



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLÓGIA TANSZÉK

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

GÁBRIEL BÁLINT

(GÉPÉSZMÉRNÖKI SZAK BSc, 5. FÉLÉV)

PRÉMUS KARINA

(IPARI TERMÉK - ÉS FORMATERVEZŐ MÉRNÖKI SZAK BSc, 3. FÉLÉV)

SZOVÁK BENEDEK

(GÉPÉSZMÉRNÖKI SZAK MSc, 3. FÉLÉV)

Mátrixanyagában erősített nyílt cellás fémhabok

Konzulens:

Maróti János Endre

doktorandusz, BME ATT

Budapest, 2023

NYILATKOZATOK

Elfogadási nyilatkozat

Ezen dolgozat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Tudományos Diákköri Konferenciára előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a célkitűzésekben megfogalmazottaknak maradéktalanul eleget tesz. Ezen dolgozatot a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2023.11.05.

.....

konzulens

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott *Gábrriel Bálint (QD8NEU)*, *Prémus Karina (DDOQX6)* és *Szovák Benedek (FY1BPD)* a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatói, büntetőjogi és fegyelmi felelősségünk tudatában kijelentjük és sajátkezű aláírásunkkal igazoljuk, hogy ezt a dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magunk készítettük, és dolgozatunkban csak a megadott forrásokat használtuk fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettünk, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltünk.

Budapest, 2023. 10. 30.

.....

hallgatók

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó.....	6
1. Összefoglalás.....	7
1.1. Summary.....	8
2. Bevezetés.....	9
2.1. Áttekintés.....	9
3. Szakirodalmi áttekintés	10
3.1. Nyílt cellás fémhabok.....	10
3.1.1. Nyílt cellás fémhab készítés gipszformával	11
3.1.2. Nyílt cellás fémhab készítés fröccsöntéssel	13
3.2. Térkitöltő anyagok elrendezésének erősítő hatása	14
3.2.1. A sűrűség pontos beállítása	14
3.2.2. Periodikus elhelyezés	15
3.3. Erősítések szerkezettel.....	17
3.3.1. Erősítés alumíniumcsővel.....	17
3.3.2. Erősítés acélhálósával	19
3.3.3. Erősítés kerámia nanorészecskékkel	21
3.4. Erősítés infiltrálással.....	23
3.5. Szilícium-karbid erősítőanyag	25
3.6. Alumínium-oxid erősítőanyag.....	27
4. Célkitűzések	30
5. Anyagok és módszerek.....	31
5.1. Anyagok.....	31
5.2. Módszerek	33
5.3. Vizsgálatok	37
6. Eredmények.....	39
6.1. Sűrűségmérés.....	39
6.2. Optikai vizsgálatok	40
6.3. Mechanikai tulajdonságok.....	40
7. Eredmények értékelése, következtetések	45
8. Összefoglalás.....	47

9. Jövőbeli tervek	48
10. Felhasznált források	49
10.1. Ábrajegyzék.....	52

ELŐSZÓ

Ebben a tanulmányban figyelmünket a mátrixanyagában erősített nyílt cellás fémhabok felé fordítjuk. A kutatás alapját azért ez az anyag adja, mivel kulcsfontosságú szerepet játszik a kis sűrűségű anyagok és szerkezetek tervezésében, ipari és mérnöki alkalmazásában is egyaránt innovatív megoldást tud nyújtani.

Széleskörű információgyűjtésünk során megismerkedtünk korábbi kutatások eredményeivel mind gyártás, mind erősítés szempontjából. E tanulmány célja, hogy bemutassa a nyílt cellás fémhabok gyártásának lehetőségeit, és különféle megoldást mutasson az anyagi jellemzők erősítésére, jobbra tételére. A következő oldalakon részletesen tárgyaljuk a kutatás módszereit és eredményeit.

Reméljük, hogy értekezésünk hozzájárul a mérnöki fejlődéshez és inspirálja azokat, akik érdeklődnek ezen különleges anyagok iránt!

* * *

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk megköszönni konzulensünknek a rengeteg segítséget és a mérésekben való aktív részvételt.

Ezenkívül köszönjük az Anyagtudomány és Technológia Tanszéknek a rendelkezésünkre bocsátott eszközöket és a kollégáknak a segítséget.

A jelen Tudományos Diákköri Kutatás az MTA-BME Lendület Nagyteljesítményű Kompozit Fémhabok Kutatócsoport keretében valósult meg. Ezt a munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH), támogatta az OTKA-FK_21 138505 támogatási szerződés keretében.

Budapest, 2023.11.05.

Gábrriel Bálint, Prémus Karina, Szovák Benedek

1. ÖSSZEFOGLALÁS

A fémhab olyan cellás szerkezetű anyag, amelyben a mátrix anyaga fém és ebben gázzal töltött üregek, pórusok találhatóak. Felépítésük szerint lehetnek nyílt- és zártcellás fémhabok. Nyílt cellás fémhabokban az egymás mellett elhelyezkedő gázzal töltött üregek összeérnek, amíg zárt cellás esetben ezeket az üregeket körben cellafal választja el egymástól. A szintaktikus fémhabok ezen utóbbi, zárt cellás csoportba tartozó anyagok, amelyekben az üregeket például porózus szerkezetű töltőanyag adagolásával hozzák létre. A mátrix tömbi formájához képest a fémhabok kisebb sűrűségűek és nagyobb fajlagos energiaelnyelő képességgel rendelkeznek. Ezeknek a tulajdonságoknak köszönhetően egyre szélesebb körben alkalmazzák az iparban, illetve kutatásuk is egyre elterjedtebb.

A kutatás során nyílt cellás fémhabokat hoztunk létre nyomásos infiltrálással úgy, hogy a kialakuló cellaélekbe kerámia erősítőanyag szemcséket juttattunk. Eltérő anyagminőségű és szemcseméretű erősítőanyagot alkalmaztunk a gyártás során, és az így kapott eredményeket összehasonlítottuk az erősítőanyagot nem tartalmazó referenciaminta eredményeivel.

Az előkészített próbatesteken mikroszerkezeti vizsgálatot végeztünk optikai- és elektronmikroszkóppal. A mechanikai tulajdonságokat kvázi-statisztikus zömítőpróbával vizsgáltuk. Ennek során erő-keresztfej elmozdulás adatpárokat kaptunk, amelyekből a kiindulási keresztmetszet és magasság felhasználásával mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozás diagrammokat készítettünk. Ezeken vizsgáltuk az egyezményes zömítő folyáshatárt, a platófeszültséget és az 50%-os mérnöki alakváltozásig elnyelt energiát. Az így kapott eredményeket a sűrűséggel fajlagosítva értékeltük ki.

Kulcsszavak: *fémhab, nyílt cellás fémhab, erősítőanyag*

1.1. Summary

In this study we investigated the possibility of reinforcing open cell metal foams in the matrix material. Due to the low density of the metal foams, they have significant compression strength and energy absorption properties. An attempt was made to improve these properties without the significant increase of density.

We used common road salt as space holder, Al99,5 aluminium as matrix material, and we added 20 V/V% of different types of ceramic reinforcing material were used in different grain sizes, such as alumina with the average particle size of 1 mm and 0,4 mm, we combined this two and created a gradient sample, and silicon carbide with the average particle size of 0,4 mm. The samples were produced with vacuum infiltration and has been cut to specimens with cutting machine.

The specimens were prepared for microstructural studies. These were conducted with optical and scanning electron microscope. The mechanical properties were determined with quasi-static compression test. The examined properties were the plateau stress, the compressive offset stress, and the absorbed energy up to 50% engineering strain. These values were evaluated specified by the density values.

Keywords: *metal foam, open cell foam, particle reinforcement*

2. BEVEZETÉS

2.1. Áttekintés

Elsősorban a szakirodalomban fellelhető, az általunk vizsgált anyagokra vonatkozó részt tekintjük át. Először általánosságban a nyílt cellás fémhabokra térünk ki. Ezután különböző gyártási eljárásokat mutatunk be, majd mivel nincs széleskörű forrás erősített fémhabokra, az általunk vizsgált erősítőanyagok tömör kompozitokra kifejtett hatását vizsgáljuk.

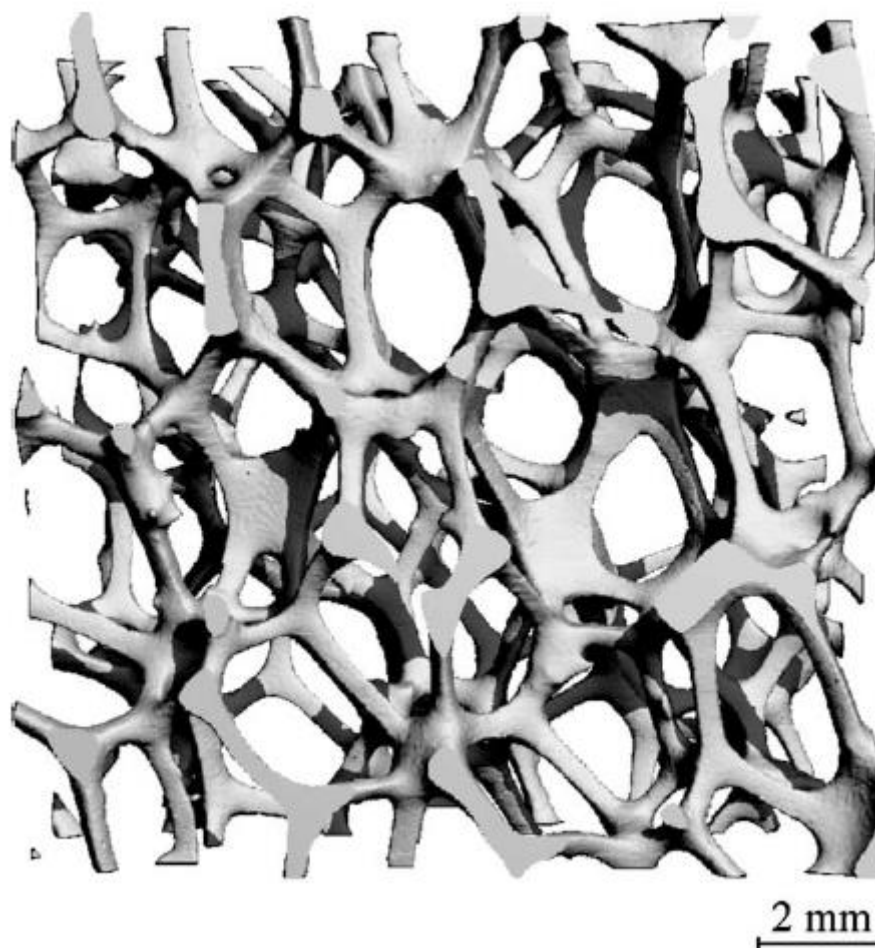
A továbbiakban bemutatjuk az általunk felhasznált anyagokat és módszereket, azon belül is a gyártási eljárásunkat és a mechanikai vizsgálatokat. Ezután bemutatjuk a kapott eredményeinket, és a konklúziókat, amelyekre jutottunk. Végül ejtünk pár szót a kutatással kapcsolatos jövőbeli terveinkről.

3. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

3.1. Nyílt cellás fémhabok

Jang és Kyriakides [1] kutatásukban Al-6101-T6 (AlMgSi) mátrix anyagú nyílt cellás alumínium habokat vizsgáltak eltérő szemcseméretű térkitöltő anyagok felhasználásával. Fő céljuk ezeknek a haboknak a zömítés során tanúsított viselkedésük feltérképezése és lemodellezése.

Három féle cellaméretben, 10, 20 és 40 szitalyukszámú (az egy inch hosszú, egy soros szítán található lyukak száma) térkitöltőanyaggal készült készen szállított fémhabot vizsgáltak. Első lépésként számítógépes tomográfiával (a továbbiakban CT) feltérképezték a habok belső szerkezetét. Egy beolvasott felvételt mutat be az 1.ábra.



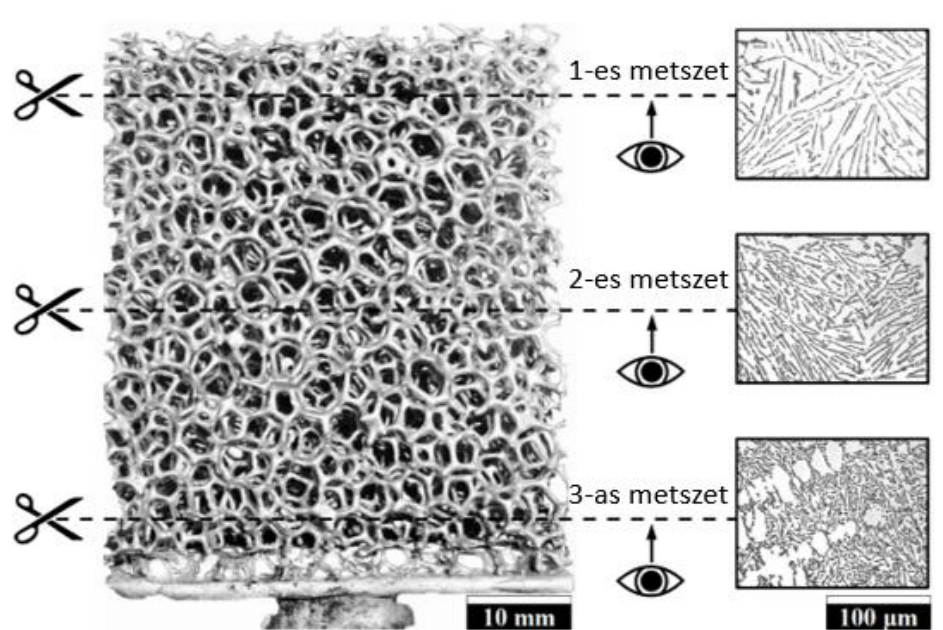
1.ábra CT felvétel a 8,23% relatív sűrűségű, 10-es szitalyukszámú alumíniumhabról [1]

A mechanikai tulajdonságokat zömítővizsgálattal vizsgálták. 51x51x102 mm és 51x51x51 mm élhosszúságú próbatesteket zömítettek. A vizsgálatok során megállapították, hogy az

általuk vizsgált minták átlagos rugalmassági modulusa $E=69$ GPa, és zömítő folyáshatára $\sigma_{p0,2}=195$ MPa.

