

AlSi₇Mg mátrixanyagú szintaktikus fémhabok mechanikai és mikroszerkezeti vizsgálata

Mechanical and microstructural investigation of syntactic metal foams with an AlSi₇Mg matrix

PRÉMUS Karina¹, GÁBRIEL Bálint¹, SZOVÁK Benedek^{1,2} MARÓTI János Endre^{1,2}

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 1111 Budapest Műegyetem rakpart 3., +36 1 463-1111, +36 1 463-1110, info@bme.hu, www.bme.hu

² MTA-BME Lendület Nagyteljesítményű Kompozit Fémhabok Kutatócsoport, 1111 Budapest Bertalan Lajos utca 7., +36 1 463-2386, orbulov.imre.norbert@gpk.bme.hu, www.att.bme.hu/en/rdi/lendulet-2/

Abstract

Due to the demand for strong yet lightweight structural elements, cellular structures such as metal foams are receiving increasing attention in engineering research. Syntactic metal foams are closed-cell materials where porosity is created by regularly arranged hollow microspheres embedded in the matrix. In our research, we examined AlSi₇Mg aluminum alloy-based syntactic metal foams, incorporating Al₂O₃ or SiC particles as an additional reinforcing phase alongside the microspheres. We measured and analyzed their mechanical properties and microstructure.

Keywords: cellular structures, AlSi₇Mg aluminum alloy-based syntactic metal foams, Al₂O₃ and SiC particles, mechanical properties, microstructure

Kivonat

Az erős, de könnyű szerkezeti elemek iránti igény miatt a mérnöki kutatásokban egyre nagyobb figyelmet kapnak a cellás szerkezetek, például a fémhabok. A szintaktikus fémhabok olyan zárt cellás anyagok, amelyek porozitását a mátrixba ágyazott, szabályosan elrendezett gömbhéjak biztosítják. Kutatásunk során AlSi₇Mg alumíniumötvözet alapú szintaktikus fémhabokat vizsgáltunk, amelyekben a gömbhéjak mellett erősítőanyagként Al₂O₃ vagy SiC szemcséket is alkalmaztunk és vizsgáltuk mechanikai tulajdonságaikat és mikroszerkezetüket.

Kulcsszavak: cellás szerkezetek, AlSi₇Mg alumíniumötvözet alapú szintaktikus fémhab, Al₂O₃ és SiC szemcsék, mechanikai tulajdonságok, mikroszerkezet

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt években a cellás szerkezetek vizsgálata kiemelt jelentőségű mérnöki kutatási területté vált, mivel ezek az anyagok kis sűrűségük ellenére kedvező mechanikai tulajdonságokat mutatnak, így kiválóan alkalmazhatók például az építőiparban vagy a járműiparban.

Ezen anyagok egyik jelentős csoportját a fémhabok alkotják, amelyek mátrixból és erősítőanyagból épülnek fel, ezért kompozit anyagoknak tekinthetők. A fémhabok szerkezeti felépítésük alapján két fő kategóriába sorolhatók: nyílt és zárt cellás változatokra. A nyílt cellás fémhabok esetében a pórusok között nincs anyaghatár, míg a zárt cellás fémhabok pórusai egymástól teljesen elhatárolódnak.

Kutatásunk középpontjában szintaktikus fémhab próbatestek állnak. Szintaktikus fémhabokról akkor beszélhetünk, ha a mátrix anyaga fém. Az elmúlt években számos különböző erősítést és eljárást fejlesztettek ki a szerkezeti teljesítmény növelése érdekében. Szakirodalmi áttekintésünkben ezen kutatások legjelentősebb eredményeit ismertetjük.

Sivananthan és munkatársai [1] szilícium-karbiddal megerősített alumínium mátrixú kompozitokat tanulmányoztak. A 6061 alumíniumötvözetből keverékes öntéssel, 750 °C-on, 0-4 tf% kerámia erősítőanyag hozzáadásával állították elő az anyagot. Az elkészült öntvényből különféle próbatesteket készítettek keménység-, zömítő- és szakítóvizsgálatokhoz. Arra a következtetésre jutottak, hogy az alumínium

mátrixban alkalmazott szemcsés kerámia erősítőanyag kedvezően befolyásolja a vizsgált mechanikai tulajdonságokat.

