, ezt a Jurotissu Kft.-től (Jurotissu Kft., Budapest, Magyarország) szereztük be. Az erősítőhálót és a töltőanyagot mutatja az **1. ábra**.



1. ábra. a) Erősítőháló és b) töltőanyag

3. Egyszerűsített gyártási eljárás

A töltőanyagot, illetve az erősítőanyagot $60 \times 60 \times 380$ mm befoglaló méretű, 2 mm falvastagságú szénacél téglába rétegeztük. Az erősítőanyagként felhasznált hálódarabok egymástól az öntés irányának tengelyén vett távolságát a töltőanyag térfogatának alapján mértük ki: a 10 mm magas töltőanyagréteg elméleti térfogata 31,36 ml. Ezt a kivitelezés során 31 ml-re kerekítettük, amelyet mérőhenger segítségével mértünk ki. Ennek a töltőanyag-mennyiségnek a betöltése után kézi rezgetést alkalmaztunk, hogy a felület merőleges legyen az öntés tengelyére. Ezt hét alka-

lommal ismételtük meg, majd az utolsó hálóréteg fölé referenciaminták készítéséhez 95 ml (30 mm vastag réteg) töltőanyagot helyeztünk. A rétegzés lépéseit a **2. ábra** mutatja be.

Az elkészült töltetet felülről szintén acélhálóval zártuk le, hogy megakadályozzuk a töltőanyag-részecskék infiltrálás közbeni elmozdulását. A tégelyt 550 °C-ra hevítettük Prothermo Hoffmann B-70 típusú kamrás kemencében (Prothermo Hoffmann Kft., Kecskemét, Magyarország), és ott 1,5 órán át hőn tartottuk. A mátrixot Inductor IF-15 típusú indukciós olvasztókemencében (Inductor Kft., Diósd, Magyarország) 750 °C-ra hevítettük. Az olvadék hőmérsékletét Maxthermo MD-3003 K típusú (MAXIMUM ELECTRONIC CO., LTD., Taipei Hsien) hőmérővel mértük. Az olvadt mátrixot beleöntöttük a tégelybe, majd 400 kPa (4 bar) nyomással, argongázzal elvégeztük az infiltrálást. A tégelyt szabad levegőn hűtöttük szobahőmérsékletre.

Az elkészült tömbből próbatesteket munkáltunk ki, amelyek közül egyeseket csiszoltunk P80-P4000 csiszolópapírral és políroztunk 1 µm szemcseméretű gyémántsuszpenzióval mikroszkópi vizsgálat céljára.

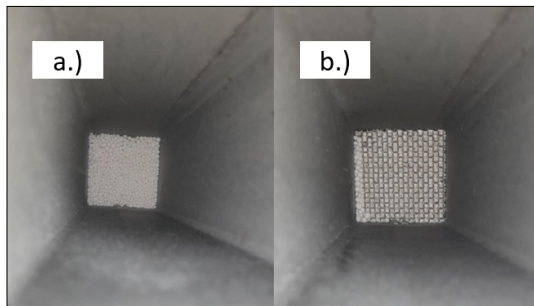
4. Eredmények

A sűrűséget a geometriai méretek és a tömeg alapján határoztuk meg. Ennek értéke az erősített mintákesetén $1,63 \pm 0,06 \text{ g/cm}^3$, az erősítőszálakat nem tartalmazó referenciaminta esetén $1,26 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$. Az erősítőszálak alkalmazása 23%-ban növelte a sűrűséget.

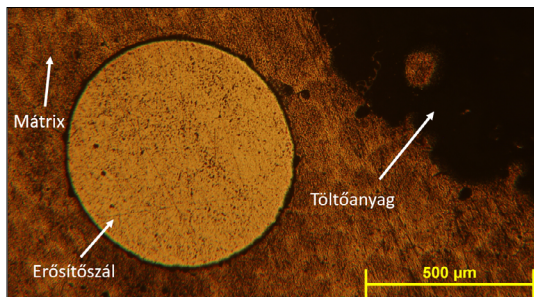
Az elkészült szerkezet fémmikroszkópi felvételét mutatja a **3. ábra**. Az elhelyezett erősítőhálórétegek távolságát sztereomikroszkópi felvételen határoztuk meg az egymáshoz az öntés tengelye mentén legközelebb elhelyezkedő szálak között, ezt szemlélteti a **4. ábra**. A szálak átlagos távolsága $9,55 \pm 0,55 \text{ mm}$. Ez a tervezett 10 mm-es távolságtól való eltérést a töltőanyag térfogatának kimérése során fellépő kerekítés, mérési pontatlanság és a tégely nagyobb felülete miatti jobb tömörödés okozza.