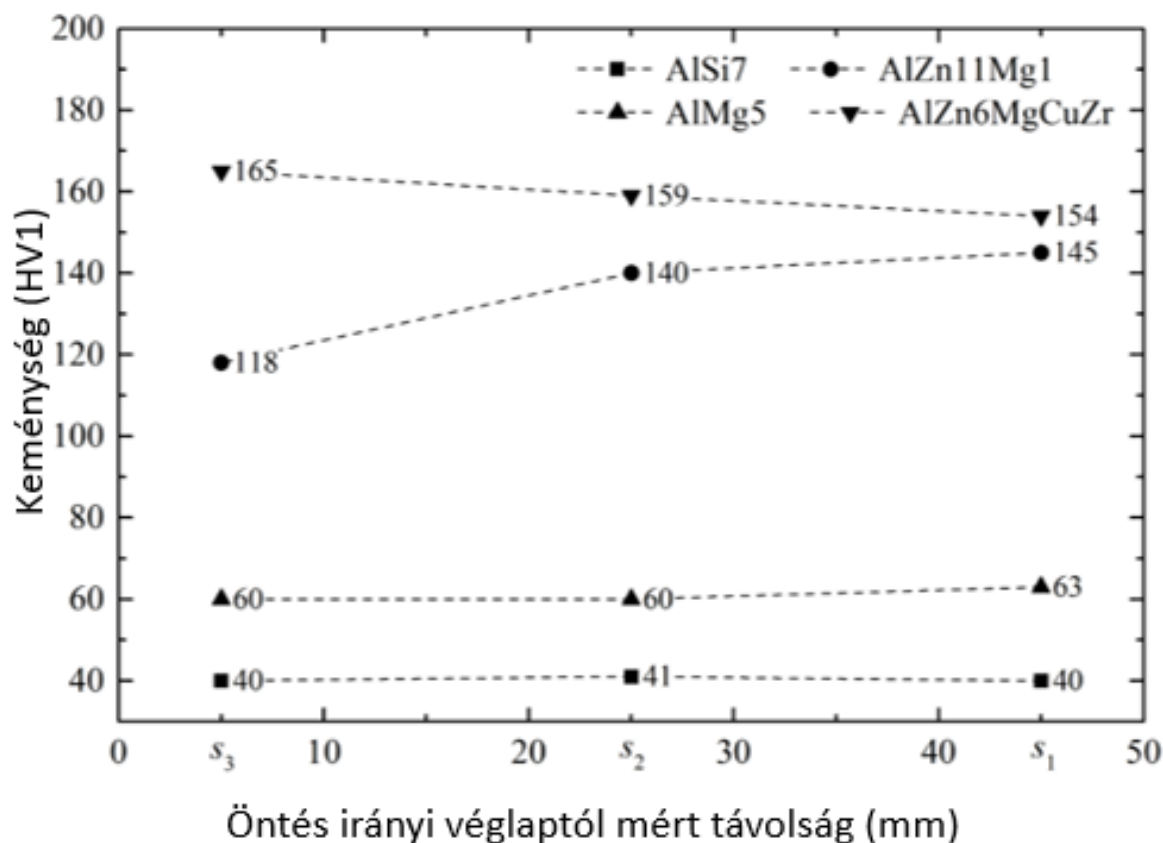
3.1.1. Nyílt cellás fémhab készítés gipszformával

Az anyagok mikroszerkezete jelentős hatással van a tulajdonságokra. Matz és társai [2] is ezt vizsgálták tanulmányukban, amely során nagy tisztaságú $AlSi7$, $AlZn11Mg1$, $AlMg5$ és $AlZn6MgCuZ$ ötvözeteket használtak. Ezekből nyílt cellás habot készítettek úgy, hogy egy nyílt cellás polimer habokat kitöltötték gipsszel, majd pirolízissel eltávolították belőle a polimert. Az így elkészült gipsz formába öntötték az olvadt alumíniumot, amelyet aztán atmoszférikus körülmények között hűtöttek, majd megtisztítottak. Ezzel az eljárással készítették el az alumínium ötvözet habjaikat. A mintákat 3 részre darabolták, hogy vizsgálják a mikroszerkezet mennyire változik a beöntési távolság függvényében. A mintákat polarizált fényben fénymikroszkóppal, illetve Vickers keménységmérővel vizsgálták. A mikroszkópi felvételek készítéséhez készült vágási rendet mutatja be a 2.ábra.



2.ábra A darabolás helyei (balra) és mikroszerkezeti felvételek (jobbra) az öntés irányából nézve [2]

A keménységmérés eredményeit a 3.ábra.

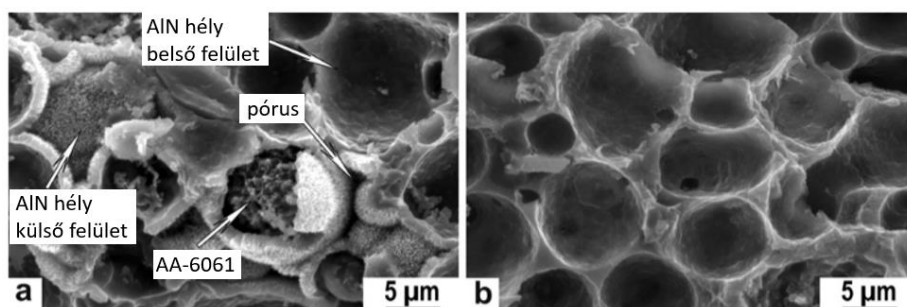


3.ábra Vickers keménység az öntés irányi véglaptól mért távolság függvényében [2]

Mérési eredményeik alapján a következőkre jutottak: A fémhabok különböző szakaszainál eltérő mikroszerkezet jön létre a beöntési ponttól vett távolság függvényében, amelyet az ötvözetek különböző keménységi profiljai és mikroszkópi képei igazoltak. A mikroszerkezetek változása egy mintán belül minden esetben a beöntési ponthoz közeli maximális hűtési sebességre is utal, ugyanis itt a leggyorsabb a lehűlés, míg a minták többi részénél a tégely egy plusz szigetelést jelent. Konklúzióként megfogalmazták, hogy a homogénebb mikroszerkezet érdekében a hűtést szabályozottan, még a kemencében kell végezni.

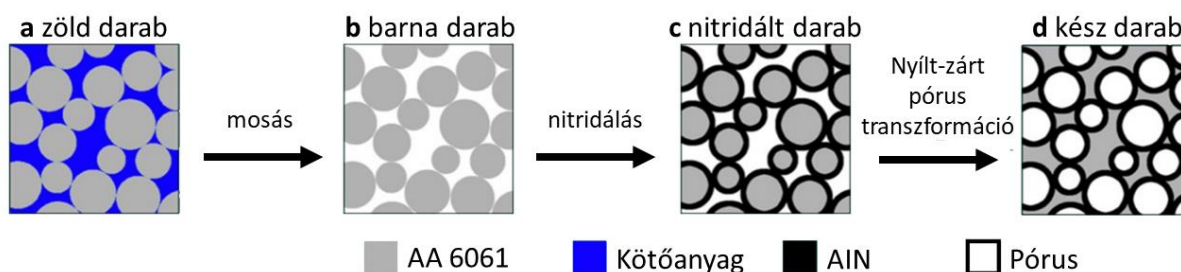
3.1.2. Nyílt cellás fémhab készítés fröccsöntéssel

Yu, P. és Qian, M. [3] fémfröccsöntést alkalmaztak kísérletük közben. Mérésük során az fémfröccsöntött szintaktikus habok gyártásához nem használtak üreges kerámiagömböket a fémhátrixhoz. A gyártás maga úgy valósult meg, hogy alumínium port polimer kötőanyagokkal keverték össze és ezt az elegyet fröccsöntötték, majd eltávolították belőle a polimer hozaganyagokat, nitridálták ezt az előgyártmányt, majd egy újabb hőkezeléssel a nem nitridált alumíniumot a nitridált gömbhéjakon (AlN) kívülre jutatták, így állítottak elő térkitöltő részecskék nélkül fémhabot. Az elkészült minták mikroszkópi felvételét a 4.ábra, az eljárás sematikus ábráját.



4.ábra Töretfelületek pásztázó elektronmikroszkópos felvétele (a) szinterelés és 12 órás, 560 °C-os nitridálás után, és (b) 2 órás, 700 °C nyílt-zárt pórustranszformáció után [3]

Az 5.ábra mutatja be. Az ily módon kapott minták sokkal nagyobb nyomószilárdságot mutattak.

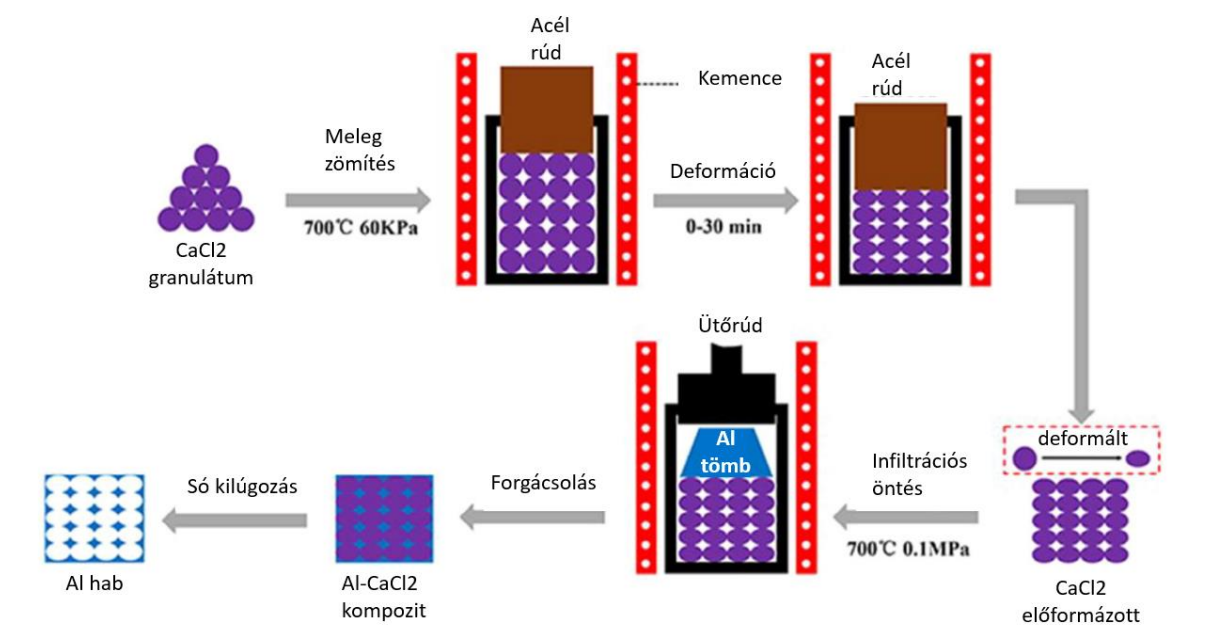


5.ábra A gyártási eljárás sematikus ábrája [3]

3.2. Térkitöltő anyagok elrendezésének erősítő hatása

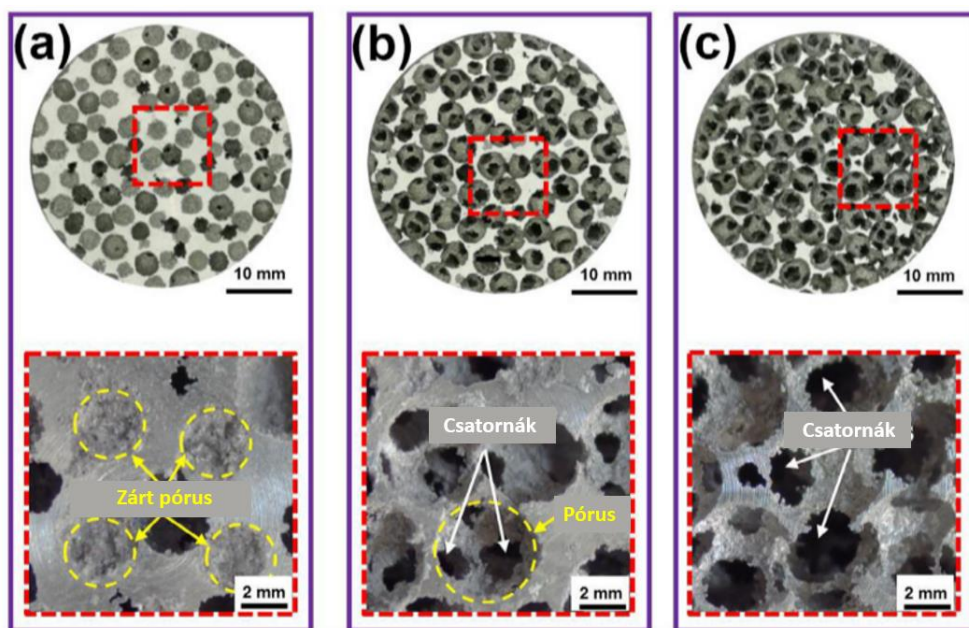
3.2.1. A sűrűség pontos beállítása

Pekingben T. Wan és társai [4] tanulmányukban kifejlesztettek egy egyszerűbb eljárást a pontos sűrűség (térkitöltő anyag hányad) beállításához. A kutatás során 4,5 mm átmérőjű gömb alakú CaCl_2 granulátumot és 6061-T6 alumínium ötvözetet használtak. A gyártási eljárásuk sematikus ábráját a 6.ábra mutatja be. Ezekből olyan mintát készítettek, amelyekhez a granulátumot melegen zömítették különböző időkon át. Az elkészült fémhabokat Mikro CT-vel és pásztázó elektronmikroszkóppal (továbbiakban SEM) vizsgálták. Eredményül azt kapták, hogy a porózus CaCl_2 szemcsék magas hőmérsékletű deformációjával pontosan állítható a porozitás és a sűrűség mértéke, amelyet táblázatba foglaltak aszerint, hogy milyen paraméterekkel milyen mértékű porozitást értek el. Az különböző előalakítási időekkel készült kész termékek mikroszkópi felvételeit mutatja be a 6.ábra.



6.ábra A gyártási eljárás sematikus vázlata [4]

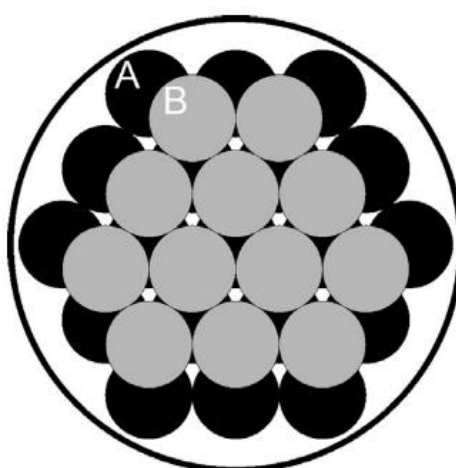
A mikroszkópi felvételeket mutatja be a 7.ábra.