Liwen Pan és társai [2] 1–2 mm átmérőjű alumínium-oxid üreges gömböket töltöttek meg 6061 Al ötvözzel gravitációs beszivárgásos öntéssel, hogy Al-mátrixú szintaktikus habokat állítsanak elő. Vizsgálták a beszivárgási hőmérséklet és a hőkezelés hatását a habok mikroszerkezetére, nyomószilárdságára és energiaelnyelő képességére. A kísérletek szerint a 770–830 °C közötti hőmérsékleten kiváló minőségű habok szintetizálhatók, ahol a részecskék szorosan kötődnek a mátrixhoz. Az átlagos sűrűség 1,66 g/cm³, a porozitás 37,47% volt. A legnagyobb energiaelnyelő képességet az öntött haboknál 770 °C-on mérték (41,11 MJ/m³ és 23,63 kJ/kg), míg a hőkezelt mintáknál a legjobb értékeket az oldatos öregítés után kapták (48,92 MJ/m³ és 31,36 kJ/kg). Az eredményeket más Al-mátrixú szintaktikus habokkal összevetve megállapították, hogy a gravitációs beszivárgással készült habok egyenrangúak vagy jobbak más módszerekkel előállított haboknál.

Ming Ming Su és munkatársai [3] alacsony sűrűségű (2,03 g/cm³) fémmátrixú szintaktikus habokat készítettek keverékes öntéssel, alumínium-oxid üreges gömbök (1,0–1,5 mm) és ZL111 alumíniumötvözet felhasználásával. A kalciumrészecskék növelték az olvadék viszkozitását, biztosítva a gömbök elmerülését. A mikroszerkezet és nyomószilárdság vizsgálata során megállapították, hogy a gömbök egyenletesen oszlanak el a mátrixban. A nyomófeszültség-alakváltozás görbéje három szakaszból áll: rugalmas, platófázis és tömörödési szakasz. A nyomószilárdság 85 MPa, a platófeszültség 75 MPa volt. A törés fő okai szerintük a gömbök összeomlása és nyírási sávok kialakulása volt.

Kutatásunk során AlSi7Mg mátrixanyagú zárt cellás fémhabot gyártottunk, erősítőanyag nélkül és szilícium-karbid, valamint alumínium-oxid szemcsés erősítőanyagokkal. Az elkészített próbatesteket mikroszkópi és egytengelyű kvázi-statisztikus zömítővizsgálatnak vetettük alá.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

2.1. Felhasznált anyagok

A mátrixanyagunk AlSi7Mg jelölésű alumíniumötvözet volt, kiváló mechanikai és öntési tulajdonságai miatt választottuk.

Az ötvözet térfogatszázalékos összetétele [4]

1. táblázat

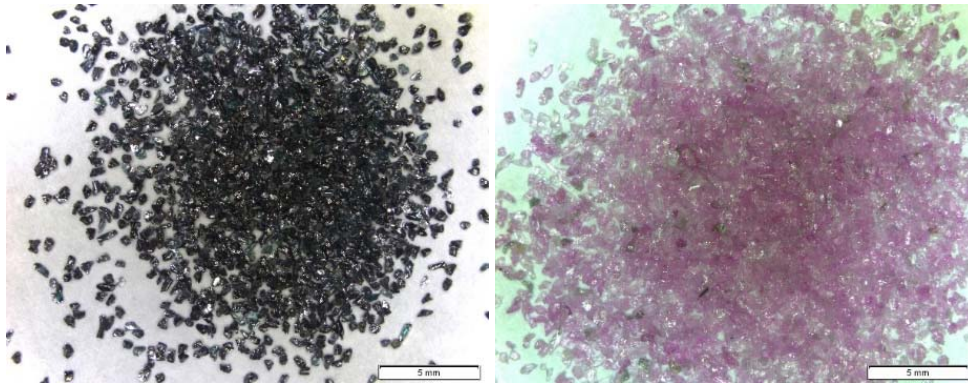
Fe	Si	Mn	Ni	Ti	Cu	Pb	Mg	Zn	Sn	Egyéb
max. 0,55	6,5 - 7,5	max. 0,35	max. 0,15	max. 0,25	max. 0,2	max. 0,15	0,2 - 0,65	max. 0,15	max. 0,05	egyenként 0,05 összesen 0,15

A próbatestjeink porozitását a Hollomet GmbH által gyártott kerámia gömbhéjak (CHS) biztosították. A töltőanyagról készült sztereomikroszkópos (Olympus SZX16) felvétel az 1. ábrán látható.



