



TDK 2021

Lolbert-Szabó Júlia, Szovák Benedek

Mátrixanyagában erősített szintaktikus
fémhabok gyártása és vizsgálata



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLÓGIA TANSZÉK

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

LÓLBERT-SZABÓ JÚLIA

(GÉPÉSZMÉRNÖKI SZAK MSC, 4. FÉLÉV)

SZOVÁK BENEDEK

(GÉPÉSZMÉRNÖKI SZAK BSC, 7. FÉLÉV)

Mátrixanyagában erősített szintaktikus fémhabok gyártása és vizsgálata

Konzulensek:

Kemény Alexandra

doktorandusz, BME ATT

Károly Dóra

tanársegéd, BME ATT

Budapest, 2021

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: 2021.11.07.

.....

konzulens

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Lolbert-Szabó Júlia (DOF3FT)* 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, 2021.11.07.

.....

hallgatók

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	3
1. Összefoglalás	4
1.1. Summary	5
2. Bevezetés	6
2.1. Célkitűzések	8
2.2. Áttekintés	9
3. Szakirodalmi áttekintés	10
3.1. Fémhabok	10
3.2. Szintaktikus fémhabok	13
3.3. Erősítőanyagok	15
4. Anyagok és módszerek	24
5. Eredmények	35
5.1. Sűrűségmérés	35
5.2. Mikroszerkezeti vizsgálatok	37
5.3. Mechanikai vizsgálatok	39
5.4. Ár összehasonlítása	45
6. Eredmények értékelése, következtetések	48
6.1. Jövőbeli tervek	49
7. Felhasznált források	51
7.1. Ábrajegyzék	53
8. Melléklet	56

ELŐSZÓ

Ahogy Mark Twain mondta: „Nincs olyan, hogy új ötlet. [...] Egyszerűen fogunk sok régi ötletet, amiket egyfajta mentális kaleidoszkópba rakunk. Megforgatjuk őket, és így új és érdekes kombinációkat alkotnak.” /szabad fordításban/. Ebben a munkánkban mi is két régebbi, az anyagok mechanikai tulajdonságainak változtatására irányuló ötletet kombináltunk, amellyel az anyag sűrűségének csökkentését egyidejűleg próbáljuk meg a szilárdságának növelésével.

* * *

Köszönetnyilvánítás

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

Ezen kívül köszönjük az Anyagtudomány és Technológia Tanszéknek a rendelkezésünkre bocsátott eszközöket és a kollégáknak a segítséget. Külön köszönet illeti a Gyártástudomány és -technológia Tanszék munkatársait a próbatestek kimunkálásáért.

Budapest, 2021.11.07.

Lolbert-Szabó Júlia, Szovák Benedek

1. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunkban szintaktikus fémhabok mátrix anyagbeli erősítésének lehetőségét vizsgáltuk. A fémhabok kis sűrűségükből adódó nagy fajlagos nyomószilárdsággal és energiaeelnyelő képességgel rendelkeznek. Ezen tulajdonságok fokozására tettünk kísérletet a sűrűség jelentős mértékű megnövelése nélkül.

Kétféle töltőanyaggal, duzzasztott agyagkavicccsal (Lightweight Expanded Clay Aggregate Particles, LECAP) és kerámia gömbhéjjal (Ceramic Hollow Spheres, CHSs) töltöttük az A356 alumíniumötvözet (AlSi7Mg) mátrix anyagot, és ehhez adagoltunk 1 mm és 0,4 mm szemcseméretű alumínium-oxidot (Al_2O_3) és 0,4 mm szemcseméretű szilícium-karbidot (SiC) 20 tf%-ban. A próbatestekhez szükséges darabokat kisnyomásos infiltrációs öntéssel készítettük, a próbatesteket vágógépen és esztergaképen forgácsolással munkáltuk, illetve munkáltattuk ki.

Az így elkészült próbatestek mikroszerkezeti vizsgálatát csiszolás után optikai mikroszkóppal végeztük, a mechanikai tulajdonságaikat kvázi-statisztikus zömítőpróbával vizsgáltuk. Ennek során felvettük a mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozás görbéket, amelyek alapján meghatároztuk a törőfeszültséget, a platófeszültséget, és az 50%-os alakváltozáshoz tartozó elnyelt energiát. Ezeket az értékeket sűrűséggel fajlagosítva értékeltük. Ezen kívül a töltőanyagok árát figyelembe véve vizsgáltuk a költséghatékonyságot.

A vizsgálatok során megállapítottuk, hogy az erősítőanyag hozzáadása nem minden esetben eredményez javulást az említett mechanikai tulajdonságokban. Ezen kívül megfigyeltük, hogy a mátrix anyag teljes mértékben körül vette mind a töltő-, mind az erősítőanyagot, ami mutatja, hogy az infiltrálás alkalmas eljárás mátrix anyagában erősített szintaktikus fémhabok gyártására.

Kulcsszavak: *fémhab, szintaktikus fémhab, kompozit*

1.1. Summary

In this study we investigated the possibility of reinforcing syntactic 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 two different type of filler material, the Lightweight Expanded Clay Aggregate Particles (LECAP) and Ceramic Hollow Spheres (CHSs), A356 aluminium alloy (AlSi7Mg) as matrix material, and we added 20 V/V% of different type and size of reinforcement such as alumina with the average particle size of 1 mm and 0,4 mm, and silicon carbide with the average particle size of 0,4 mm. The pieces required for the specimens were made by low-pressure infiltration casting, then the specimens were machined with sawing- and cutting machines.

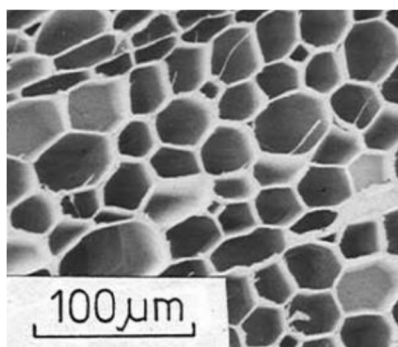
We made microstructural studies of the polished specimens with optical microscope and studied the mechanical behaviours with quasi-static compression testing. We recorded the engineering stress-engineering strain curves what we used to calculate the compressive strength, the plateau stress and the absorbed energy which belongs to 50% strain. These values were evaluated specified by the density values. In addition, we examined cost-effectiveness by considering the price of filler materials.

During the tests, it was found that the addition of the reinforcing material did not always result in an improvement in the said mechanical properties. In addition, it was observed that the matrix material completely surrounded both the filler and the reinforcing material, indicating that infiltration is a suitable process for the production of syntactic metal foams reinforced in the matrix material.