7.ábra Mikroszkópi felvétel a végtermékekről (a) zárt cellás előformázott (b), pórusos nyílt cellás előformázott és (c) nyílt cellás előformázott próbadarabokról [4]

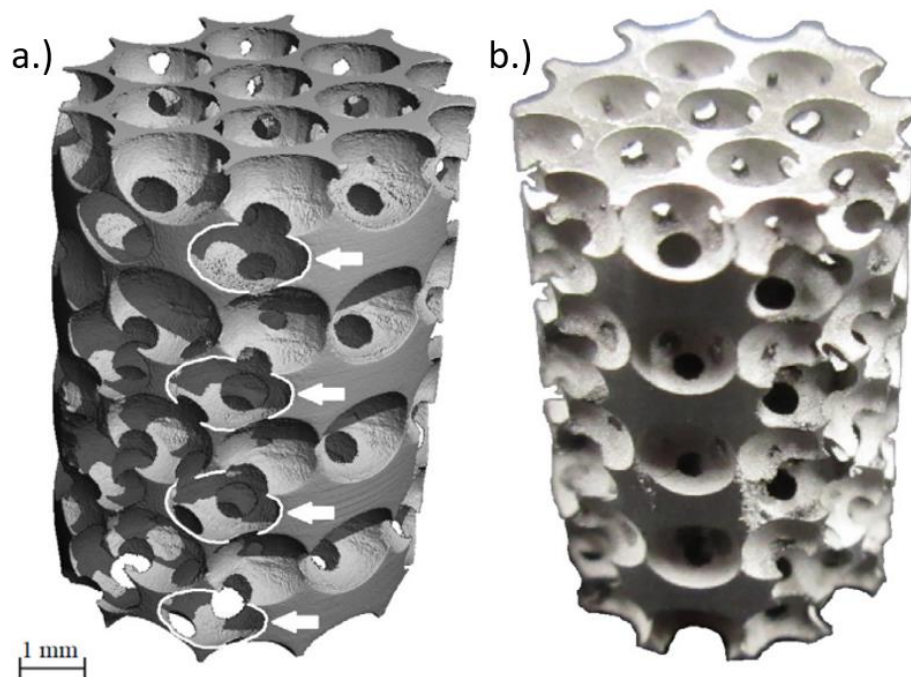
3.2.2. Periodikus elhelyezés

Nivala és James [5] egy olyan gyártási megközelítést alkalmaztak a nyílt cellás fémhabok pórusszerkezetének szabályozására, amely a térkitöltők periodikus elrendezésén alapszik. Pontosabban, azok hatszögletes mintában, míg a rétegek meg elcsúsztatva helyezkednek el egymáshoz képest, hogy a térkitöltésük a maximális legyen. Ezt az elrendezést mutatja be a 8.ábra.



8.ábra A két különböző, 19 (A réteg) és 12 (B réteg) réz gömbhéjat tartalmazó réteg elhelyezkedése a grafit szerszámon belül (külső fekete kör) [7]

Ezeket az egymáshoz szorosan elhelyezett rézgömböket NiTi porral együtt szinterelték szikraplazma segítségével, majd salétromsavval kilúgoztatták. A folyamat megismételhetősége érdekében a kapott nyílt cellás NiTi habok sűrűségét, pórusszerkezetét és mechanikai tulajdonságait vizsgálták. A fémhabok teljes méretében egységes, jól replikált pórusszerkezeteket mutattak, magasfokú összekapcsolhatósággal. A szerkezetet mikro-CT-vel vizsgálták, az így készült modellt és a vizsgált minta fényképét mutatja be 9.ábra.



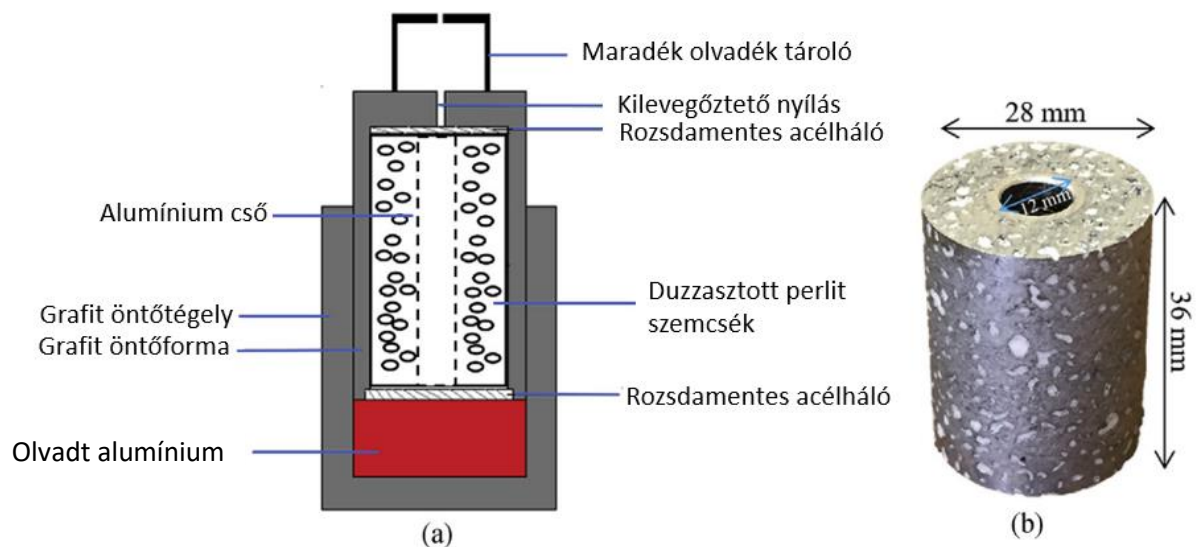
9.ábra (a.) Az elkészült habok mikro-CT-vel készített 3D modellje jelölve a pórusok periodicitását és (b.) fényképfelvétel ugyanarról a mintáról más orientációban [5]

A zömítés során viszont a nyílt cellás habok váratlan rideg viselkedést mutattak, a szakítószilárdság ingadozása mellett, amelyet feltehetőleg a repedések keletkezése és azok mátrixon keresztül történő részecskék közötti terjedése okozott, ami a minta pillanatszerű tönkremeneteléhez vezetett.

3.3. Erősítések szerkezettel

3.3.1. Erősítés alumíniumcsővel

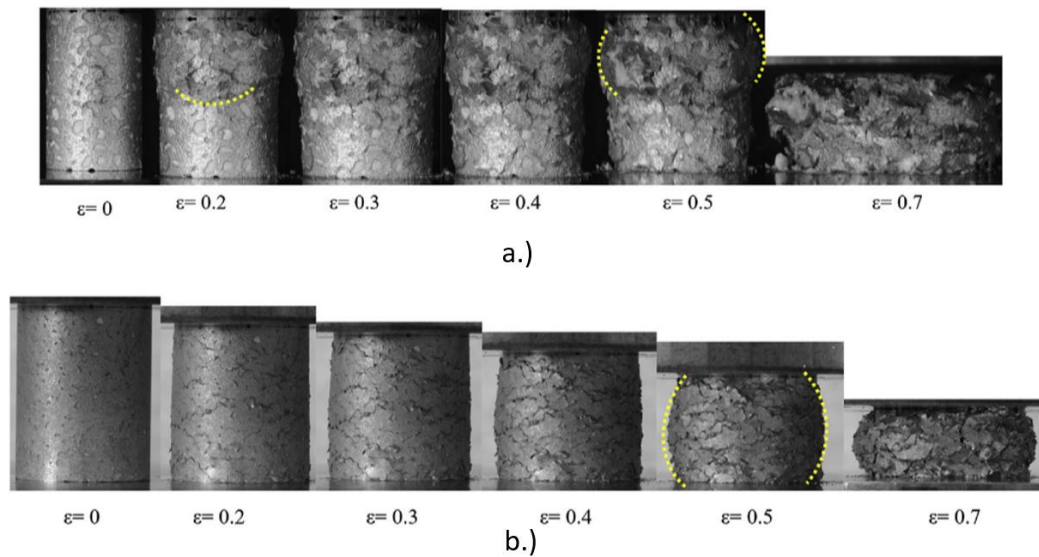
T. Fiedler és kollégái [6] egy másik kutatásukban alumínium csöveket integráltak fém szintaktikai habba, annak érdekében, hogy egy hosszirányban teljes mértékben üreges hab szerkezeteket gyártsanak. A minták elkészítéséhez 6060-T5 alumínium cső adta a belső magot, míg mátrix anyagként ZA-27 cink-alumínium ötvözetet használtak. Az öntési összeállítást és az elkészült próbatestet a 10. ábra mutatja be.



10. ábra (a.) Az öntési összeállítás sematikus ábrája és (b) az elkészült próbatest

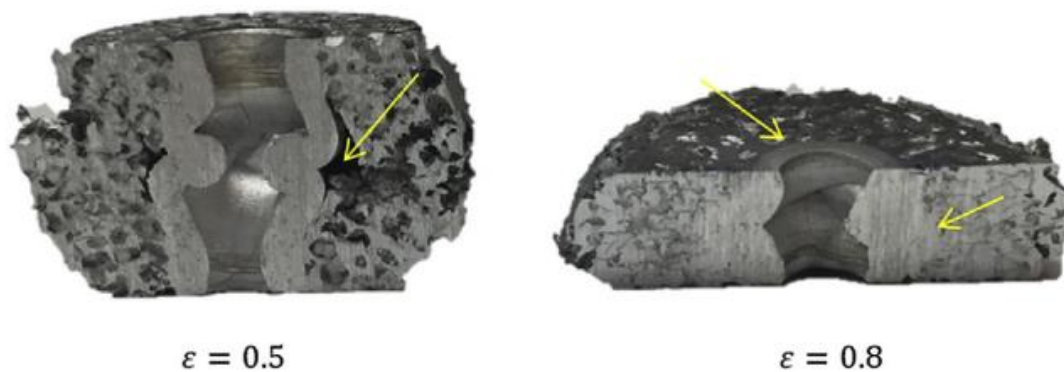
A mintákat ellengravitációs infiltrációs öntéssel állították elő. Az elkészült mintákat pásztázó elektronmikroszkóppal és kvázi-statisztikus egytengelyű zömítővizsgálattal, univerzális anyagvizsgáló gépen vizsgálták.

A fémhab és az alumínium cső köré öntött fémhab jellegzetes zömítés közbeni viselkedését mutatja be a 11.ábra.



11.ábra (a.) ZA27 mátrixú fémhab és (b.) alumínium cső köré öntött fémhab jellegzetes zömítés közbeni viselkedése, ahol az ε értéke az alakváltozást mutatja [6]

A zömülés közbeni keresztmetszeti képet különböző alakváltozás mértékeknél a 12.ábra.

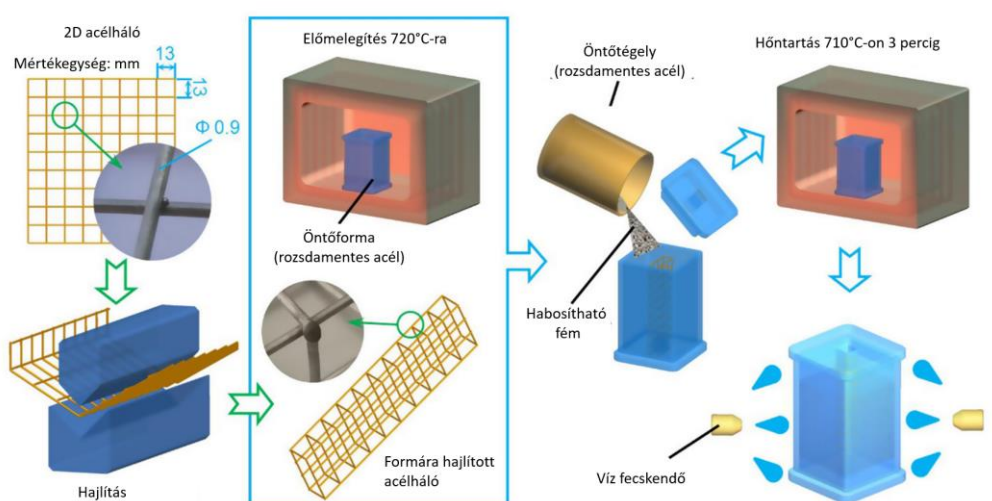


12.ábra Az alumínium cső köré öntött fémhab keresztmetszete $\varepsilon=0,5$ és $\varepsilon=0,8$ deformációnál [6]

A SEM képéről kivehető volt, hogy a fémhab és a cső között kiváló kötés jött létre. A mechanikai tulajdonságokat a továbbiakban kvázi-statisztikus, egytengelyű zömítővizsgálattal határozták meg. Eredményképpen azt kapták, hogy az alumínium csövek beágyazása nem növelte meg a sűrűséget, azonban a nyomó terhelésre adott deformáció válaszában növekedés mutatkozott meg. A tönkremenetel a minta középpontjából kiindulóan a cső egyenletes hordósodásával kezdődött meg. Illetve az alumínium hab oldal irányú támasztásának köszönhetően a cső nem egyirányba hajlott ki, hanem tengelyszimmetrikusan jelentek meg a gyűrődések. Ezen stabilizált alakváltozás miatt a cső maggal rendelkező minták szilárdsága és energiaelnyelése jelentősen meghaladta azokat az értékeket, amelyeket a cső mag nélküli referenciadarabokon mértek.