1. ábra: Kutatás során használt kerámia gömbhéjak

Erősítőanyagként 0,4 mm átmérőjű szilícium-karbid (SiC) és 0,6 mm átmérőjű alumínium-oxid (Al_2O_3) szemcséket használtunk a kutatás során, az ezekről készült sztereomikroszkópos képek a következő ábrán láthatóak (2. ábra).



2. ábra: Kutatás során használt erősítőanyagok; szilícium-karbid (balra) és alumínium-oxid (jobbra)

2.2. Gyártás

A próbatestjeink gyártása vákuum infiltrálással történt, melyet megelőzően kézi keveréssel a töltő- és az erősítőanyagokat összekevertük, majd S235JR szerkezeti acélból készített tégelybe öntöttük rétegezéssel. Miután a keverék belekerült a tégelybe, felülről acélhálóval lezártuk annak érdekében, hogy a mátrixanyaghoz képest kis sűrűségű töltőanyag szemcsék ne jöhessenek a felszínre, inhomogenitást okozva.

A tégelyt a vákuumkemencében felfűtöttük 500 °C-ra és 2,5 órán keresztül hőn tartottuk, közben a kemencében felépült a megfelelő vákuum. Ezt követően 750 °C-ra emeltük a hőmérsékletet és 1 órán keresztül ismét hőn tartottuk, amely során megolvasztottuk a mátrixanyagunkat. Utolsó lépésként argon gázt juttattunk a vákuumkemencébe 500 kPa nyomáson, 5 másodpercig, hogy elősegítsük az olvadt mátrixanyag infiltrációját a keveréken keresztül.

2.3. Vizsgálatok

Elsősorban próbatestjeinket optikai vizsgálatokkal, fémmikroszkóppal (Olympus PMG 3) elemeztük, hogy megállapíthassuk a gyártás sikerességét.

Másodsorban sűrűségmérést is végeztünk próbatestjeinken, amelynek célja az anyag belső szerkezetének és tömörségének vizsgálata volt.

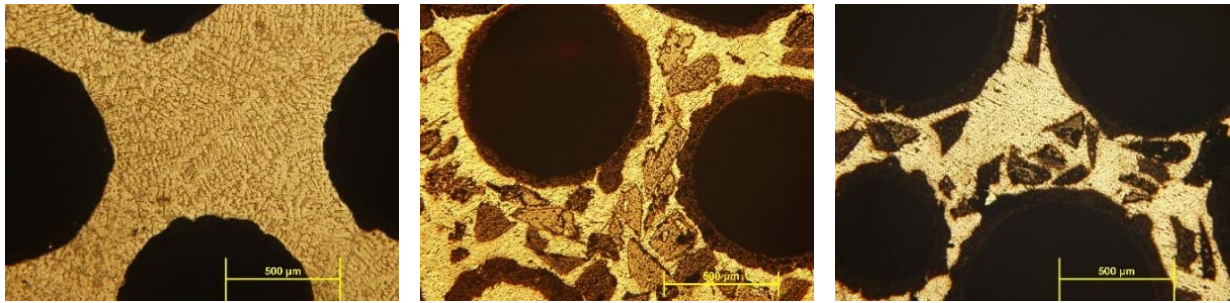
Harmadsorban próbatestjeink mechanikai tulajdonságait kvázi-statisztikus zömítővizsgálatnak vetettük alá. A vizsgálat során erő és keresztfej elmozdulás adatpárokat rögzítettünk, amelyek segítségével – a kiindulási keresztmetszet és magasság figyelembevételével –, mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozás diagramokat állítottunk össze.

3. EREDMÉNYEK, KONKLÚZIÓ

3.1. Mikroszkópi vizsgálatok

A próbatesteket a vizsgálataink előtt, a tégelyből való eltávolítás után, 25x25x25 mm-es darabokra munkáltuk meg. Ezt követően a próbatestek felületét különböző szemcseméretű csiszolópapírokkal (P60, P120, P320, P600, P1200, P2500 és P4000) felületkezeltek. Egy adott szemcseméretű csiszolópapíron a felület csiszolása 20 N megoszló erővel, 5 percig tartott. A csiszolást követően 3 μm , majd 1 μm szemcsenagyságú gyémánt szuszpenzióval políroztuk a próbatesteket 15 N-os erővel 10 percig.