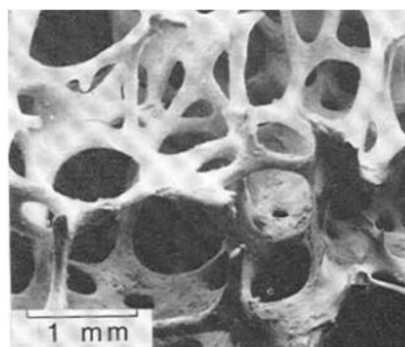
Keywords: *metal foam, syntactic metal foam, composite*

2. BEVEZETÉS

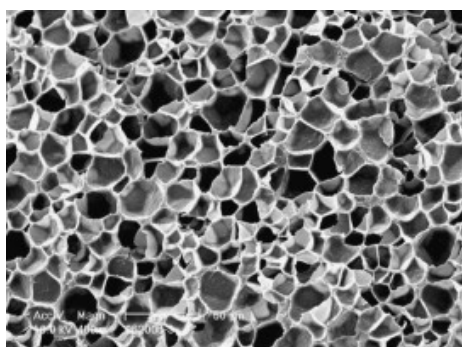
Környezetünkben számos olyan anyag megtalálható, amelyek szerkezete üreges cellákat tartalmaz. Az ilyen anyagokat nevezik celluláris anyagoknak. A természetben megtalálható celluláris anyagok közé tartoznak többek között a fák (1. ábra(a)), a tengeri korallok, szivacsok, az emberi szervezetben pedig például a koponya és a combcsont (2. ábra(b)). Ezek a természetben előforduló anyagok inspirálták az első mesterséges celluláris anyagok kifejlesztését. Először a polimer habok (1. ábra(c)) jelentek meg az iparban, amelyek felhasználása széleskörűen elterjedt, nagy mennyiségben használja ezt az alapanyagot az építő- illetve a járműipar. Mindkét területen igen fontos szempont a tömegcsökkentés és ennek az elvárásnak a habosított polimerek kitűnően megfelelnek, ugyanis a habosítási folyamatokkal akár 95%-kal kisebb sűrűségű anyagokat tudnak létrehozni a kiindulási alapanyaghoz képest. Az iparban jelen vannak még az úgynevezett kerámia habok is, amelyek szintén celluláris anyagok (1. ábra(d)). A kerámia habokat jó hőállóságuk és egyedi szerkezetük miatt gyakran használják dízel autók részecskeszűrőjében, nagy hőmérsékletű termikus szigetelésekben, valamint egyes kerámiák jó biokompatibilitási és szilárdsági tulajdonságai miatt orvostechikai anyagokként is [1][2].



(a)



(b)



(c)

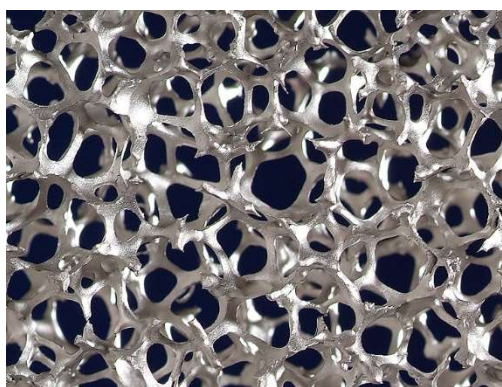


(d)

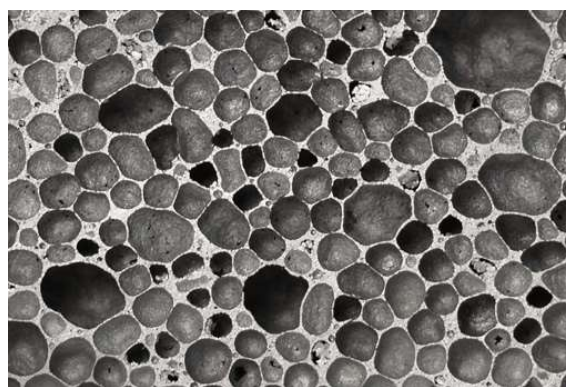
1. ábra: Néhány példa celluláris anyagok bemutatására: (a) fa szerkezeti felépítése [3], (b) szivacsos csontszövet [3], (c) polimer hab [4], (d) kerámia hab [5]

Napjainkban a mérnöki felhasználási területen egyre jobban elterjedőben vannak a fémhabok. Térnyerésüket kis sűrűségükből adódó nagy fajlagos energiaeinyelő képességüknek (mind mechanikai-, mind hőenergia szempontjából) és szilárdságuknak köszönhetik. Fő igénybevételük a kompresszió, egyéb igénybevételekkel szembeni ellenállásuk nem felel meg az általános szerkezeti anyagokkal szemben támasztott elvárásoknak.

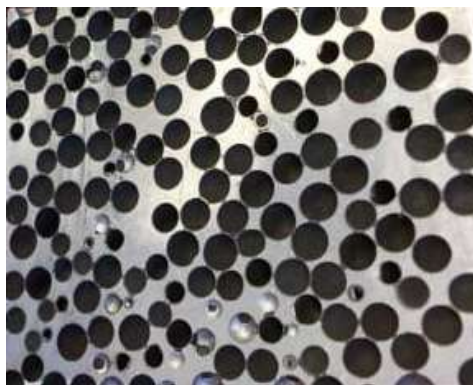
A fémhabokat szerkezetük alapján két fő csoportba oszthatjuk, a nyíltcellás (2. ábra(a)) és a zártcellás (2. ábra(b)) anyagokra. A különbség a két csoport között, mint azt a nevük is sugallja, hogy az anyagban található üregek (cellák) mennyire különülnek el egymástól. Zártcellás anyag esetén az egyes üregek teljesen elhatárolódnak egymástól, míg nyíltcellás habok esetén az egymás melletti cellák között nincs anyaghatár, az anyaghiányos területek összeérnek.



(a)



(b)



(c)

2. ábra: Különböző szerkezetű fémhabok: (a) nyílt cellás [6], (b) zárt cellás [7], (c) szintaktikus fémhab [8]

A szintaktikus fémhabok (2. ábra(c)) a zártcellás habok alcsoportját képezik. Ezekben az anyagokban az üreges szerkezetet töltőanyag (például gömbhéj) mátrixanyagba való bejuttatásával alakítják ki. A szintaktikus kifejezés a görög „συνταξις” szóból ered, jelentése rendszer, elrendezés, rendbe rakás. Ez arra utal, hogy az anyagon belüli a porózus szerkezetet

létrehozó üregek hozzávetőlegesen szabályosan helyezkednek el, méretük és alakjuk (technológiai korlátokból adódó határértékeken belül) azonos [9].

A teherbírás maximalizálására és a súly minimalizálására irányuló törekvések egy másik fő területe a kompozit anyagok alkalmazása. Ezt úgy érik el, hogy a relatíve kis mennyiségű, nagy teherbírású erősítőanyagot kisebb sűrűségű mátrixanyagba ágyaznak. Így kompromisszumot hoznak létre, mivel változatlan befoglaló méretek mellett a tömeg csökken, azonban a szerkezet csak bizonyos irányú terhelések elviselésére alkalmas. Az erősítést anyag és irány szerint csoportosítják, ez utóbbi kategóriát az egy-, kettő- illetve háromdimenziós felosztás alkotja annak alapján, hogy az adott erősítési forma milyen irány(ok)ban játszik erősítő szerepet.