3.3.2. Erősítés acélhálóval

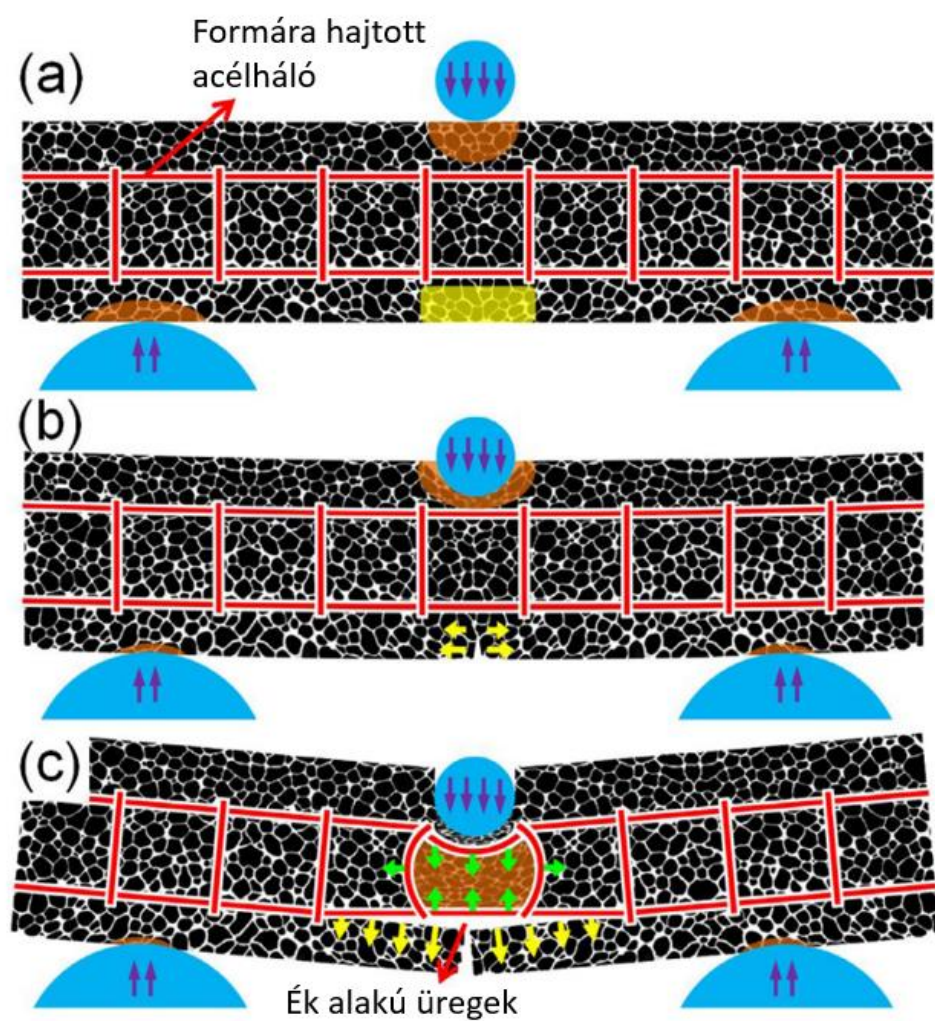
Yang és társai [7] kutatásukban fémrács erősítésű alumíniumhab hajlító tulajdonságait vizsgálták. A 304 (X6CrNi18-10) rozsdamentes acélból készült kis hálókát négyszög alakúra hajtogatták, majd azt hosszirányban belehelyezték a téglékbe. Az öntési folyamatot a 13.ábra mutatja be.



13.ábra Az öntési folyamat sematikus ábrája [7]

Az ekképpen készült fémhabokon kvázi-statisztikus hárompontos hajlítási vizsgálatokat végeztek. A kísérleti eredmények azt mutatják, hogy a ráccsal erősített tönkremenetel módja egyetlen szakítószilárdságból átalakult a húzási és nyomási tönkremenetel kombinációjává. A folyáshatár nőtt, ezen túlmenően az acélrács jelenléte jelentősen javította az energiaelnyelő képességet 12-18-szorosára a referenciamintához képest és a fajlagos energiaelnyelést 25 mm-es lehajlás mellett.

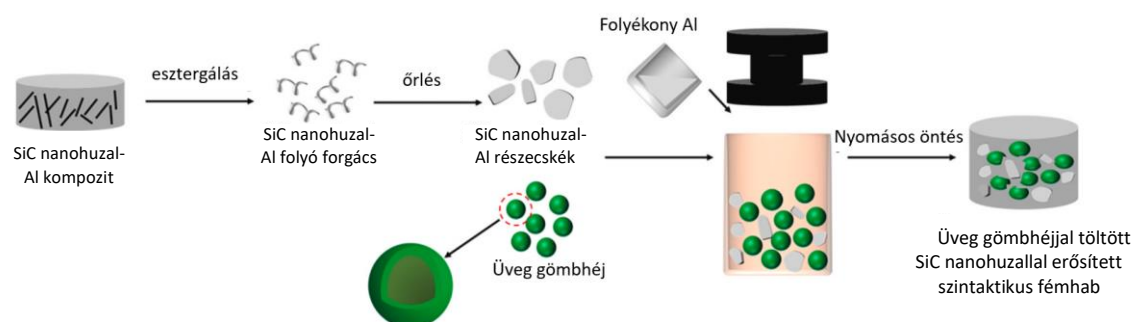
A hajlítóvizsgálatok során a feszültség eloszlásának sematikus ábráját mutatja be a 14.ábra.



14.ábra Feszültség eloszlás a próbatestekben kvázi-statiszti-
kus, hárompontos hajlító vizsgálat során: a barna jelöli
az erősen deformálódott területeket, illetve a lila, a sárga és a zöld nyilak jelölik rendre a hajlító terhelést, a
húzó feszültséget és a nyomófeszültséget [7]

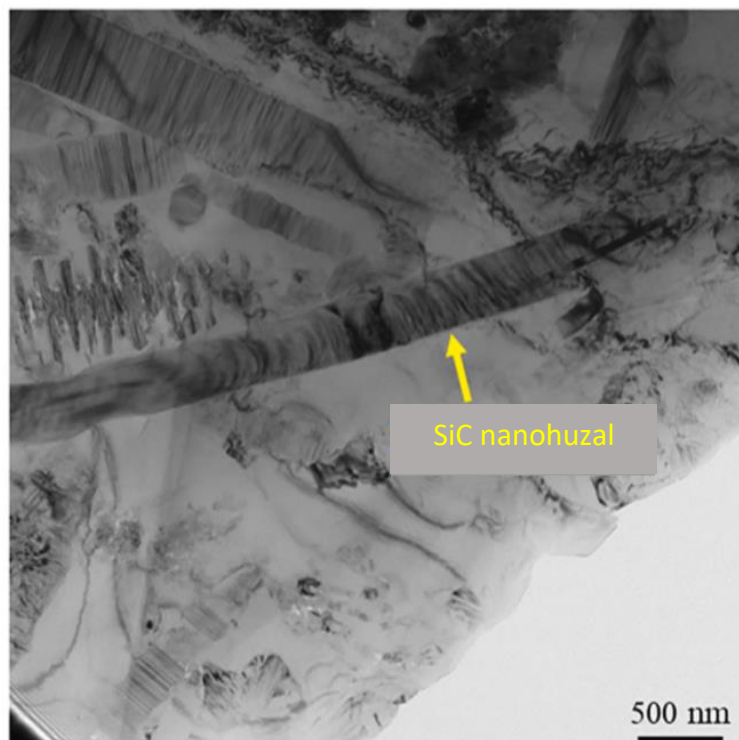
3.3.3. Erősítés kerámia nanorészecskékkel

Sun és társai [8] munkájukban rámutattak, hogy a csúcsfeszültség növelhető, ha a habokat erősítik kerámia nanorészecskék hozzáadásával. Ezt azonban nehéz elérni mind az üreges, mind a sűrű töltőanyagok esetében a fémmátrixban a sűrűségkülönbségük miatt. Ebben a tanulmányban szilícium-karbid nanohuzalokkal megerősített alumíniumforgácsot használtak kerámia töltőanyagok forrásaként, és hibrid alumíniummátrix szintaktikai habot készítettek, amelyet üveg cenoszférával (gömbhéjakkal) és szilícium-karbid nanoszálakkal is megerősítettek. A gyártási eljárást a 15.ábra, egy nanohuzal elektronmikroszkópi képét a 16.ábra mutatja be.



15.ábra A gyártási eljárás sematikus vázlata [8]

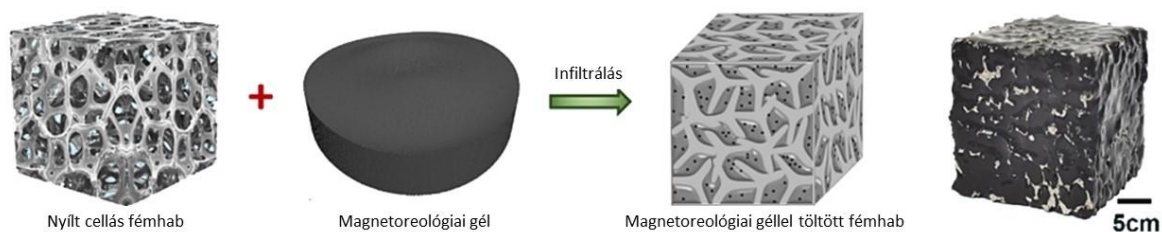
Az így kapott szintaktikai hab továbbra is kis sűrűségű, amelynek jelentősen megnövekedett a szilárdsága és nagy energiaelnyelő képességű keményfém erősítésű alumínium kompozit lett.



16.ábra SEM felvétel a SiC nanohuzallal erősített Al mátrixú kompozitról [8]

3.4. Erősítés infiltrálással

M. Yu és társai [9] tanulmányukban egy új kompozitot javasoltak, amely egy speciális gél (Magnetorheological shear thickening gel, vagyis magnetoreológiai nyírásra sűrűsödő gél (továbbiakban: MSTG)). Ez különleges anyagot bórsavból, hidroxil-végződésű polidimetil-sziloxán és egy lágymágneses anyagból - itt karbonil vasporból (továbbiakban: CIP) készült) - , feltöltött nyílt cellás fémhab. Ezt mutatja be a 17.ábra.

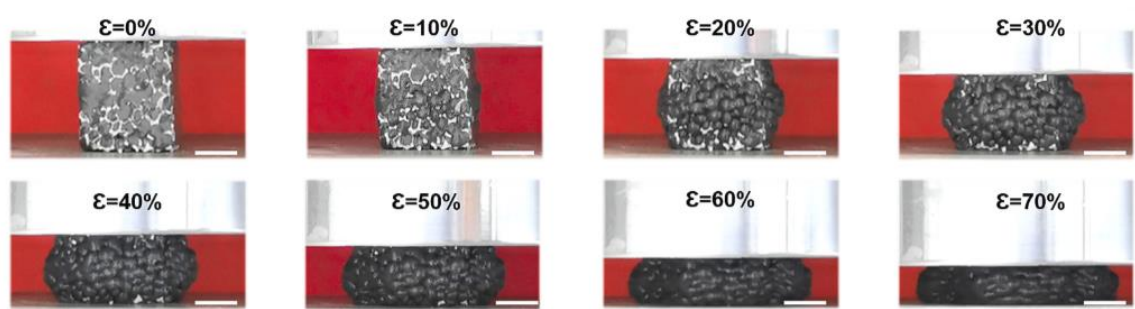


17.ábra Magnetoreológiai folyadékkal töltött nyílt cellás fémhab sematikus ábrája [9]

Ez a gél mágnesesen érzékeny (ferromágneses) és sebességfüggő tulajdonságokkal rendelkezik, így ígéretesnek jelölt pufferelesre (azaz, hogy elnyeli és elvezeti az energiát). A kísérletek során vas-nikkel habot használtak, ebbe infiltrálták a gélt. Az így kapott kompozitunk képes reagálni a mágneses fluxussűrűség változásaira, és merevebbé válik nagy nyírási sebesség mellett, ezt a bór és az oxigén atomok datív kötése teszi lehetővé.

A kvázi-statisztikus zömítő vizsgálatok során a referencia értékeket mágneses mező nélkül, a további méréseket 0,1-0,4 T fluxussűrűségben vizsgálták. A vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy a kompozitot alkotó fémhab, jelentős alakváltozáson ment keresztül, amely a keményedés fokozódását eredményezte, és ennek köszönhetően lehetővé tette több energia felvételét.

A zömítés folyamatát a 18.ábra mutatja be.



18.ábra Magnetoreológiai folyadékkal töltött nyílt cellás fémhab jellegzetes zömítés közbeni viselkedése 0,1 T mágneses fluxussűrűség mellett [9]

Emellett a kis sebességű ütésvizsgálatok azt mutatták, hogy az minták kiemelkedő energiaelnyelő képességgel (az energiaelnyelési arány több, mint 70%) és ellenállási teljesítménnyel rendelkeznek, amit a CIP részecskék mennyisége és a mágneses fluxussűrűsége fokoz. Megállapították, hogy a minta maximális lehajlása csökkent, és a hajlítási merevsége szintén nőtt a mágneses fluxussűrűség növelése mellett.

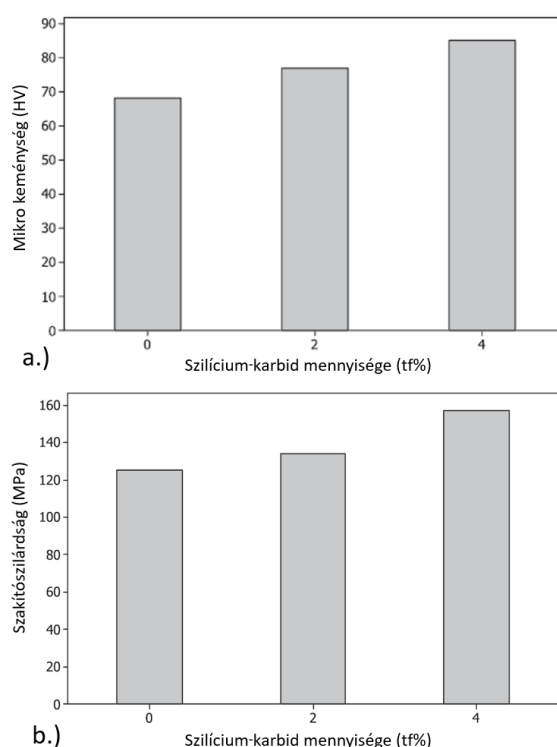
A nagy elnyelt energiamennyiség mellett a próbatestek mechanikai tulajdonságai a CIP részecskék mennyiségével és a mágneses fluxussűrűség mértékével változtatható a kompozit szilárdsága az igénybevételnek megfelelően.

3.5. Szilícium-karbid erősítőanyag

Mérnöki anyagokkal szemben egyre szigorúbb, és gyakran egymásnak ellentmondó elvárások merülnek fel. Ilyen például a nagy szilárdság és a kis tömeg egyidejű megléte. Mivel egy anyag nem képes kielégíteni ezt, ezért gyakran alkalmaznak kompozit anyagokat, amelyekben kettő vagy több anyag előnyös tulajdonságait társítják. Erre jó példa a fémmátrixú kompozitok csoportja.

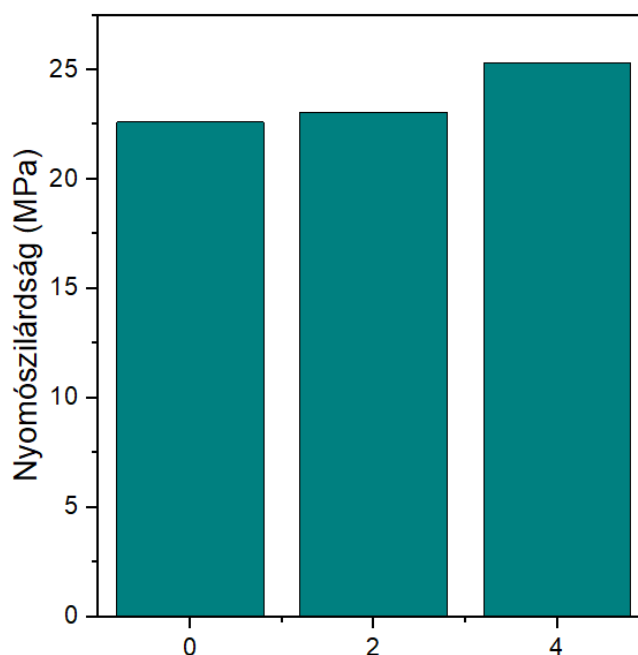
Sivananthan és társai [10] szilícium-karbiddal erősített alumínium mátrixú kompozitok mechanikai tulajdonságait vizsgálták. Keveréssel öntéssel állították elő az anyagot, amelyben 6061 alumíniumötvözetet alkalmaztak mátrix anyagként, és ebbe juttattak be 0-4 tf% közötti mennyiségű szemcsés kerámia erősítőanyagot.