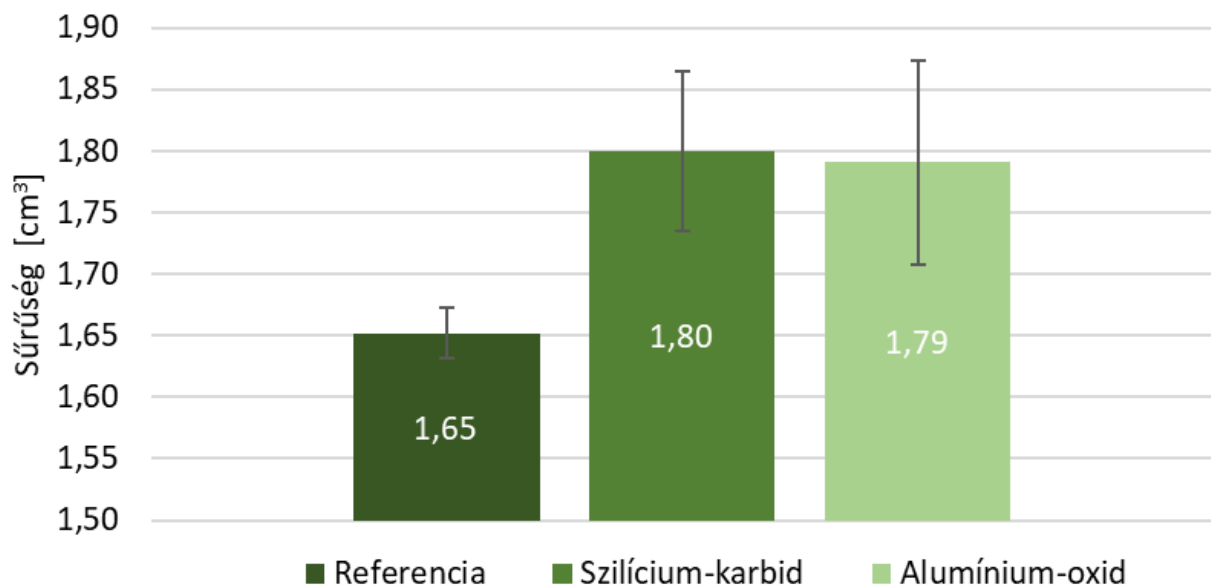
Az optikai mikroszkóppal készült képeken nem fedeztünk fel sem kiválásokat, sem pedig nem kívánt porozításokat az erősítőanyag felületén, mely számunkra a gyártás sikerességét jelenti. A mikroszkópi képeket a következő ábrán láthatjuk:



3. ábra: A vizsgált minták mikroszkópi képe: Referenciaminta (balra), SiC erősítésű (középen), Al_2O_3 erősítésű (jobbra)

3.2. Sűrűségmérés

A próbatestek sűrűségét az élhosszaik lemerésével és tömegük megmérésével tudtuk meghatározni, az élhosszokat összeszoroztuk egymással, majd a kapott térfogatot elosztottuk a mért tömeggel. A sűrűségmérés eredményeit oszlopdiagram segítségével jelenítjük meg. Megállapítható, hogy a sűrűséget az erősítések alkalmazása növelte.



4. ábra: Minták sűrűségei

3.3. Zömítővizsgálatok

A mechanikai tulajdonságokat MTS 810 univerzális anyagvizsgáló gépen az ISO 13314:2011 szabványnak [5] megfelelő egytengelyű, kvázi-statisztikus zömítővizsgálattal határoztuk meg. A keresztfej-elmozdulás 4 mm/perc volt, illetve egy teflon filmréteget is a próbatestek alá helyeztünk, hogy a zömítés során jobb kenést biztosítsunk a próbatestek és a műszer között.