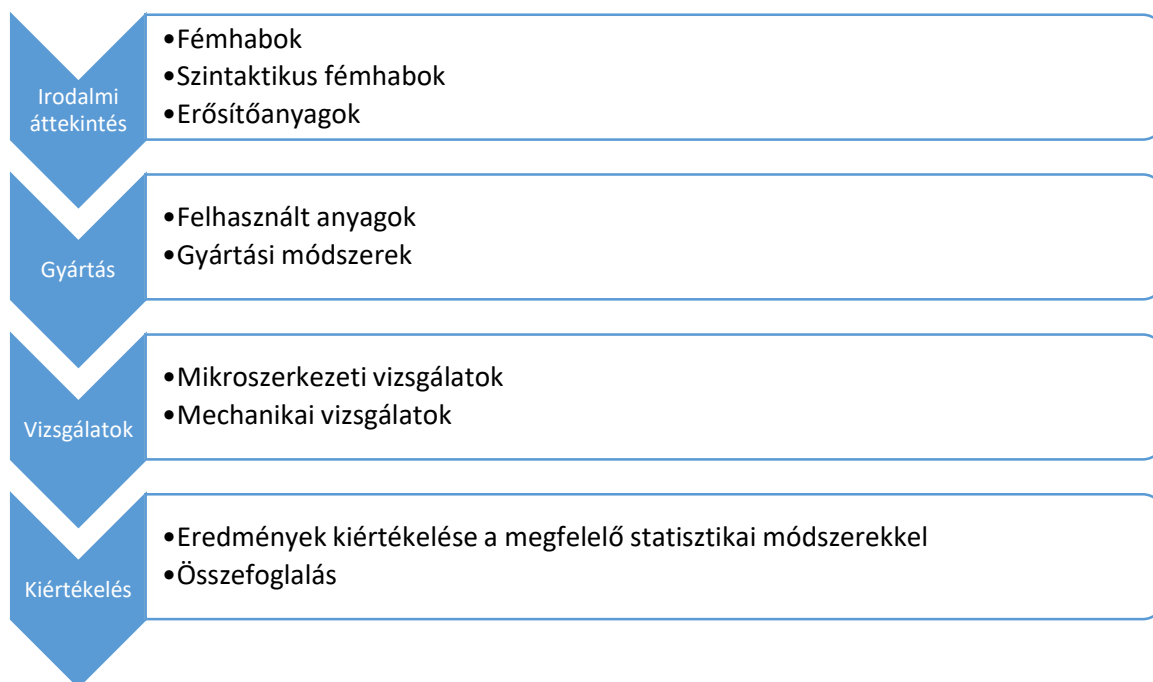
2.1. Célkitűzések

Ebben a munkánkban arra törekszünk, hogy olyan szintaktikus fémhabot hozzunk létre, amely mátrixanyaga erősített, és az erősítőanyag fémhab mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatását vizsgáljuk kétféle töltőanyag, duzzasztott agyagkavics (Lightweight Expanded Clay Aggregate Particles, LECAP (3. ábra(a))) és kerámia gömbhéj (Ceramic Hollow Spheres, CHSs (3. ábra(b))) mellett. Mindkét esetben alumínium-oxidot (Al_2O_3) és szilícium-karbidot (SiC) használunk erősítőanyagként. A mátrixanyag A356 alumíniumötvözet (AlSi7Mg). Az erősítés, amit használunk, a háromdimenziós csoportba tartozik, az erősítőanyag részecskeszerű mivoltából és véletlenszerű elrendezéséből adódóan minden irányban azonos mértékű teherviselési növekedést hoz létre, ez a hatás azonban csekélyebb, mint például a szálerősítés esetén, ami csak a szálak hosszirányában fejti ki ezt a hatást, abban az irányban azonban nagyobb mértékben.

E cél elérésére irányuló törekvéseink lépéseit mutatja be vázlatosan az alábbi ábra (4. ábra).



3. ábra: Felhasznált töltőanyagok: (a) duzzasztott agyagkavics, (b) kerámia gömbhéj



4. ábra Célkitűzéseink vázlatosan összefoglalva

2.2. Áttekintés

Először a szakirodalomból áttekintjük az alapfeltevéseinkhez legjobban kapcsolódó részt. Először a fémhabok mibenlétéről és felhasználásáról ejtünk szót, ezután külön kitérünk a szintaktikus fémhabokra. Mivel nem találtunk a témánkat teljes mértékben felölelő publikációt, így az erősítőanyagok alumínium mátrixú kompozitokra gyakorolt hatását vizsgáljuk.

A továbbiakban bemutatjuk a gyártási és mérési eljárásokat, azon belül az öntést, a hőkezelést, és a különböző mikroszerkezeti és mechanikai vizsgálatokat. Ezután értékeljük a kapott eredményeket, majd levonjuk a végközvetkeztetéseket. Végül betekintést nyújtunk a jövőbeli terveinket illetően, hogy milyen irányban indulunk tovább a téma kutatásával kapcsolatban.

3. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

3.1. Fémhabok

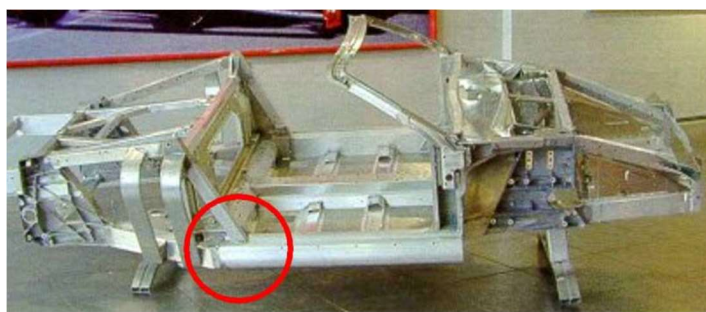
A fémhabok olyan cellás szerkezetű anyagok, ahol a mátrix anyaga fém és ebben a befoglaló anyagban találhatóak meg a gáz halmazállapotú cellák. Ennek a hab szerkezetnek köszönhető, hogy ezek az anyagok kis sűrűségűek, ezen felül pedig egyedülálló mechanikai, elektromos, termikus és akusztikus tulajdonságokkal rendelkeznek. Ezeket a tulajdonságokat befolyásolni tudják a habot alkotó szilárd fázis, azaz a mátrix anyagtulajdonságai, a szilárd fázis relatív sűrűsége és a szilárd fázis térbeli elrendeződése, azaz a fémhab szerkezete [10].

Napjainkban már számos módszer áll rendelkezésre a gyártásra. Léteznek öntési eljárások, porkohászati módszerek, illetve bevonásos technológiák is. Öntési eljárásokba tartoznak a különböző habosításos eljárások, amellyel zárt cellás fémhabokat lehet készíteni. Az eljárás lényege, hogy az olvadt fémbe gázt juttatnak, amelyet forgólapát vagy pedig fúvóka segítségével kisebb gázbuborékokra bontanak és egyenletesen eloszlatnak az olvadékban. A fémolvadékba adalékanyagokat is juttatnak, amellyel növelik a fémolvadék viszkozitását és a hab stabilitását. Az adalékanyagot tartalmazó olvadék és buborék keverékét egy szállítószalagra vezetik ki és a megszilárdulás után utómunkával alakítják ki a fémhab kívánt formáját. Az eljárás egyik nagy hátránya, hogy nehéz biztosítani a homogén szerkezet létrejöttét. Porkohászati gyártástechnológiába sorolható, amikor a habosító anyaggal összekevert fémport izosztatikus préssel, hengerléssel vagy extrudálással tömörítenek, majd egy kokillában melegítenek a fém olvadáspontja fölé. A habosító anyag általában titán-hidrid, amely a melegítés során elbomlik és hidrogén gáz fejlődik. Ez a hidrogén gáz fejlődés hozza létre a zárt cellás szerkezetet az olvadt fémbe [10][11][12].