A keveréssel öntőgépben 750 °C-on megolvasztották az alumíniumot, és ebbe fokozatosan adagolták bele a 44 µm szemcseméretű, 350 °C-ra előhevített erősítő szemcséket. Az öntvényből 15 mm élhosszúságú próbatesteket keménységméréshez, illetve Ø12 mm, 30 mm magas próbatesteket zömítővizsgálathoz, továbbá Ø6mm, 30 mm hosszú szakítópróbatesteket alkalmaztak. A Vickers mikrokeménység mérés és a szakítóvizsgálatok eredményeit szemlélteti a 19.ábra.



19.ábra (a) A Vickers mikrokeménység mérés és (b) a szakítóvizsgálatok eredményei [10]

A zömítővizsgálatok eredményét a mutatja be a 20.ábra.



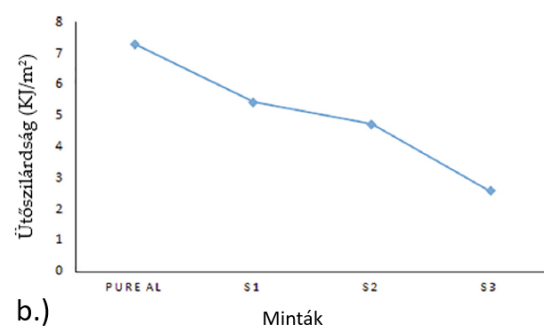
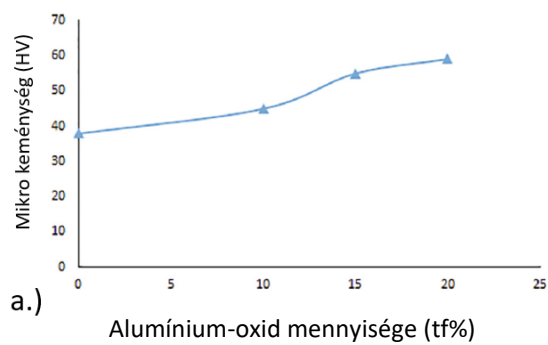
20.ábra A zömítővizsgálatok eredménye (szerzők alapján közölt adatok alapján) [10]

Megállapították, hogy az általuk vizsgált mechanikai tulajdonságokat javítja a szemcsés kerámia erősítőanyag alkalmazása alumínium mátrix esetén.

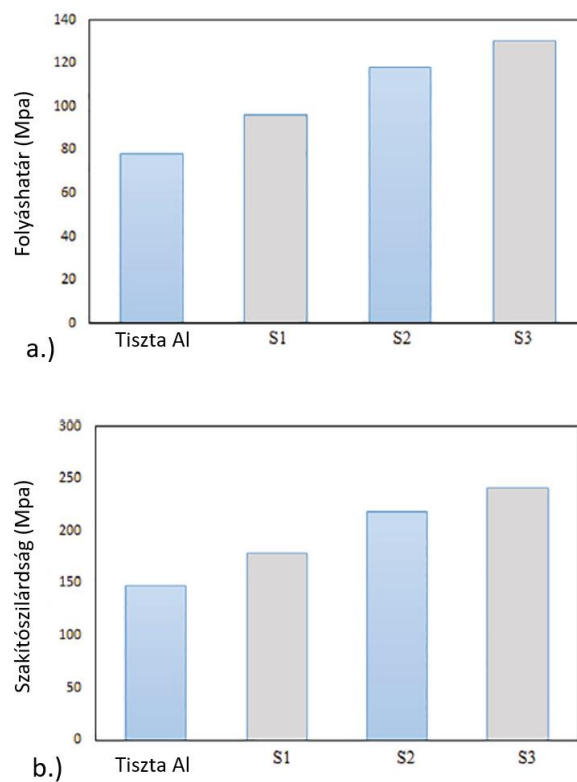
3.6. Alumínium-oxid erősítőanyag

Egy másik fajta, alumínium-oxid erősítőanyagot vizsgáltak Zamani és társai [11]. A keramikus nanorészecskével erősített kompozitot porkohászati úton állították elő. Három különböző, 10 tf%, 15 tf% és 20 tf%-ban erősített mintát készítettek és vizsgáltak.

A 99% tisztaságú, 45 μm szemcseméretű alumíniumport elegyítették a 100 nm-nél kisebb szemcseméretű erősítőanyaggal, majd tömörítették a keveréket hidraulikus préssel, és 630 °C-on 2 órán át szinterelték. Az elkészült mintákon mikroszerkezeti vizsgálatokat, Vickers mikrokeménység mérést, szakítóvizsgálatot, és ütővizsgálatot végeztek, melyek eredményeit jelenítik meg a 21. ábra és a 22. ábra:



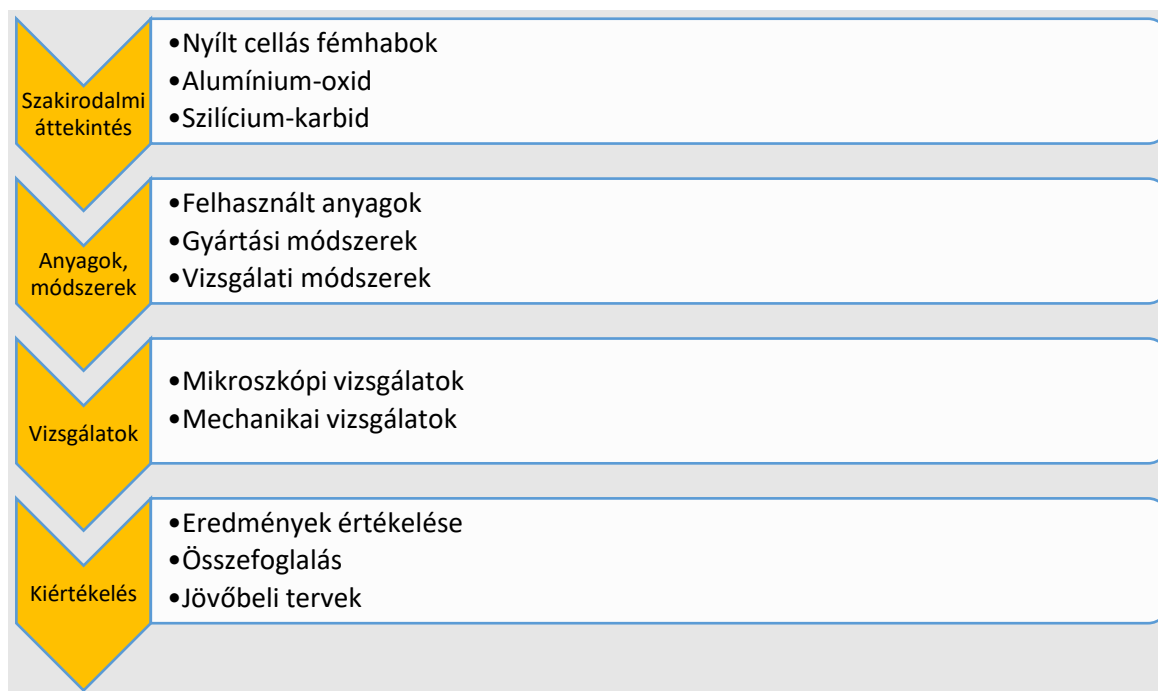
21.ábra (a) Keménységmérés és (b) ütővizsgálatok eredményei [11]



22.ábra (a) Folyáshatár és (b) szakítószilárdság az alkalmazott erősítőanyag mennyiségének függvényében [11]

4. CÉLKITŰZÉSEK

Ebben a munkában arra törekszünk, hogy szemcsés kerámia erősítőanyagot juttassunk nyílt cellás alumínium habok cellaéleibe, és a bejuttatott erősítőanyagnak a mechanikai tulajdonságokra kifejtett hatását vizsgáljuk. A munkákban megfogalmazott célkitűzéseket és folyamatát mutatja be a 23.ábra.



23.ábra Áttekintés

Ezen folyamatábrán látszik, hogy a szakirodalom kutatásakor hangsúlyt fektetünk a nyílt cellás fémhabokról szóló értekezések áttekintésére. A két fő anyag, mellyel dolgozunk az alumínium-oxid és a szilícium-karbid.

Az irodalomkutatást követően gyártási és vizsgálati módszerek, valamint a felhasznált anyagokat mutatjuk be. Kutatásunk során mikroszkópi és mechanikai vizsgálatokat is végeztünk.

Végezetül, értékeljük a kapott eredményeket, konklúziót vonunk, összefoglaljuk a munkánkat és beszámolunk a jövőbeli célokról, tervekről.

5. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

5.1. Anyagok

Mátrixanyagnak Al99,5 kohóalumíniumot választottunk jó képlékenységi tulajdonságai és alacsony ára miatt. Térkitöltőanyagnak hétköznapi útszórósót alkalmaztunk, mivel könnyen beszerezhető és olcsó. A sószemcséket szitálással osztályoztuk, és a 2,6-3 mm méret közti szemcséket használtuk, ilyen szemcséket mutat az 24.ábra.



24.ábra A gyártáshoz használt só szemcsék

Erősítőanyagnak eltérő szemcseméretű alumínium-oxidot és szilícium-karbidot használtunk, amelyeket csiszolóanyag formában a Gránit Csiszolószerszám Kft-től szereztünk be. Az felhasznált kerámia erősítőanyagok szemcseméretét az 1. táblázat tartalmazza. A szemcsék méretének mérését Olympus SZX16 optikai mikroszkóppal készített képeken JMicroVision programmal végeztük. Az erősítőanyagokat az 25.ábra mutatja be.

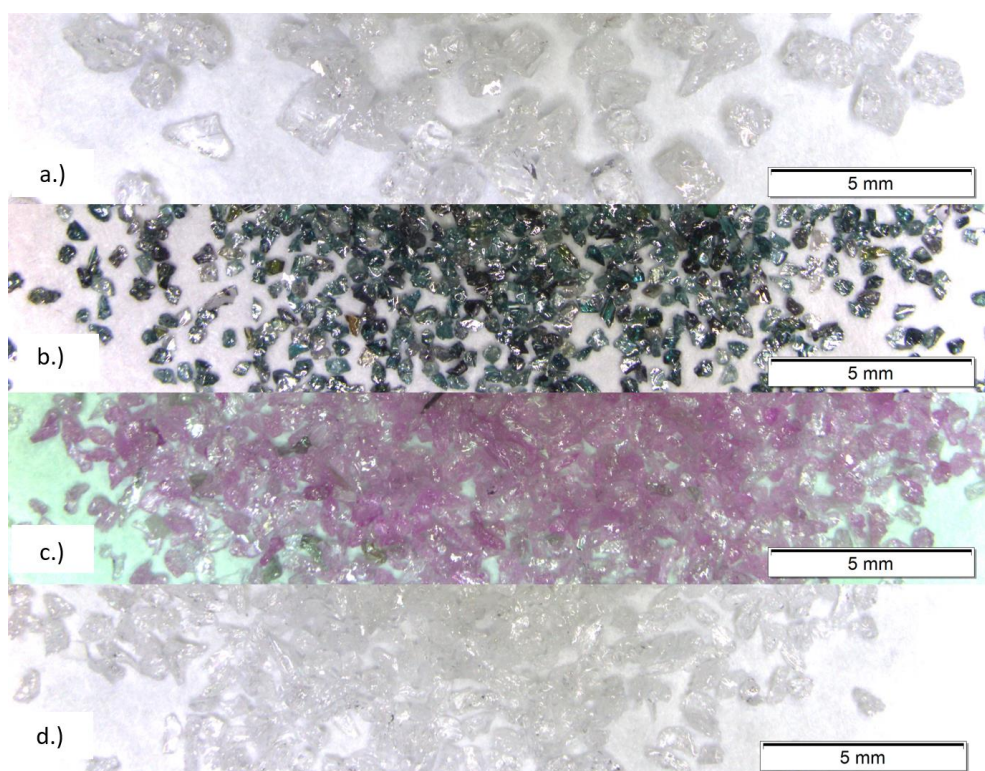
1. táblázat Erősítőanyag szemcsemérete

Erősítőanyag	Névleges méret (mm)	Mért méret (mm)
Al ₂ O ₃ (rózsaszín)	0,35-0,60	0,52±0,07
Al ₂ O ₃ (fehér)	0,35-0,60	0,48±0,07
Al ₂ O ₃ (nagy)	1,00-1,40	1,20±0,21
SiC (zöld)	0,35-0,60	0,42±0,06

Öt mintát készítettünk, a minták megnevezését és a bennük felhasznált erősítőanyagot a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat Minták jelölése