A zömítővizsgálatok során készített mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozás görbéken az alábbi mechanikai tulajdonságokat elemeztük:

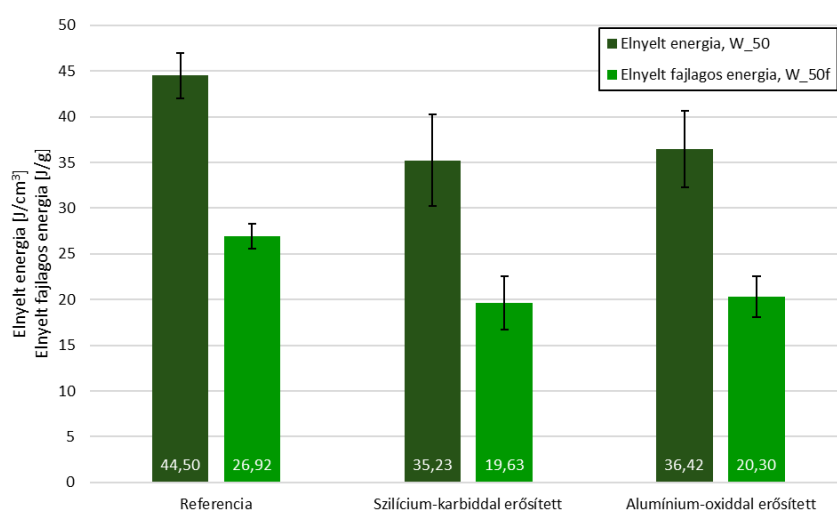
- A platófeszültséget (σ_p), amely a 20% és 30% közötti mérnöki alakváltozáshoz tartozó átlagos feszültségérték.
- Az egyezményes zömítő folyáshatárt ($\sigma_{p0,2}$), amely a 0,2%-os mérnöki alakváltozáshoz tartozó feszültségértéket jelenti.
- Az 50%-os mérnöki alakváltozásig elnyelt energiát (W_{50}), amely a görbe alatti területet jelöli az említett alakváltozási határig.

Amint az a 2. táblázatban és a 4. ábrán is egyértelműen látható, az erősített minták által elnyelt energia 20%-kal, valamint elnyelt fajlagos energia értékei több mint 25%-kal elmaradnak a referenciaminta eredményeitől, ami ellentétes az előzetesen várt eredményekkel.

Elnyelt energiák mintáink esetében

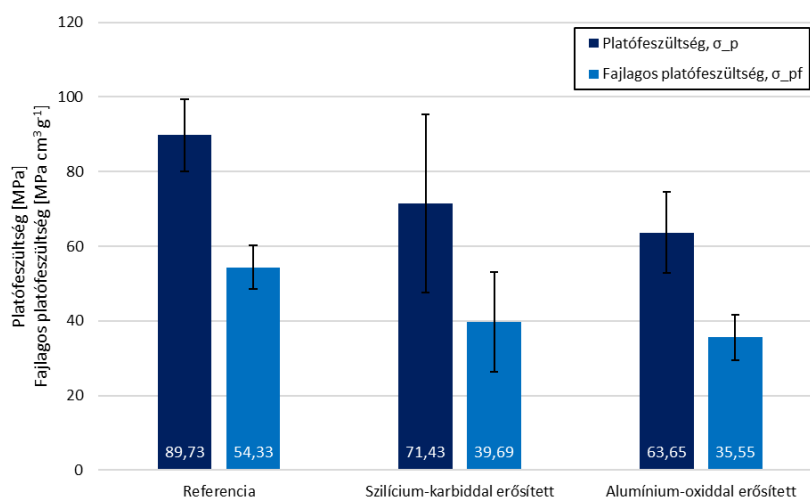
2. táblázat

Minta	$W_{50}, \frac{J}{cm^3}$	W_{50} szórás, $\frac{J}{cm^3}$	W_{50} fajlagos, $\frac{J}{g}$	W_{50} fajlagos szórás, $\frac{J}{g}$
Referencia (erősítetlen)	44,4987	2,4899	26,9232	1,3986
Szilícium-karbiddal erősített	35,2286	4,9896	19,6285	2,9503
Alumínium-oxiddal erősített	36,423	4,1969	20,2989	2,24