Nyílt cellás szerkezet érhető el akkor, hogyha granulátumra öntik az olvadékot. A módszer lényege, hogy a fém olvadáspontján stabil granulátum anyagot használnak, ilyen például a konyhasó. Eljárás folyamata, hogy az öntőformába töltik az előmelegített granulátumot, majd erre öntik az olvadt fémet. Inert gáz segítségével túlnyomást hoznak létre a rendszerben, amely segíti az olvadék granulátumok közé való áramlását. Az így kapott só-fém kompozitból a sót víz segítségével kioldják. Egy másik öntési eljárás, amivel szintén nyílt cellás habokat lehet létrehozni, a precíziós öntés. Ahogy a hagyományos precíziós öntés során, itt is először egy mintát készítenek, mégpedig úgy, hogy egy kívánt szerkezetű polimer hab üregeit kiöntik folyékony, hőálló anyaggal, amelyet megszilárdítanak. Ezután a polimert elpárologtatják és így megkapjuk a mintát, amibe az olvadt fémet öntik. Ekkor a fém felveszi a kívánt alakot. A megszilárdulás után eltávolítják a mintát és így kapjuk meg a nyílt cellás szerkezetű fémhabot.

Bevonásos technológiákkal is nyílt cellás szerkezetet lehet elérni. Az eljárások lényege, hogy egy nyitott cellás (általában műanyag) hab cellaéleit valamilyen bevonásos technológia segítségével fémmel bevonják, majd a kiindulási anyagot kiégetik [10] [11] [12].

A fémhabok felhasználása igen széleskörben elterjedt. A járműiparban állandó az igény újabb és újabb anyagok használatára, amelyek a tömegcsökkentést szolgálják. Természetesen ez a tömegcsökkentés nem járhat a mechanikai és szilárdsági tulajdonságok leromlásával. A luxusautóiparban napjainkban már használnak fémhabokat elsősorban kis sűrűségük és jó energiaelnyelő képességük miatt. Az elsők között alkalmazott alumínium habot például a Ferrari a 360-as modelljüknél, ez látható az alábbi ábrán (5. ábra(a)). Az autóipar mellett a vasúti járművekben is igen elterjedt a fémhabok használata. Fémhabot használnak például az ICE német nagysebességű villamos motorvonat karosszériájának szendvicspaneljében, és a Budapesten is közlekedő Combino villamos ütközés csillapító paneljében is. Ez előbbi példát szemlélteti az alábbi ábra (5. ábra(b)) [13][14].



(a)

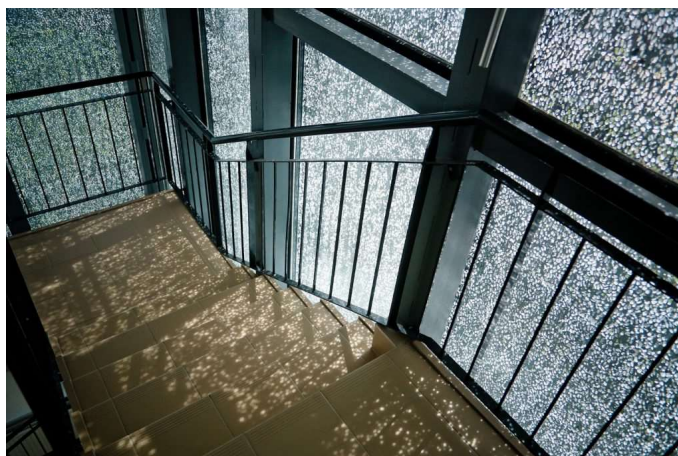


(b)

5. ábra: Fémhabok alkalmazása a járműiparban: (a) Ferrari 360-as modell karosszériája. A pirosan karikázott területen két alumínium hab tartóelem ad extra merevséget és ütközés esetén kiváló energia elnyelő tulajdonságokkal rendelkezi [14]. (b) ICE motorvonat karosszéria alumínium szendvicsszerkezete [13]

Az építőipar is széles körben alkalmaz szendvicspanel megoldásokat elsősorban kiváló hőszigetelési tulajdonságuk miatt. Ezen felül ma már könnyen beszerezhetőek, költséghatékonyak, illetve megfelelnek a tűzbiztonsági követelményeknek. Gyakran használják a fémhabokat szigetelő anyagként, akár 20°C-os különbséget is tapasztalhatunk az alumínium szendvicspanellel szigetelt épület belső hőmérséklete és a szabadban mért hőmérséklet között, ilyen árnyékoló panel látható a következő ábrán (6. ábra). Ezzel a megoldással jelentős energiamegtakarítást lehet elérni az épületek klimatizálása területén. Az építőipar a fémhabok akusztikus tulajdonságait is kihasználja, például koncerttermek, előadótermek belső burkolat anyagaként használják. Ebben az alkalmazásban nyitott cellás fémhabokat használnak, ugyanis a hanghullámok így képesek bejutni az anyag belsejébe, ahol a cellafalakon való visszaverődés

hatására elnyelődnek. LED technológia segítségével a fémhab átvilágítása is megoldható, ami szintén fontos szempont lehet ezekben a beltéri alkalmazásokban [13][15].

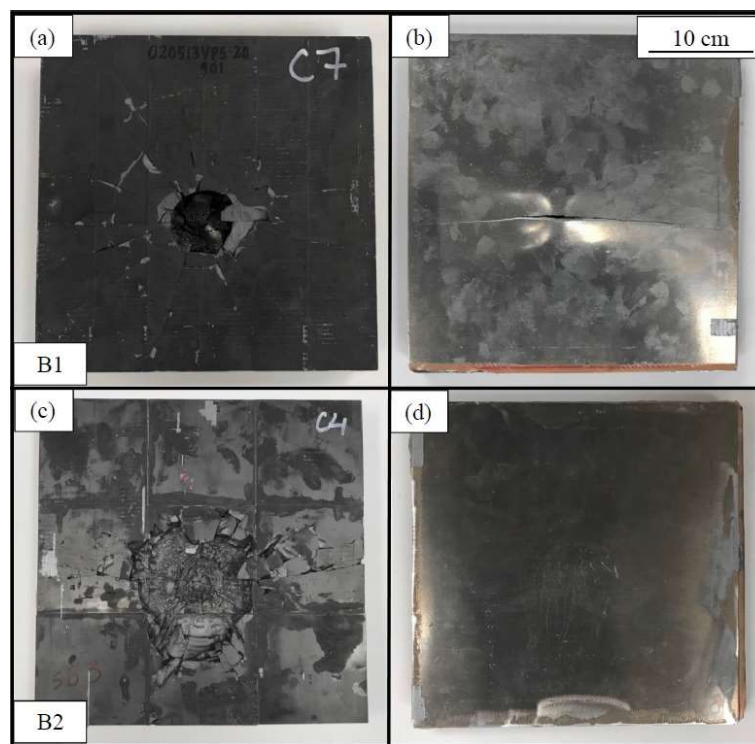


6. ábra: Aluinvent által készített alumínium hab árnyékoló panel [15]

Orvostechnikai alkalmazásokban fémek körében elsősorban rozsdamentes acélt, titán és kobalt ötvözetet használnak, ugyanis ezek az anyagok kedvező korróziós, mechanikai és biokompatibilitási tulajdonságokkal rendelkeznek. A gyártástechnológia fejlődésével azonban már lehetőség van fémhabokból készült orvostechnikai eszközök használatára, leginkább implantátumok területén. Ezen a területen a fémhabok sajátos cellás szerkezetét használják ki. Az alapanyag biokompatibilis tulajdonságai és a cellás szerkezet együttesen segíti az oszteointegrációt¹. Ezen felül a kielégítő mechanikai tulajdonságoknak köszönhetően nagyobb igénybevételű helyeken is használható, mint például comb- és fogimplantátumként [13][16].