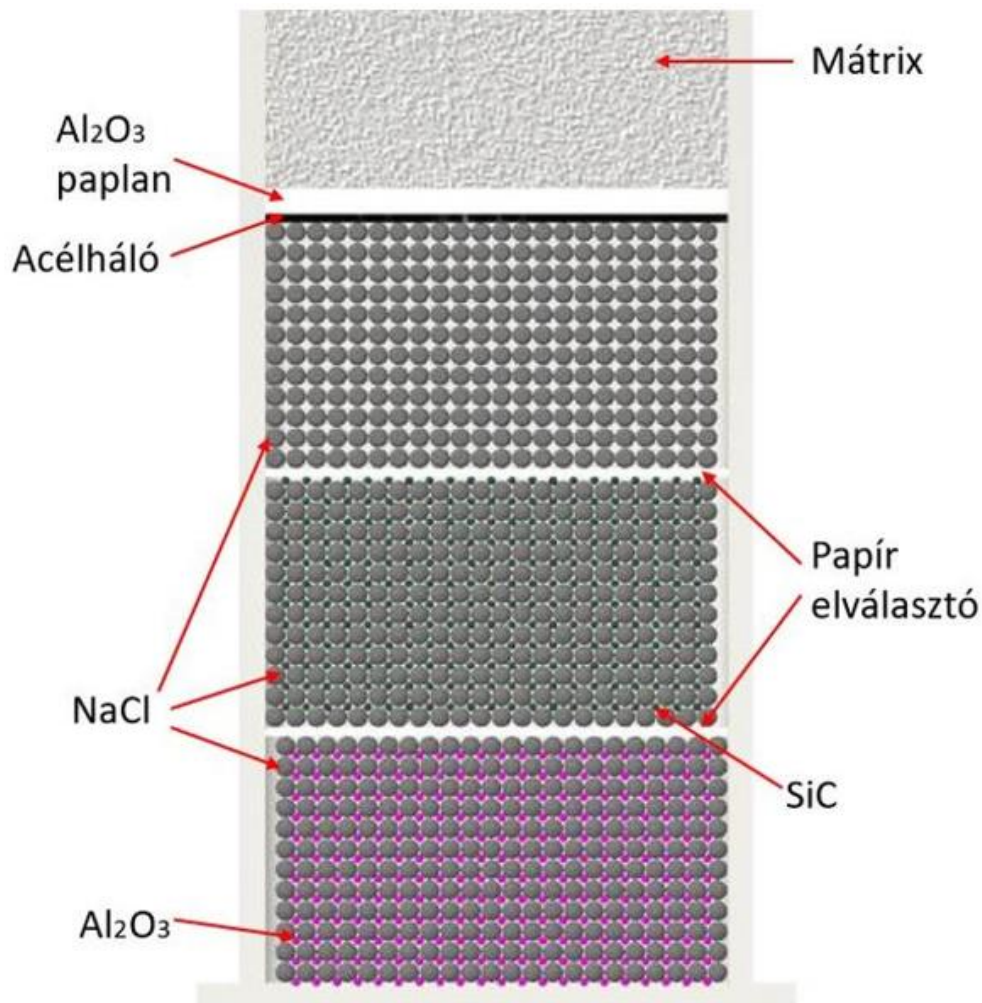
Minta jelölése	Felhasznált erősítőanyag
Referencia	- (referenciaminta)
SiC	SiC
Al ₂ O ₃	Ti tartalmú Al ₂ O ₃ (rózsaszín)
Nagy Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ (nagy)
Gradiens	Al ₂ O ₃ (nagy) + Al ₂ O ₃ (fehér)



25.ábra Felhasznált erősítőanyagok: (a.) nagy szemcsés Al₂O₃, (b.) SiC, (c.) titán tartalmú Al₂O₃ és (d.) kis szemcsés Al₂O₃

5.2. Módszerek

A térkitöltő- és az erősítőanyagot kézi keveréssel elegyítettük, amíg homogén keveréket nem kaptunk. A különböző erősítőanyagokkal készült keverékeket egymás tetejére rétegeztük a tégelyben, egymástól papír elválasztóval elhatárolva, erre mutat be egy sematikus vázlatot az 26.ábra. A tégelyt S235JR szerkezeti acélból készítettük abból kifolyólag, hogy csak egyszer használható fel, így az alapanyag olcsó beszerezhetősége kritérium volt.



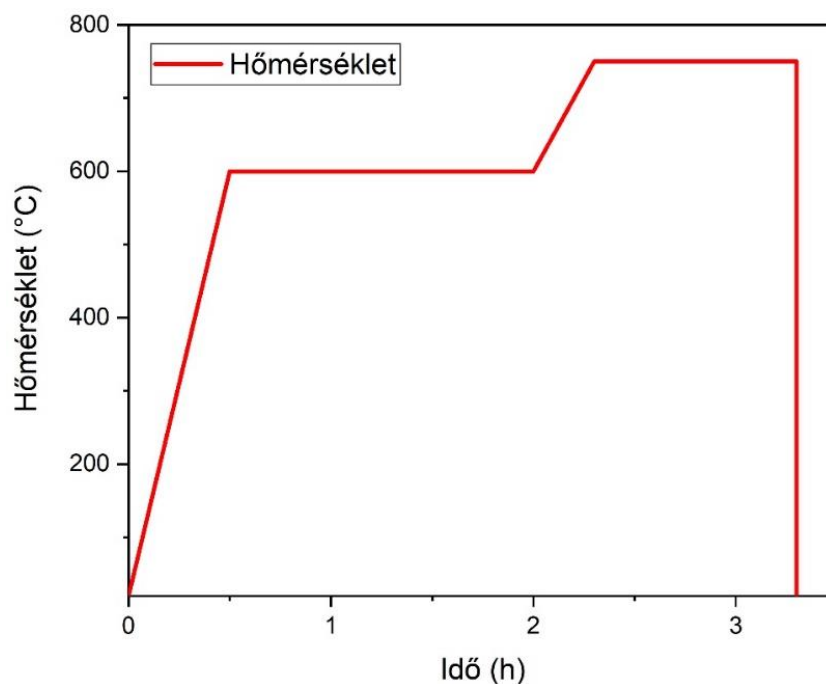
26.ábra Infiltrálási összeállítás sematikus vázlata

A keverékek tégelybe töltése után azokat felülről egy 1.4301 (X5CrNi18-10) acélhálóval zártuk le. Erre azért van szükség, mert a térkitöltőanyag szemcséi az olvadt mátrixhoz viszonyított kis sűrűségük miatt infiltrálás közben felúsznának annak tetejére, és inhomogenitási problémákat okoznának. Az acélháló tetejére egy alumínium-oxid paplan darabot helyeztünk a mátrix anyagra még szilárd formában esetlegesen rátapadó szennyeződések (kosz, olaj) kiszűrése érdekében.



27.ábra Gyártáshoz használt vákuumkemence

A tégelyt behelyeztük a vákuumkemencébe, felfűtöttük 600 °C-ra, és ott hőn tartottuk 2,5 órán keresztül. Ez alatt az idő alatt épült fel a vákuum a kemencében. Ezután 750 °C-ra emeltük a hőmérsékletet és ott hőn tartottuk egy órán keresztül, ezzel megolvasztva a mátrix anyagot. Az infiltrálást 4 bar nyomású argon gázzal végeztük el. A kemencét a 27.ábra, az infiltrálás folyamatának idő- és hőmérséklet értékeit a 28.ábra mutatja be.



28.ábra Infiltrálás idő-hőmérséklet diagramja

Az elkészült tömbből Struers Discotom 10 vágógépen 20x20 mm oldalhosszúságú, 30 mm magas négyzet keresztmetszetű próbatesteket munkáltunk ki. A vágógépet mutatja a 29.ábra. A négyzet keresztmetszetet a kimunkálás megkönnyítése érdekében választottuk. Korábbi kutatások során tapasztaltuk, hogy a kerámia erősítőanyag nagy mértékben megnehezíti az esztergán történő forgácsolást, mivel gyorsan elkopik a kerámia bevonatú forgácsoló lapka is. Ezért döntöttünk a mellett, hogy abrazív gyémánt vágótárcsával történő kivágás után nem forgácsolatjuk hengeresre a próbatesteinket.



29.ábra Struers Discotom 10 abrazív tárcsás vágógép

5.3. Vizsgálatok

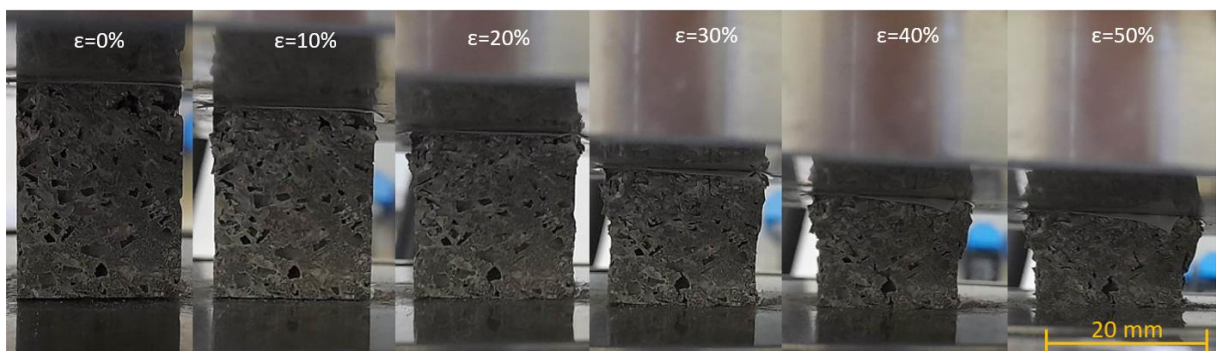
A kész próbatesteket csiszoltuk és políroztuk, majd exikkátorban történő kiszárítás után mikroszkópi vizsgálatokat végeztünk rajtuk

A próbatestek sűrűségét tolómérő és mérleg segítségével határoztuk meg.



30.ábra MTS 810 univerzális anyagvizsgáló gép

A mechanikai tulajdonságokat MTS 810 univerzális anyagvizsgáló gépen az ISO 13314:2011 szabványnak megfelelő egytengelyű, kvázi-statisztikus zömítővizsgálattal határoztuk meg. Az anyagvizsgáló gépet mutatja az 30.ábra. A vizsgálat során Kolofol teflon fólia formájában szilárd kenést alkalmaztunk a nyomólapok és a próbatest azokkal érintkező felületei között. A próbatestek jellegzetes zömítés közbeni viselkedését mutatja be a 31. ábra.

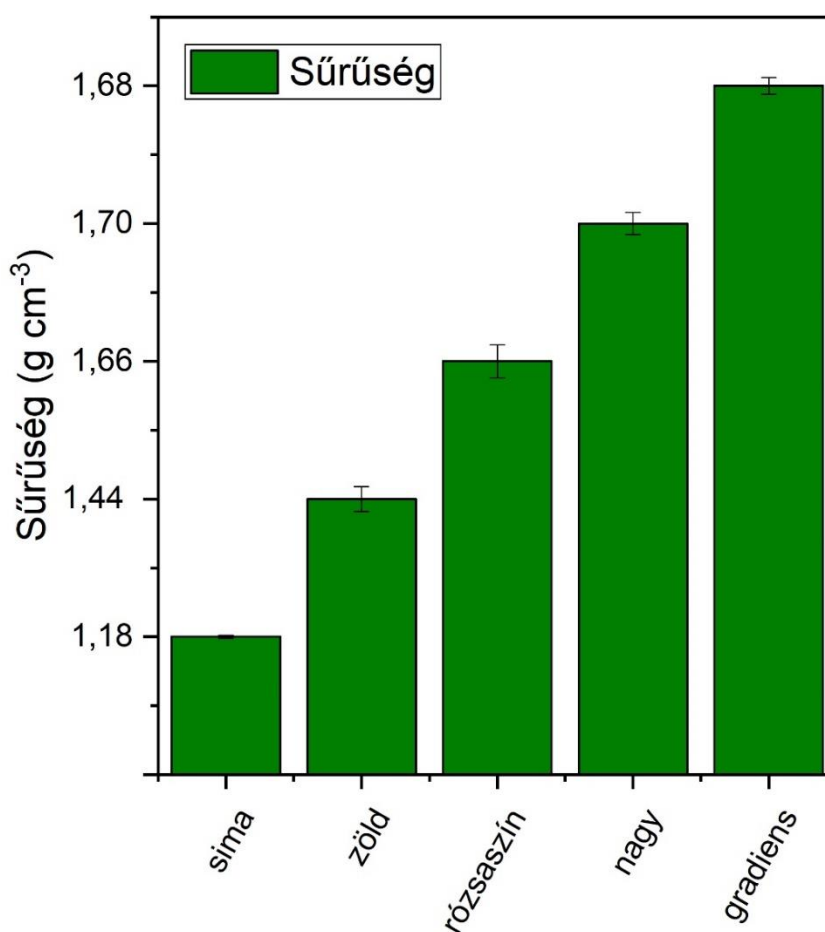


31.ábra Próbatest zömítés közben

6. EREDMÉNYEK

6.1. Sűrűségmérés

A sűrűségmérés eredményeit oszlopdiagrammon ábrázoltuk, ezt mutatja a 32.ábra. Látható, hogy a keramikus erősítőanyag bejuttatása növelte a sűrűséget az átlagos szemcsenagysággal arányosan. Illetve a gradiens minta esetén a kisebb méretű szemcsék be tudnak ülni a nagyobb méretű szemcsék közé, ezáltal növelve az erősítőanyag által kitöltött térfogatot, és ezzel a sűrűséget.

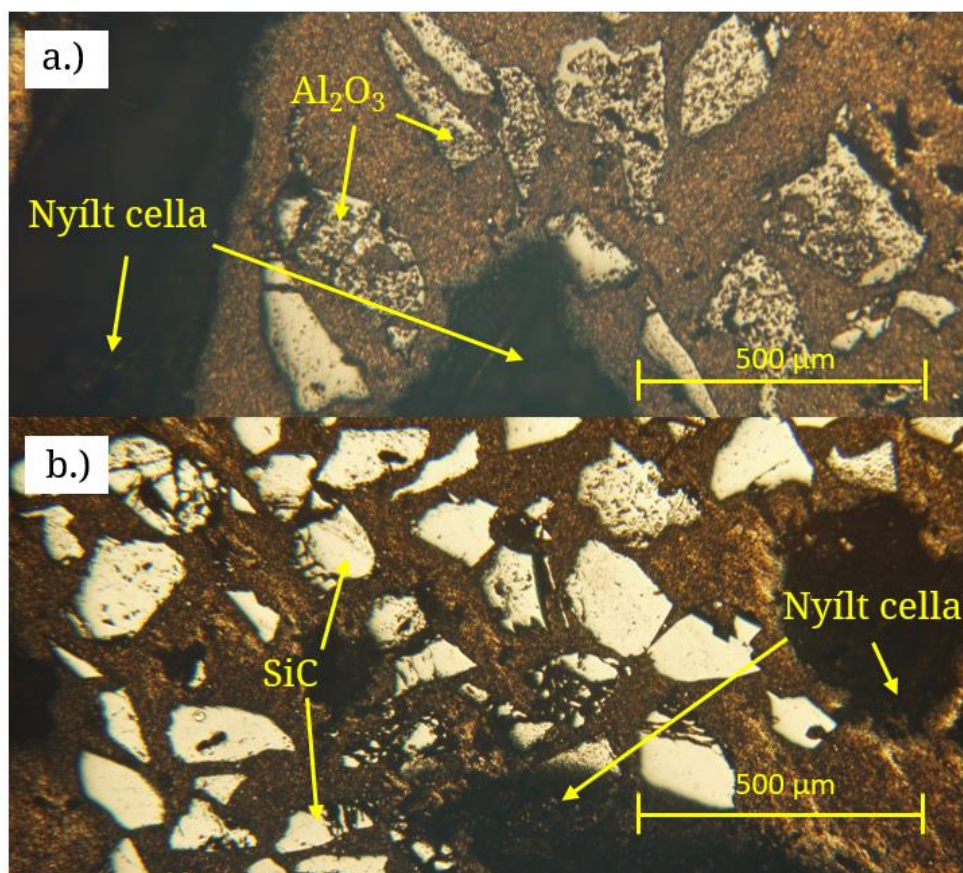


32.ábra A minták sűrűségei

6.2. Optikai vizsgálatok

Az optikai vizsgálat során készített képeket mutat a 33.ábra. A nyílt cellás fémhabokból a térkitöltő anyag maradéktalan eltávolítása problémát okozhat, azonban a mikroszkópi felvételeken nem fedeztünk fel visszamaradt sót. Ennek alapján megállapítottuk, hogy sikeresen eltávolítottuk mosással a só legnagyobb részét. Ezt a sűrűségértékek kis szórása is alátámasztja.