5. Következtetések

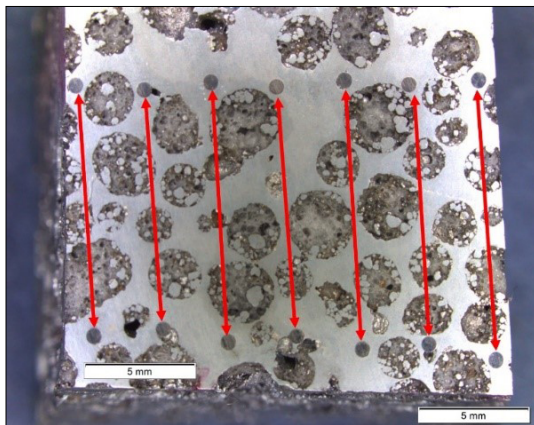
- A kutatás során megállapítottuk a következőket:
- a kisnyomású infiltrálás (400 kPa) alkalmas eljárás irányított szállal erősített szintaktikus fémhab előállítására;
 - az alkalmazott eljárás jelentősen leegyszerűsíti a gyártást az eddigi kutatásokban alkalmazott módszerekhez képest;



2. ábra. a) A töltőanyagréteg és b) az erősítőháló elhelyezése a tégelyben



3. ábra. Acélhálóval erősített szintaktikus fémhab szerkezetének keresztmetszeti képe



4. ábra. Erősítőrétegek szálai közti távolság szemléltetése keresztmetszeti képen

- az elkészült szerkezet érdemes további vizsgálatok elvégzésére, elsősorban a szakítási és a zömítési tulajdonságok feltérképezése érdekében;
- az előre elkészített háló erősítőanyagként történő alkalmazása érdemes további vizsgálatokra, nagyobb méretű darabok esetén az öntés irányával párhuzamos szálorientációval a szakítási és hajlítási tulajdonságok vizsgálatához.

Köszönetnyilvánítás

A publikációt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatala támogatta az EKÖP-24-3-BME-4 ösztöndíjpályázat keretein belül.

Ezt a munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatta az OTKA-FK_21 138505 támogatási szerződés keretében.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] ISO 21347:2005 – Space systems – Fracture and damage control, 2005.
- [2] Kumar N., Chittappa H. C., Ezhil Vannan S.: Development of Aluminium-Nickel Coated Short Carbon Fiber Metal Matrix Composites. *Materials Today: Proceedings*, 5. (2018) 11336–11345. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.100>.
- [3] Máté P., Szekrényes A.: The Effect of the Layout on the Stability of Composite Cylindrical Shells. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 68/4. (2024) 291–303. <https://doi.org/10.3311/PPme.23424>.
- [4] Kun K., Bata A., Ronkay F.: Investigation of the Replication Quality of Microstructures on Injection Moulded Specimens Made from Recycled Polypropylene Composites Reinforced with Carbon Nanotubes. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 68/3. (2024) 247–53. <https://doi.org/10.3311/PPme.37288>.
- [5] Zaiemyekheh Z., Liaghat G. H., Ahmadi H., Khan M. K., Razmkhah O.: Effect of strain rate on deformation behavior of aluminum matrix composites with Al₂O₃ nanoparticles. *Materials Science & Engineering A* 753. (2019) 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.052>.
- [6] Vijayaram T. R., Sulaiman S., Hamouda A. M. S., Ahmad M. H. M.: Fabrication of fiber reinforced metal matrix composites by squeeze casting technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 178. (2006) 34–8. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.026>.
- [7] Bedmar J., Torres B., Rams J.: Manufacturing of Aluminum Matrix Composites Reinforced with Carbon Fiber Fabrics by High Pressure Die Casting. *Materials*, 15. (2022) <https://doi.org/10.3390/ma15093400>.
- [8] Zhao H., Yuan T., Zeng C., Peng W., Sun Z., Hu H.: Microstructure and mechanical properties of steel wire reinforced Mg matrix composites fabricated by composite extrusion. *Composites Communications*, 43. (2023) 101711. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2023.101711>.
- [9] Almeida J. H. S., Miettinen A., Léonard F., Falzon B. G., Withers P. J.: Microstructure and damage evolution in short carbon fibre 3D-printed composites during tensile straining. *Composites Part B*, 292. (2025) 112073. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.112073>.
- [10] Marx J., Rabiei A.: Overview of Composite Metal Foams and Their Properties and Performance. *Advanced Engineering Materials*, 19. (2017) 1–13. <https://doi.org/10.1002/adem.201600776>.
- [11] Johnson Q. C., Kenesei P., Petruzza S., Plumb J., Sharma H., Park J. S. és mtsai.: Mapping 3D grain and precipitate structure during in situ mechanical testing of open-cell metal foam using micro-computed tomography and high-energy X-ray diffraction microscopy. *Materials Characterization*, 195. (2023) 112477. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112477>.
- [12] Naeem M. A., Gábora A., Mankovits T.: Influence of the manufacturing parameters on the compressive properties of closed cell aluminum foams. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 64. (2020) 172–8. <https://doi.org/10.3311/PPME.16195>.
- [13] Kincses D. B., Károly D., Bukor C.: Production and testing of syntactic metal foams with graded filler volume. *Materials Today: Proceedings*, 45. (2020) 4225–4228. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.163>.
- [14] Szovák B., Maróti J. E., Kemény A., Orbulov I. N.: Unidirectional fibre reinforcement of syntactic metal foams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1313. (2024). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1313/1/012005>.
- [15] Szovák B., Kemény A., Orbulov I. N.: Unidirectional steel wire reinforced metal matrix syntactic foams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1319. (2024). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1319/1/012007>.