Az utolsó alkalmazási terület, amit érdemes megemlíteni az a hadipar. A kis sűrűség és kitűnő energia elnyelő képessége miatt használják golyóálló mellények anyagaként. Ebben az esetben nem tisztán fémhabokat használnak, hanem egy kerámia- fémhab szendvicsszerkezetet alkalmaznak. A kemény kerámia réteg feladata, hogy tompítsa a lövedék becsapódását a fémhab pedig képes elnyelni a maradék kinetikus energiát, erre vonatkozó vizsgálatok eredményeit mutatja be az alábbi ábra (7. ábra). Ezzel a szendvicsszerkezettel képesek olyan golyóálló ruházatot készíteni, amelyen nem hatol át a lövedék és a fémhab kis sűrűségének köszönhetően könnyebb és ezáltal kényelmesebb viseletet biztosít, mint a tömör kialakítású megoldások [17][18].

¹ Szövettani diagnózis, amely az implantátum és a csontszövet direkt, kötőszövet nélküli kapcsolatát jelenti fénymikroszkópos szinten.



7. ábra: Egy kerámia-fémhab kompozit anyag ballisztikai vizsgálatának eredménye 12,7x99 mm-es töltény esetén. Az (a) és (c) ábrák mutatják a panelt a golyó becsapódásának irányából a (b) és (d) ábrák pedig a panel hátoldalát [18].

3.2. Szintaktikus fémhabok

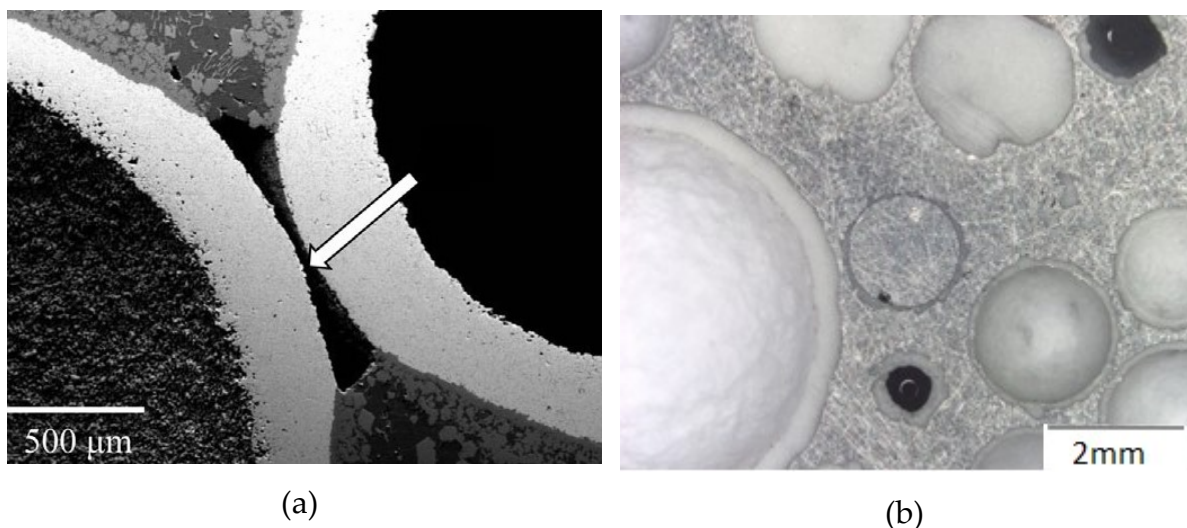
A szintaktikus fémhabok olyan kompozit anyagok, ahol a habokra jellemző cellás szerkezetet töltőanyagok segítségével érik el. Töltőanyagként általában kerámia gömbhéjakat használnak vagy valamilyen porózus töltőanyagot, a mátrix anyaga pedig általában alumínium vagy alumíniumötvözet. A zárt cellás szerkezetű fémhabokkal ellentétben a szintaktikus fémhaboknál állandó cellaméret és közel homogén szerkezet is elérhető, ami a töltőanyagok alkalmazásának köszönhető.

A töltőanyag kiválasztása során fontos szempont, hogy az alkalmazott töltőanyag stabil legyen, ugyanis a gyártás során az olvadék állapotban lévő mátrix igen reakcióképes, illetve egy másik fontos szempont, hogy hőállóak legyenek, vagyis az alkalmazott töltőanyag alkalmazhatósági hőmérséklete haladja meg a mátrix anyagának olvadáspontját. Kerámia gömbhéjként általában Al_2O_3 , SiC vagy valamilyen vegyesoxid kerámia az alapanyag. A kerámia gömbhéj használatának előnye, hogy kedvezően befolyásolja a fémhab nyomószilárdságát és az energiaelnyelő képességét a hagyományos zártcellás habokhoz viszonyítva. Hátránya viszont a költséges előállítás, illetve, ha a kerámia héj túl porózus, akkor a szintaktikus fémhab készítése során az olvadt mátrix anyaga behatolhat a gömbhéj belsejébe, kitöltheti a töltőanyagot és így nem alakul ki a cellás szerkezet. A porózus töltőanyagok közé

tartozik például az építőipari perlit vagy a duzzasztott agyagkavics. Ezen anyagokkal ugyan nem lehet olyan mechanikai tulajdonságokat elérni, mint a kerámia töltőanyagok alkalmazásával, azonban a töltőanyag nélküli zárt cellás fémhabokéhoz képest a porózus töltőanyagból készült szintaktikus fémhab jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik. Továbbá használatának egyik legfőbb előnye, hogy nagyon olcsó alapanyagról van szó, így jelentősen csökkenthető a fémhab előállítása költsége [9][19][20].

A szintaktikus fémhabokban a mátrixanyagnak a teherviselés mellett fő feladata, hogy körbevegye a gömbhéjakat és azokat a megfelelő pozícióban tartsa. Ezért alkalmaznak általában könnyűfémeket, azon belül is a legelterjedtebb az alumínium és az alumíniumötvözetek használata, ugyanis ezek jó öntési tulajdonságokkal rendelkeznek és kicsi az olvadáspontjuk, amik gyárthatóság szempontjából előnyös tulajdonságok. Továbbá az alumínium kis sűrűsége is indokolja a fémhabokban való alkalmazását, ezen felül pedig jó korróziós tulajdonságokkal rendelkezik [9][20].