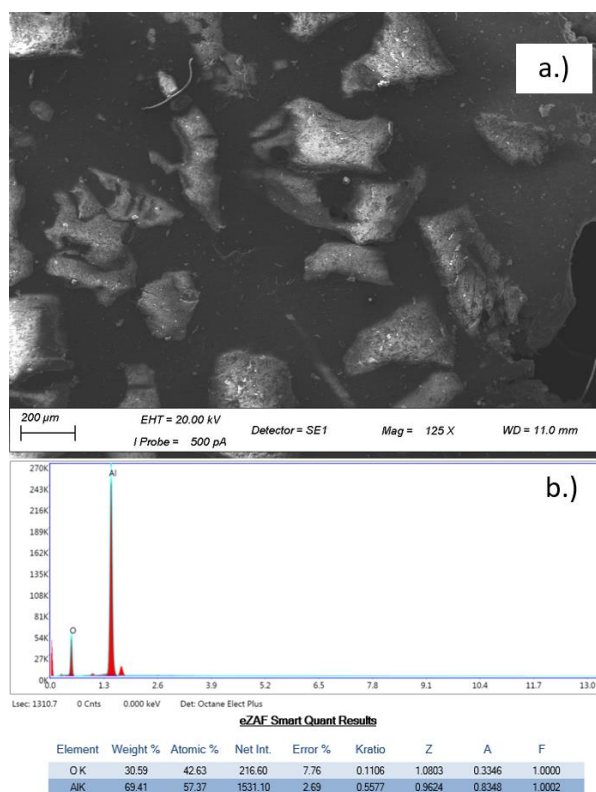
Emellett az optikai mikroszkóppal készült képeken nem fedeztünk fel kiválásokat, illetve nem kívánt porozításokat az erősítőanyag szemcsék felületén, ami arra utal, hogy jó kapcsolat alakult ki a mátrix és az erősítőanyag között.



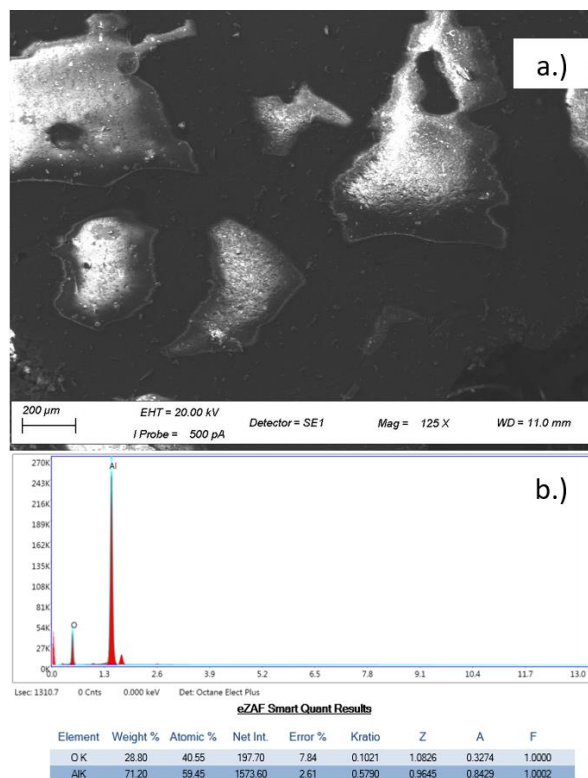
33.ábra (a.) Alumínium-oxiddal és (b.) szilícium-karbiddal erősített minták mikroszkópi képe

A mintákat (Zeiss SEM EVO MA 10) pásztázó elektronmikroszkóppal is vizsgáltuk. A vizsgálat során elektrondiszperzív spektrometriával (EDS) elemeztük az összetételét a fémhaboknak.

A vizsgált próbatestek kémiai összetételét mutatja be a 34. ábra és a 35. ábra.

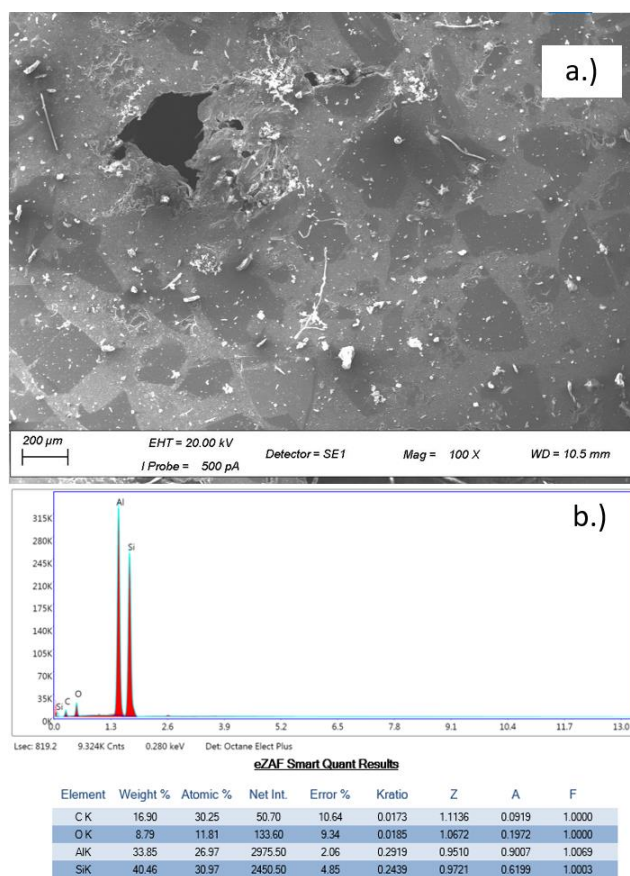


34.ábra (a.) A kis szemcseméretű alumínium-oxiddal erősített mintáról készült felvétel és (b.) az erősítőanyag kémiai összetétele, illetve annak spektrumos ábrázolása



35.ábra (a.) A nagy szemcseméretű alumínium-oxiddal erősített mintáról készült felvétel és (b.) az erősítőanyag kémiai összetétele, illetve annak spektrumos ábrázolása

Az EDS elemzésen látszik, hogy nagy tisztaságú az alumínium-oxid erősítőanyag, nem tartalmaz szennyezőket. A szilícium-karbiddal erősített minta képe és spektrométeres elemzését mutatja be a 36.ábra.



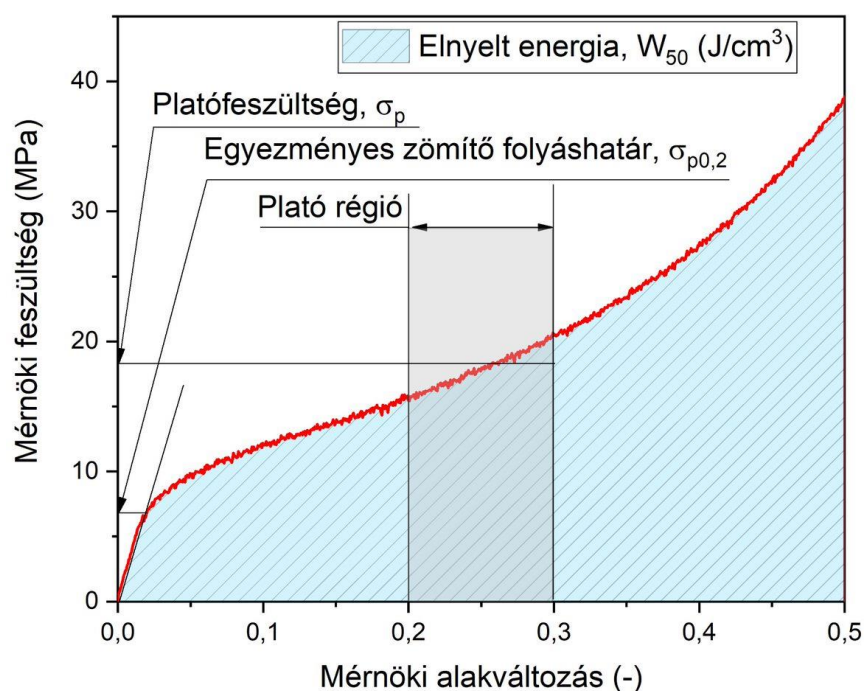
36.ábra (a.) A szilícium-karbiddal erősített mintáról készült felvétel és (b.) az erősítőanyag kémiai összetétele, illetve annak spektrumos ábrázolása

6.3. Mechanikai tulajdonságok

Az elkészült mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozás görbéken a következő mechanikai tulajdonságokat vizsgáltuk:

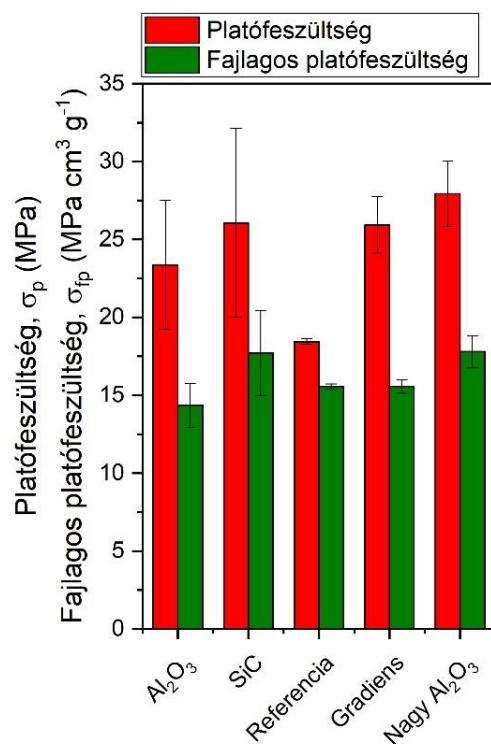
- az egyezményes zömítő folyáshatárt ($\sigma_{p0,2}$), ami a 0,2% mérnöki alakváltozáshoz tartozó feszültségérték;
- a platófeszültséget (σ_p), ami a 20% és 30% mérnöki alakváltozás közti átlagos feszültségérték;
- és az 50% mérnöki alakváltozásig elnyelt energiát (W_{50}), ami a görbe alatti terület az említett 50% alakváltozási értékig.

Ezeknek a tulajdonságoknak vizuális reprezentációját mutatja be a 37.ábra.



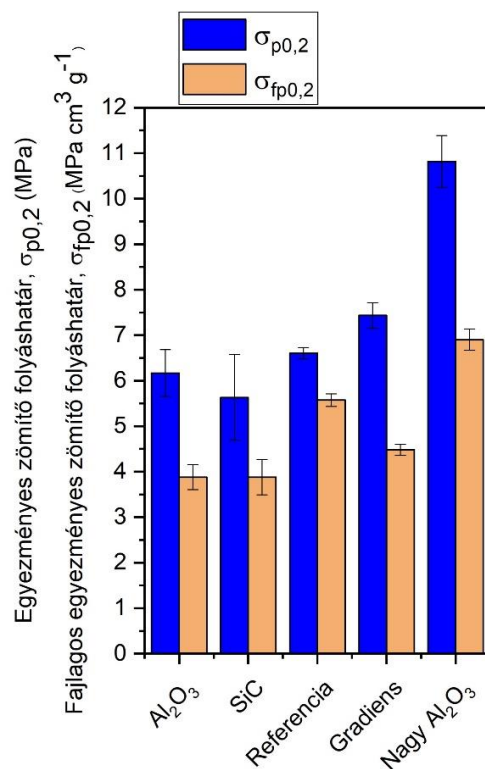
37.ábra A vizsgált mechanikai tulajdonságok vizuális magyarázata

A görbék kiértékelése során kapott eredményeket oszlopdiagramokon ábrázoltuk, a platófeszültséget mutatja be a 38.ábra. Látható, hogy abszolút értékben minden minta meghaladta a referenciaminta értékeit, de a sűrűséggel normált értékek esetén a kis szemcseméretű alumínium-oxiddal erősített és a gradiens minta esetén ez nem mondható el.



38.ábra Platófeszültség

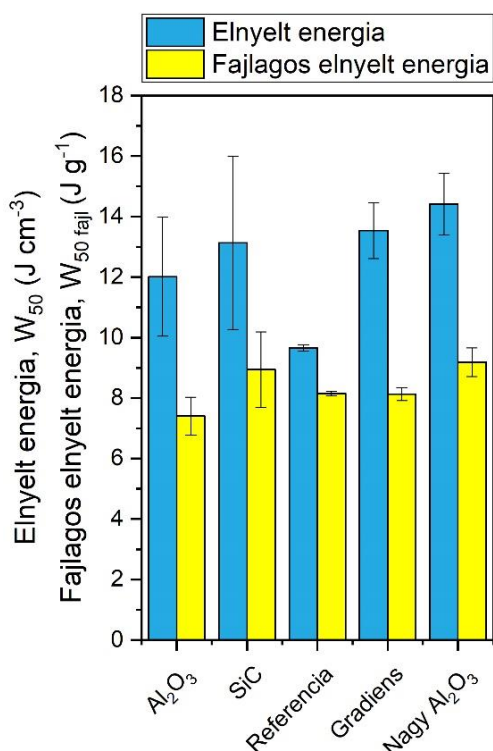
Az egyezményes zömítő folyáshatár értékeit mutatja be a 39.ábra. A diagramról leolvasható, hogy azok a minták, amelyekben kis szemcseméretű erősítőanyagot alkalmaztunk, nem érik el a referenciaminta által produkált értéket. A gradiens és a nagy szemcseméretű alumínium-oxiddal erősített minta meghaladja azt abszolút értékben, de a sűrűséggel normált esetben már csak ez utóbbi javítja ezt a mechanikai tulajdonságot.



39.ábra Egyezményes zömítő folyáshatár

Az 50% mérnöki alakváltozásig elnyelt energia mennyiségét mutatja be a 40.ábra.

Látható, hogy abszolút értékben minden erősített minta meghaladta a referenciaminta által elért értéket, azonban a platófeszültséghez hasonlóan a kis szemcseméretű alumínium-oxidot tartalmazó minták nem érték el azt.