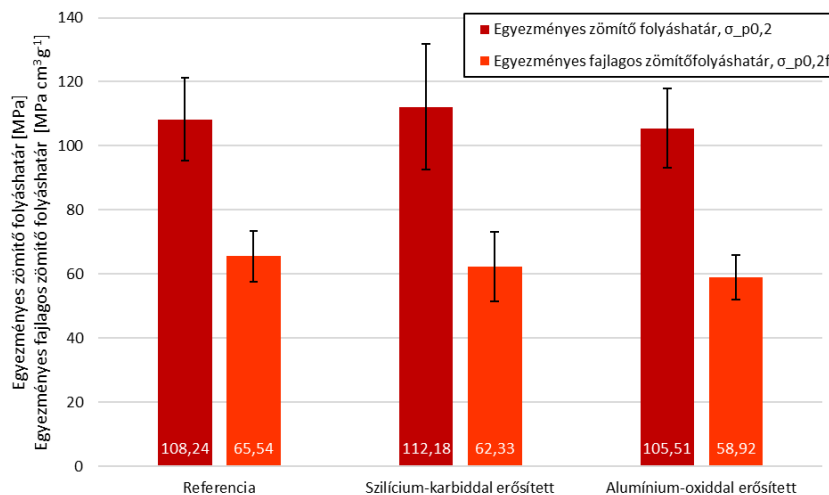
5. ábra: 50% mérnöki alakváltozásig elnyelt energia

A 6. ábra alapján megállapítható, hogy az erősített minták értéke mind abszolút, mind fajlagosított értelemben elmaradt a referenciamintáétól.



6. ábra: Platófeszültség és fajlagos platófeszültség a mintáink esetében

A 7. ábrán látható az egyezményes fajlagos zömítő folyáshatárok értékei. Megállapítható, hogy az erősített próbatestek is rosszabbul teljesítettek, mint a referenciaminta.



7. ábra: Egyezményes zömítő folyáshatár és egyezményes fajlagos zömítő folyáshatár mintáink esetében

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során sikeresen állítottunk elő mátrixanyagában erősített szintaktikus fémhabot, amelyet vákuum-infiltrációs eljárással gyártottunk. A mikroszkópos vizsgálatok igazolták, hogy a mátrixanyag és az erősítőanyag között megfelelő kötés alakult ki, valamint a szemcsék felületén nem jelentkezett nem kívánt porozitás.

Eredményeink azonban nem igazolták a kezdeti hipotézisünket, mivel az erősített minták elnyelt energia- és fajlagos elnyelt energiaértékei alacsonyabbak voltak a referenciamintáéhoz képest. Emellett a platófeszültség értékei is kedvezőbbek voltak a referencia próbatestek esetében, mint az erősített minták esetén.

Továbbá, az erősített minták nagyobb szórásértékeket mutattak a referenciamintákhoz viszonyítva, ami arra utal, hogy az erősítőanyagyszemcsék eloszlása a próbatestekben nem egyenletes.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Hálás köszönetünket fejezzük ki a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszékének, valamint az MTA-BME Lendület Nagyteljesítményű Kompozit Fémhabok Kutatócsoportnak a szükséges laboratóriumi feltételek, anyagok, vizsgálati és mérőeszközök biztosításáért.

Ezen kutatásunk a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatásával, az OTKA-FK_21138505 támogatási szerződés keretében valósulhatott meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Sivananthan, K. Ravi, and S. Jerold Samuel C, "Effect of SiC particles reinforcement on mechanical properties of aluminium 6061 alloy processed using stir casting route," *Mater Today Proc*, vol. 21, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.09.068.
- [2] L. Pan *et al.*, "Gravity casting of aluminum-Al₂O₃ hollow sphere syntactic foams for improved compressive properties," *Journal of Porous Materials*, vol. 27, no. 4, pp. 1127–1137, 2020, doi: 10.1007/s10934-020-00889-x.
- [3] M. M. Su, H. Wang, K. Y. Li, and H. Hao, "Microstructure and Compressive Properties of Al/Al₂O₃ Syntactic Foams," *Materials Science Forum*, vol. 933, pp. 174–181, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.933.174.
- [4] European Steel and Alloy Grades / Numbers Searchable Database, "Térfogatszázalékos kémiai összetétel ENAC-AlSi7Mg." Accessed: Mar. 09, 2025. [Online]. Available: https://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1224
- [5] International Organization for Standardization, "Mechanical testing of metals — Ductility testing — Compression test for porous and cellular metals (ISO 13314:2011)," 2011. Accessed: Mar. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/53669.html>