Szintaktikus fémhabok gyártásánál a legfőbb feladat az, hogy a mátrix anyaga úgy töltse ki a gömbhéjak közötti teret, hogy a folyamat során a gömbhéjak ne sérüljenek meg, illetve a mátrix ne hatoljon be a gömbhéjak belsejébe. Szintaktikus fémhabok jellemző előállítási módja a nyomásos infiltrálás. A nyomásos infiltrálás során három technológiai paraméter van, ami nagyban befolyásolja a technológiát, ezek pedig az infiltrálási nyomás, az infiltrálási idő és az infiltrálási hőmérséklet. Az infiltrálási hőmérséklet alapvetően a mátrix anyagának olvadáspontjától függ. Az infiltrálási nyomást úgy kell megválasztani, hogy a rosszabb nedvesítési tulajdonságokkal rendelkező kerámia gömbhéjak közé az olvadék képes legyen beszivárogni és teljes mértékben kitölteni a rendelkezésre álló teret. Amennyiben ez nem valósul meg, akkor a fémhab mechanikai tulajdonságai nem érik el a kívánt értékeket. A másik probléma, ami felléphet, hogy ha túl nagy nyomást alkalmaznak. Ekkor a gömbhéjak megsérülhetnek, eltörhetnek, az olvadék pedig kitölti annak belsejét és nem alakul ki a cellás szerkezet, ez látható az következő ábrán (8. ábra) [20][21].



8. ábra: (a) Az infiltrálás során a mátrix nem töltötte ki teljesen a gömbhéjak közötti teret [22], (b) az infiltrálás során az olvadék teljesen kitölti a gömbhéj belsejét.

3.3. Erősítőanyagok

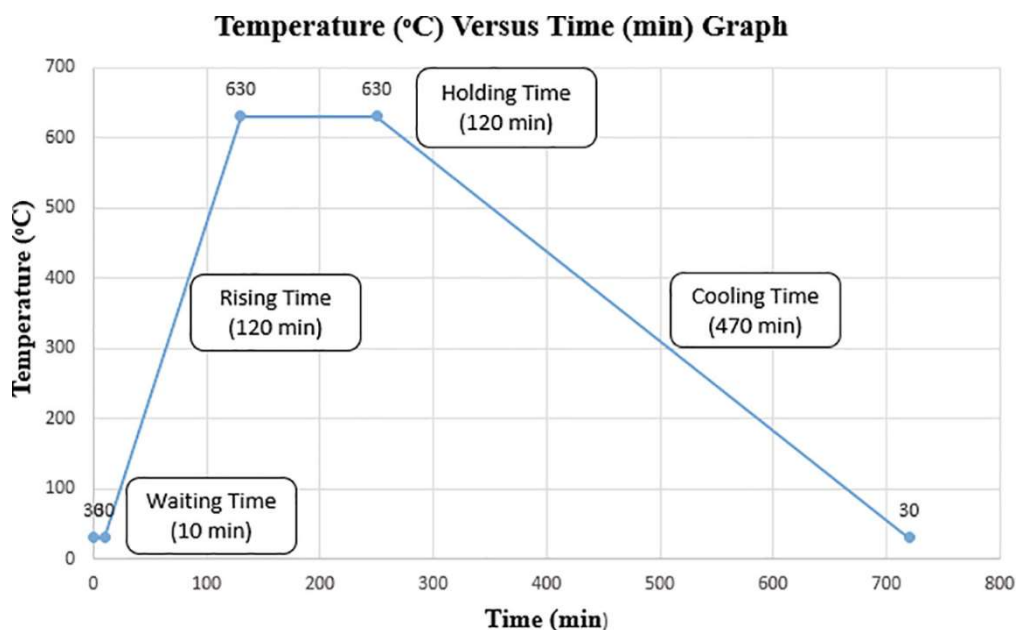
Az egyes ipari ágazatok folyamatos fejlődésével egyre nagyobb az igény olyan anyagok fejlesztésére, amelyek képesek elviselni a megnövekedett mechanikai, hő stb. terheléseket. Az egyik legelterjedtebb mód az ilyen komplex feladatok ellátására a kompozit anyagok fejlesztése és használata. Fém alapú kompozitokban általában szálak és részecske erősítést használnak.

Zamani kutatótársaival alumínium mátrixú alumínium-oxiddal erősített nanokompozitok mechanikai tulajdonságait vizsgálták. Három eltérő térfogatszázalékban erősített próbadarabot állítottak elő hagyományos porkohászati eljárással. Az elkészült minták mikroszerkezetét mikroszkóppal elemezték, majd megmérték a keménységüket, a szakító- és nyomószilárdságukat. A gyártási folyamat során 99%-os, 45 μm-es szemcsenagyságú nagy tisztaságú alumíniumport elegyítettek 10tf%, 15tf% illetve 20tf% 100 nm-nél kisebb részecsenagyságú alumínium-oxid nanorészecskékkal. A minták jelölése az alábbi 1.táblázaban látható [23].

1. táblázat: Al és az Al₂O₃ mennyisége az egyes minták esetén [23]

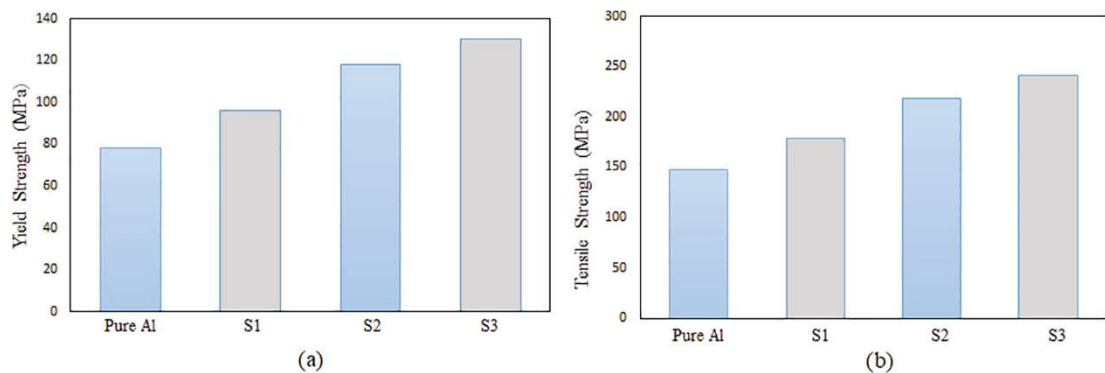
Minta jelölése	Al (tf%)	Al ₂ O ₃ (tf%)
S1	90	10
S2	85	15
S3	80	20

A keveréket egy órán át elegyítették golyósmalomban, majd hidraulikus présel tömörítették. A tömörített mintákat szinterelő kemencébe helyezték, a szinterelési folyamat idő- és hőmérsékletszükségletét a 9. ábra mutatja [23].



9. ábra: Szinterelés hőmérséklet-idő diagramja [23]

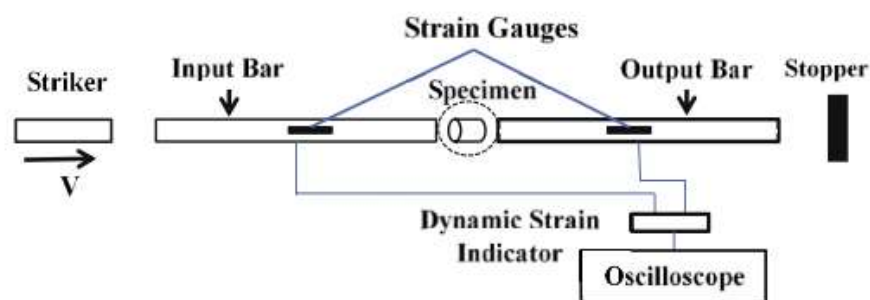
A kimunkált próbadarabokon szakító, nyomó, illetve Charpy-féle ütve hajlító vizsgálatot végeztek, valamint megmérték a keménységüket. A vizsgálatok eredménye korrelál az alapvető kerámia erősítőanyag bevitelének esetére vonatkozó elvárásokkal. A minták keménysége 18%-tól 55%-ig nőtt az erősítőanyag mennyiségének függvényében. A mechanikai tulajdonságok javulása megjelent a szakító- és zömítővizsgálatok során is. A növekvő ötvözőmennyiség emelte a szakító- és a nyomószilárdságot (10. ábra), valamint a folyáshatárt, azonban csökkent az ütővizsgálat során a darab eltöréséhez szükséges energiamennyiség, tehát ridegebbá válik a kompozit anyag az erősítőanyag mennyiségének növelésével [23].