40.ábra 50% mérnöki alakváltozásig elnyelt energia

A diagramokon feltüntetett mechanikai tulajdonságok átlagértékeit és szórásait a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat A mechanikai tulajdonságok táblázatos formában (zárójelben az átlagértékek referenciaértéktől való eltérése egész százalékra kerekítve)

	σ_p (MPa)	σ_{pf} (MPa cm ³ g ⁻¹)	$\sigma_{p0,2}$ (MPa)	$\sigma_{pf0,2}$ (MPa cm ³ g ⁻¹)	W_{50} (J cm ⁻³)	W_{f50} (J g ⁻³)
Referencia	18 ± 0,2	15 ± 0,2	6 ± 0,1	6 ± 0,1	10 ± 0,1	8 ± 0,1
Al₂O₃	23 ± 4,2 (+22%)	14 ± 1,5 (-7%)	8 ± 0,5 (+25%)	4 ± 0,3 (-50%)	12 ± 2,0 (+17%)	7 ± 0,6 (-14%)
SiC	26 ± 6,2 (+31%)	17 ± 2,8 (+12%)	6 ± 0,9 (+0%)	4 ± 0,4 (-50%)	13 ± 2,9 (+23%)	9 ± 1,3 (+11%)
Gradiens	25 ± 1,7 (+28%)	15 ± 0,4 (+0%)	7 ± 0,3 (+14%)	4 ± 0,1 (-50%)	14 ± 0,9 (+29%)	8 ± 0,2 (+0%)
Nagy Al₂O₃	27 ± 2,1 (+33%)	17 ± 1,0 (+12%)	10 ± 0,6 (+40%)	7 ± 0,2 (+14%)	14 ± 1,0 (29%)	9 ± 0,5 (+11%)

7. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE, KÖVETKEZTETÉSEK

A kutatás során sikeresen gyártottunk mátrixanyagában erősített nyílt cellás fémhabot vákuum infiltrálással.

A mikroszkópi vizsgálatok során megállapítottuk, hogy jó kapcsolat alakul ki a mátrixanyag és az erősítőanyag között, nem kívánt porozitás nem alakul ki a szemcsék felületén. Illetve visszamaradt só nem találtunk a vizsgált rétegekben, amely arra utal, hogy megfelelő mértékben sikerült mosással eltávolítani azt a mintákból. Azonban egyes minták esetén a sűrűségmérés során tapasztalt szórás utal a módszer nem tökéletes mivoltára.

A sűrűségmérés során megállapítottuk, hogy a kerámia erősítőanyag bejuttatása növeli a sűrűséget. Ez különösen igaz a gradiens mintákra, ahol a kis szemcsék képesek beülni a nagy szemcsék közé, és így nagyobb térfogatot tölt ki az erősítőanyag.

A mechanikai tulajdonságok kiértékelése során a következő megállapításokat tettük:

- az erősítőanyag alkalmazása minden esetben növeli a platófeszültséget akár 33%-kal, és egyes esetekben az egyezményes zömítő folyáshatár abszolút értékét akár 25%-kal, azonban csökkentheti a sűrűséggel normált értéket akár 50%-kal;
- a kis méretű (0,35-0,60 mm szemcsenagyságú) erősítőanyag csökkenti az egyezményes zömítő folyáshatár értékét;
- a nagy méretű (1,00-1,40 mm szemcsenagyságú) alumínium-oxid erősítőanyag minden mechanikai tulajdonságnak növeli az abszolút értékét akár 40%-kal, és a sűrűséggel normált értéket akár 14%-kal.

Ezek alapján arra a konklúzióra jutottunk, hogy előnyös kerámia erősítőanyagot alkalmazni, és az általunk vizsgáltak közül az 1,00-1,40 mm szemcseméretű alumínium-oxid alkalmazása az optimális.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során az eredeti célkitűzésnek megfelelően sikeresen legyártottuk a mátrixanyagában szemcsés kerámia erősítőanyaggal erősített nyílt cellás fémhabokat vákuum infiltrálással, amiket a további vizsgálatokhoz használtunk. Ez egy költséghatékony és egyszerű eljárás ezen anyagok előállítására, mivel nem igényel nagy méretű gépparkot.

A mikroszerkezeti vizsgálatok során - melyeket optikai és pásztázó elektronmikroszkóppal is elvégeztünk -, megállapítottuk, hogy jó kapcsolat alakul ki a mátrix és az erősítőanyag között. Ez abban nyilvánult meg, hogy nem kívánatos porozítások és kiválások nem jelentek meg az erősítőanyag szemcsék felszínén.

Számunkra pozitív eredménnyel bírt azt is, hogy sőt, mint térkitöltő anyagot nem véltünk felfedezni a mikroszkópi vizsgálat során, ami azért is jó hír, mert sikeresen mostuk ki ezt a térkitöltő anyagot. Ennek tudatában a vizsgálat eredménye sikeresnek mondható. Ezt a megállapítást alátámasztja a minták sűrűségének relatíve kis mértékű szórása is.

A mechanikai vizsgálatok során megállapítottuk, hogy előnyös nagy szemcseméretű alumínium-oxidot alkalmazni, mivel ez minden mechanikai tulajdonság - gondolunk itt példának okáért a platófeszültségre és az egyezményes zömítő folyáshatárra -, abszolút és sűrűséggel normált értékét is növeli. Azonban a kisebb szemcseméretű erősítőanyagok alkalmazása nem minden esetben szükséges, csak akkor, ha az igénybevétel indokolja a platófeszültség értékének, és ez által az elnyelt energia mennyiségének növelését.

Összefoglalásképpen javasoljuk azoknak a kutatóknak, gyártóknak, fejlesztőknek, hogy az irodalomkutatásban említett erősítési módok mellett vegyék számításba a mi eljárásunkat is.

9. SUMMARY

In this study, we successfully produced open-cell metal foams with ceramic reinforcement in the matrix material using vacuum infiltration technology. This is a cost-effective and simple procedure to produce these materials since it does not require large machinery. Microstructural studies, using both optical and scanning electron microscopy, showed that there was excellent contact between the matrix and the reinforcing material. This was reflected in the absence of undesirable porosity and precipitation on the surface of the reinforcement particles.

Another positive result was that we did not detect the salt space-holder material in the microscopic examination, which is spectacular news because we successfully washed out this space holder material. In conclusion, the results of this study can be considered a success. This finding is supported by the relatively small standard deviation in the density of the samples.

Moreover, mechanical tests have shown that it is advantageous to use large grain size alumina, as this increases the absolute and the density specific values of all mechanical properties, such as plateau stress and compressive offset stress. However, the use of smaller grain size reinforcements is not always justified, only when the load justifies an increase in the value of the plateau stress and hence the amount of absorbed energy.

In conclusion, we encourage researchers, manufacturers, and designers to consider our method in addition to the reinforcement methods mentioned in the literature review.

10. JÖVŐBELI TERVEK

A továbbiakban szeretnénk vizsgálni a jelenlegitől eltérő szemcseméretű és anyagú erősítőanyagokat. Emellett különböző mátrix anyagokkal is szándékozunk elvégezni a kísérletet. Jövőbeli tervekhez kapcsolódik az afféle elképzelés is, hogy különböző térkitöltő anyagokat vizsgáljunk annak megállapítása érdekében, hogy a jobb kioldódás változtat-e nagy mértékben a vizsgált tulajdonságokon.

11. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] W. Y. Jang and S. Kyriakides, “On the crushing of aluminum open-cell foams: Part I. Experiments,” *Int J Solids Struct*, vol. 46, no. 3–4, pp. 617–634, 2009, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2008.09.008.
- [2] A. M. Matz, B. S. Mockler, U. Christian, and N. Jost, “Microstructural Evolution in Investment Casted Open-pore Aluminum-based Alloy Foams,” *Procedia Materials Science*, vol. 4, pp. 139–144, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.551.
- [3] P. Yu and M. Qian, “Metal injection moulding of in-situ formed AlN hollow sphere reinforced Al matrix syntactic foam parts,” *Mater Chem Phys*, vol. 137, no. 2, pp. 435–438, Dec. 2012, doi: 10.1016/J.MATCHEMPHYS.2012.09.044.
- [4] T. Wan, Y. Liu, C. Zhou, X. Ding, X. Chen, and Y. Li, “Fabrication of high-porosity open-cell aluminum foam via high-temperature deformation of CaCl₂ space-holders,” *Mater Lett*, vol. 284, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.matlet.2020.129018.
- [5] P. T. Nivala and S. P. James, “Metal open-cell foams with periodic topology fabricated by spark plasma sintering,” *Materialia (Oxf)*, vol. 8, p. 100428, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.MTLA.2019.100428.
- [6] N. Movahedi, G. E. Murch, I. V. Belova, and T. Fiedler, “Manufacturing and compressive properties of tube-filled metal syntactic foams,” *J Alloys Compd*, vol. 822, p. 153465, May 2020, doi: 10.1016/J.JALLCOM.2019.153465.
- [7] Y. An, S. Yang, E. Zhao, and Z. Wang, “Characterization of metal grid-structure reinforced aluminum foam under quasi-static bending loads,” *Compos Struct*, vol. 178, pp. 288–296, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.07.031.
- [8] K. Sun *et al.*, “Preparation and quasi-static compression properties of hybrid aluminum matrix syntactic foam reinforced with glass cenospheres and silicon carbide nanowires,” *Mater Charact*, vol. 195, p. 112496, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.MATCHAR.2022.112496.
- [9] Y. Li *et al.*, “Magnetorheological shear thickening gel reinforced iron-nickel foam composites with tunable energy absorption performance,” *Compos*

Part A Appl Sci Manuf, vol. 174, p. 107718, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2023.107718.

[10]S. Sivananthan, K. Ravi, and S. J. Samuel, “Effect of SiC particles reinforcement on mechanical properties of aluminium 6061 alloy processed using stir casting route,” *Mater Today Proc*, vol. 21, pp. 968–970, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.MATPR.2019.09.068.

[11]N. A. B. N. Zamani, A. K. M. Asif Iqbal, and D. M. Nuruzzaman, “Fabrication and characterization of Al₂O₃ nanoparticle reinforced aluminium matrix composite via powder metallurgy,” *Mater Today Proc*, vol. 29, pp. 190–195, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.05.541.

11.1. Ábrajegyzék

1.ábra	CT felvétel a 8,23% relatív sűrűségű, 10-es szitalyukszámú alumíniumhabról [1]	8
2.ábra	A darabolás helyei (balra) és mikroszerkezeti felvételek (jobbra) az öntés irányából nézve [2]	9
3.ábra	Vickers keménység az öntés irányi véglaptól mért távolság függvényében [2]	10
4.ábra	Töretfelületek pásztázó elektronmikroszkópos felvétele (a) szinterelés és 12 órás, 560 °C-os nitridálás után, és (b) 2 órás, 700 °C nyílt-zárt pórustranszformáció után [3].....	11
5.ábra	A gyártási eljárás sematikus ábrája [3].....	11
6.ábra	A gyártási eljárás sematikus vázlata [4]	12
7.ábra	Mikroszkópi felvétel a végtermékekről (a) zárt cellás előformázott (b), pórusos nyílt cellás előformázott és (c) nyílt cellás előformázott próbadarabokról [4]	13
8.ábra	A két különböző, 19 (A réteg) és 12 (B réteg) réz gömbhéjat tartalmazó réteg elhelyezkedése a grafit szerszámon belül (külső fekete kör) [7].....	13
9.ábra	(a.) Az elkészült habok mikro-CT-vel készített 3D modellje jelölve a pórusok periodicitását és (b.) fényképfelvétel ugyanarról a mintáról más orientációban [5].....	14
10.ábra	(a.) Az öntési összeállítás sematikus ábrája és (b) az elkészült próbatest	15
11.ábra	(a.) ZA27 mátrixú fémhab és (b.) alumínium cső köré öntött fémhab jellegzetes zömítés közbeni viselkedése, ahol az ϵ értéke az alakváltozást mutatja [6].....	16
12.ábra	Az alumínium cső köré öntött fémhab keresztmetszete $\epsilon=0,5$ és $\epsilon=0,8$ deformációnál [6].....	16
13.ábra	Az öntési folyamat sematikus ábrája [7]	17
14.ábra	Feszültség eloszlás a próbatestekben kvázi-statikusan, hárompontos hajlító vizsgálat során: a barna jelöli az erősen deformálódott területeket, illetve a lila, a sárga és a zöld nyilak jelölik rendre a hajlító terhelést, a húzó feszültséget és a nyomófeszültséget [7].....	18
15.ábra	A gyártási eljárás sematikus vázlata [8]	19
16.ábra	SEM felvétel a SiC nanohuzallal erősített Al mátrixú kompozitról [8]	19
17.ábra	Magnetoreológiai folyadékkal töltött nyílt cellás fémhab sematikus ábrája [9]	20

18.ábra	Magnetoreológiai folyadékkal töltött nyílt cellás fémhab jellegzetes zömítés közbeni viselkedése 0,1 T mágneses fluxussűrűség mellett [9]	21
19.ábra	(a) A Vickers mikrokeménység mérés és (b) a szakítóvizsgálatok eredményei [10]	22
20.ábra	A zömítővizsgálatok eredménye (szerzők alapján közölt adatok alapján) [10]	23
21.ábra	(a) Keménységmérés és (b) ütővizsgálatok eredményei [11]	24
22.ábra	(a) Folyáshatár és (b) szakítószilárdság az alkalmazott erősítőanyag mennyiségének függvényében [11]	24
23.ábra	Áttekintés	25
24.ábra	A gyártáshoz használt só szemcsék	26
25.ábra	Felhasznált erősítőanyagok: (a.) nagy szemcsés Al_2O_3 , (b.) SiC, (c.) titán tartalmú Al_2O_3 és (d.) kis szemcsés Al_2O_3	27
26.ábra	Infiltrálási összeállítás sematikus vázlata	28
27.ábra	Gyártáshoz használt vákuumkemence	29
28.ábra	Infiltrálás idő-hőmérséklet diagramja	29
29.ábra	Struers Discotom 10 abrazív tárcsás vágógép	30
30.ábra	MTS 810 univerzális anyagvizsgáló gép	31
31.ábra	Próbatest zömítés közben	31
32.ábra	A minták sűrűségei	32
33.ábra	(a.) Alumínium-oxiddal és (b.) szilícium-karbiddal erősített minták mikroszkópi képe	33
34.ábra	(a.) A kis szemcseméretű alumínium-oxiddal erősített mintáról készült felvétel és (b.) az erősítőanyag kémiai összetétele, illetve annak spektrumos ábrázolása	34
35.ábra	(a.) A nagy szemcseméretű alumínium-oxiddal erősített mintáról készült felvétel és (b.) az erősítőanyag kémiai összetétele, illetve annak spektrumos ábrázolása	34
36.ábra	(a.) A szilícium-karbiddal erősített mintáról készült felvétel és (b.) az erősítőanyag kémiai összetétele, illetve annak spektrumos ábrázolása	35
37.ábra	A vizsgált mechanikai tulajdonságok vizuális magyarázata	36
38.ábra	Platófeszültség	36
39.ábra	Egyezményes zömítő folyáshatár	37
40.ábra	50% mérnöki alakváltozásig elnyelt energia	38