10. ábra: Zömítő folyáshatár (a) és általános nyomószilárdság (b) Al-Al₂O₃ nanokompozit esetén [23].

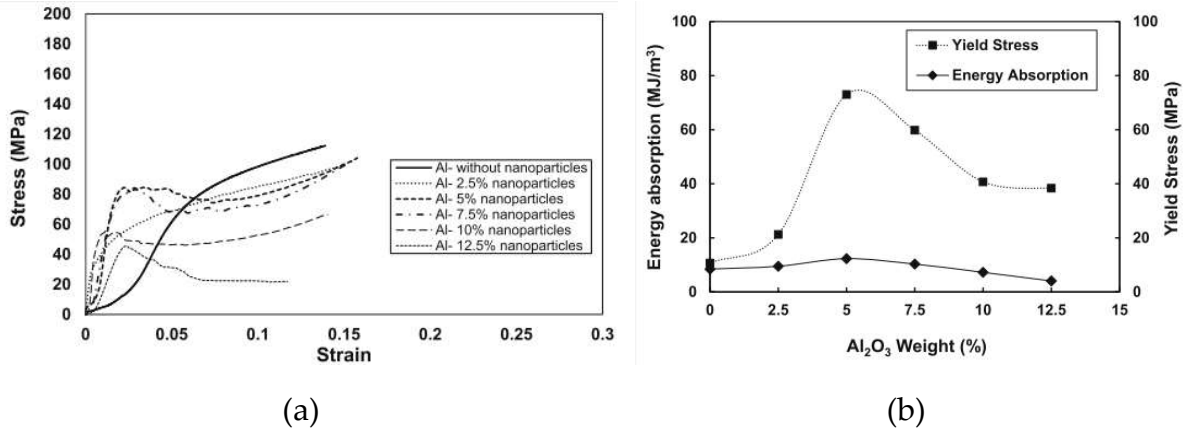
A kutatás rámutat, hogy az alumínium-oxid erősítőanyag és az alumínium mátrix közt jó kapcsolat alakul ki, és hogy ez a módszer alkalmas a mechanikai tulajdonságok javítására, amennyiben kvázi-statikussigénybevételnek van kitéve az anyag.

Alumínium-oxid nanorészecskékkel erősített alumínium mátrixú kompozit viselkedését vizsgálták Z. Zaiemyek és társai a deformációsebesség függvényében. Porkohászati eljárással állították elő a próbatestekhez szükséges darabokat 20 µm-es átlagos szemcseméretű alumíniumporból, melyet 20 nm-es alumínium-oxid nanorészecskékkel erősítettek 2,5 t%-tól 12,5 t%-ig terjedő mennyiségben. Az elkészült próbatesteket kvázi-statikuss vizsgálathoz és Split-Hopkinson Pressure Bar segítségével dinamikus vizsgálathoz vetették alá. A szükséges térfogatú anyagot megfelelő mértékben elegyítették, majd hidraulikus préssel zömítették. Az így előkészített darabokat argon atmoszférában majd vákuumban szinterelték. Minden kategóriából három hengeres darabot vizsgáltak kvázi-statikuss vizsgálattal, amelyeknek a homloklapfelületeit felpolírozták a vizsgálat közbeni elmozdulás kiküszöbölése érdekében. A vizsgálatot az ASTM-E9 szabványnak megfelelően végezték mind a darabok méretei, mind a vizsgálati körülmények szempontjából. A nagy deformációsebességű vizsgálati összeállítás az alábbi ábrán látható (11. ábra). A vizsgálatot három eltérő deformációsebesség mellett végezték el, típusonként 3-3 próbatesten, ezzel biztosítva az eredmények reprodukálhatóságát [24].

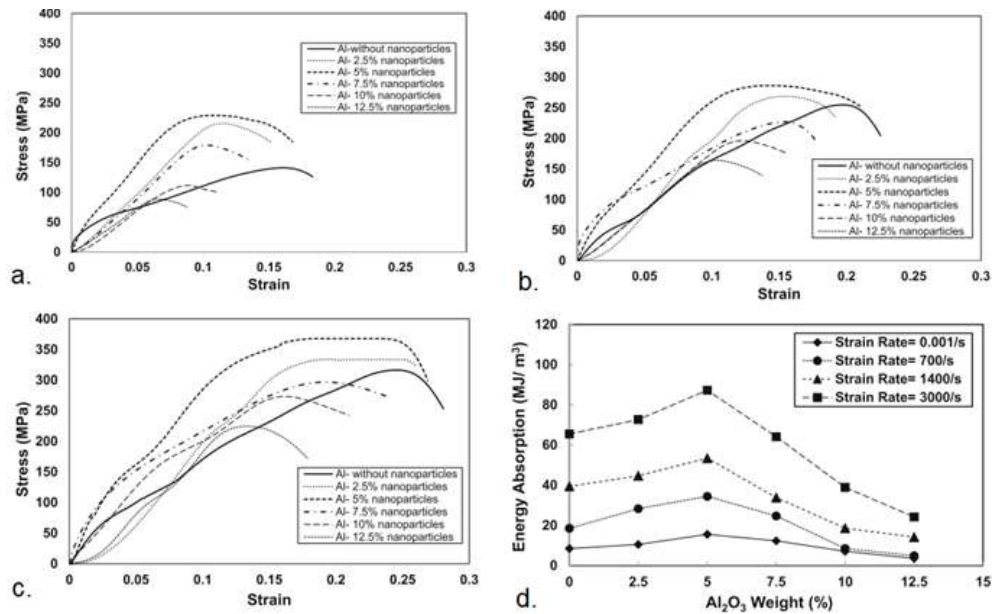


11. ábra: Nagy deformációsebességű vizsgálathoz használt Split-Hopkinson Pressure Bar elrendezés elméleti vázlata [24].

A feszültség-alakváltozás görbéket az alábbi bal oldali ábra mutatja be (12. ábra(a)), az elnyelt energia és a folyáshatár változását pedig a jobb oldali ábra (12. ábra (b)) mutatja az erősítőanyag mennyiségének függvényében, kvázi-statisztikus zömítés esetén. Továbbá a különböző deformációsebességű vizsgálat eredményeit szemlélteti a 13. ábra.



12. ábra: (a) : Feszültség-alakváltozás görbék eltérő erősítési arány esetén [24], (b) : Elnyelt energia-
Al₂O₃ tf% és Al₂O₃ t%-folyáshatár görbék [24]



13. ábra: Feszültség-alakváltozás görbék eltérő erősítési arány esetén 700 s⁻¹ (a.), 1400 s⁻¹ (b.), 3000 s⁻¹ (c.)
alakváltozás esetén, és az elnyelt energia-Al₂O₃ t% görbék eltérő terhelési sebesség mellett [24].

A vizsgálatok eredményeiből megállapították, hogy az eltérő térfogatszázalékban erősített anyagok érzékenyek a deformációsebességre, valamint több energiát képesek elnyelni emelt deformációsebesség esetén. Továbbá kimutatták, hogy van optimális erősítési arány, amely a vizsgálataik során 5 t% volt. A fenti kutatásokból az a konklúzió vonható le, hogy az Al mátrix

anyag Al_2O_3 -al való erősítése mindenképp javítani fogja a vizsgált mechanikai tulajdonságokat, azonban az optimális erősítőanyag mennyiségének megállapítása további kutatást igényel [24].

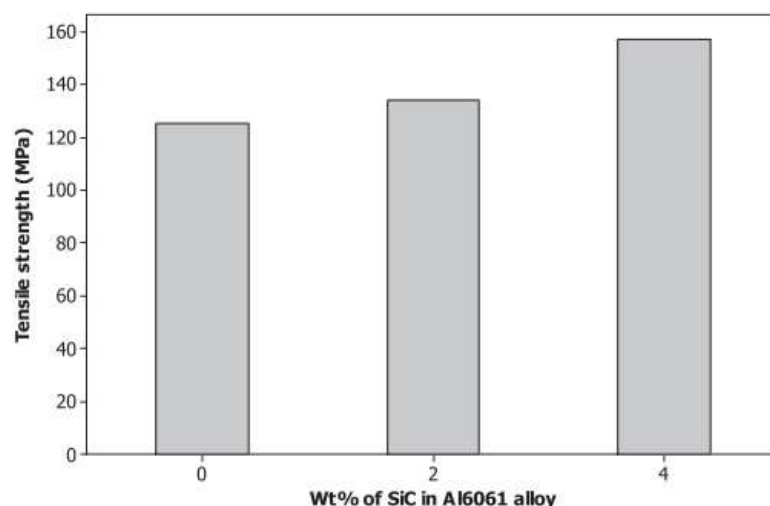
A fenti kutatásokból azt a konklúziót vontuk le, hogy az alumínium mátrixanyag Al_2O_3 -mal való erősítése mindenképp javítani fogja a vizsgált mechanikai tulajdonságokat, azonban az optimális erősítőanyag méretének, eloszlásának és mennyiségének megállapítása további kutatást igényel.

S. Sivananthan és társai a szilícium-karbid erősítőanyag hatását vizsgálták 6061 alumínium (AlMG1SiCu) mátrix anyagra nézve, eltérő tömegszázalékban. A kutatás során keveréssel állították elő a próbadarabokat, majd keménységmérésnek, szakító- és zömítőpróbának vetették alá az anyagot. Az erősítőanyagot 2 t% és 4 t%-ban adagolták a mátrix anyaghoz, ezeket hasonlították össze a tiszta ötvözetből készült mintákkal. Az alumíniumötvözetet indukciós kemencében hevítették olvadásig, majd ahhoz képest emelt hőmérsékleten tartva adagolták hozzá az előmelegített $44\text{ }\mu\text{m}$ -es szemcseméretű szilícium-karbidot. Az adagolást folyamatos, állandó sebességű keverés mellett végezték, majd az előkészített acélformákba öntötték az olvadékot. A keménységméréshez használt 15 mm élhosszúságú kocka alakú próbatesteket (14. ábra) forgácsolással munkálták ki [25].



14. ábra: Kocka alakú próbatestek keménységméréshez [25]

A mikrokeménység mérést minden darabon három helyen végezték el, így nyerve egy átlagos keménységértéket. A zömítővizsgálathoz 30 mm hosszú, 12 mm átmérőjű hengeres próbatesteket készítettek elő, melyeket huzalszakra forgácsolás segítségével munkáltak meg. Minden erősítési mennyiség esetén három próbatestet vizsgáltak. Az zömítőpróba eredményeit a 15. ábra mutatja.



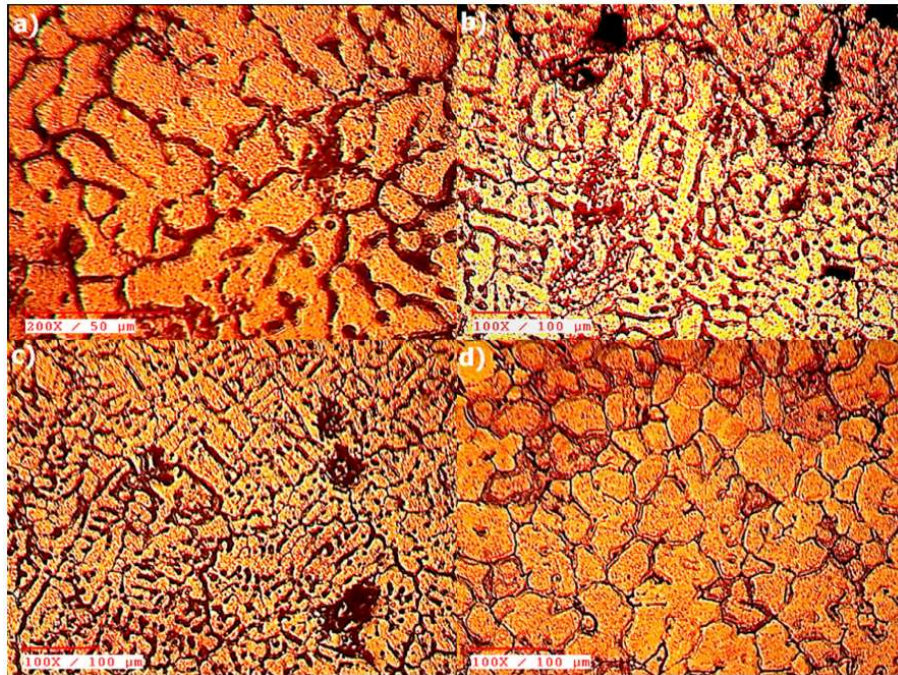
15. ábra: Elterő tömegszázalékban erősített alumíniumkompozit nyomószilárdsága [25]

A kutatás során megállapították, hogy szilícium-karbid adagolása növeli az alumínium alapú kompozit keménységét az erősítés nélküli alumíniumhoz képest, illetve a vizsgált minták alapján ez a javulás progresszív az adagolási mennyiség függvényében [25].

M. Dhanashekar és társai hasonló vizsgálatot végeztek. Porkohászati eljárással AA6061 (AlMG1SiCu) alumíniumból készített darabjaikat 7,5 t%-os arányig erősítették szilícium-karbiddal. A mintákat a tiszta alumíniumötvözetből készült darabbal hasonlították össze keménységmérés és zömítőpróba során. A 20-30 μm szemcseméretű AA6061-es alumíniumötvözet port kemencében kiszárították, hogy a nedvességet eltávolítsák, a 10 μm -es SiC port bolygópoharas keverőben elegyítették hozzá, toluol felhasználásával az oxidáció megelőzése végett. A nyers keveréket hidraulikus préssel tömörítették, majd szinterelték zárt kemencében argon atmoszférában. A minták elnevezését és összetételét a 2. táblázat mutatja, az egyes mintákról optikai mikroszkóppal készített szövetszerkezeti képe az alábbi ábrán látható (16. ábra) [26].

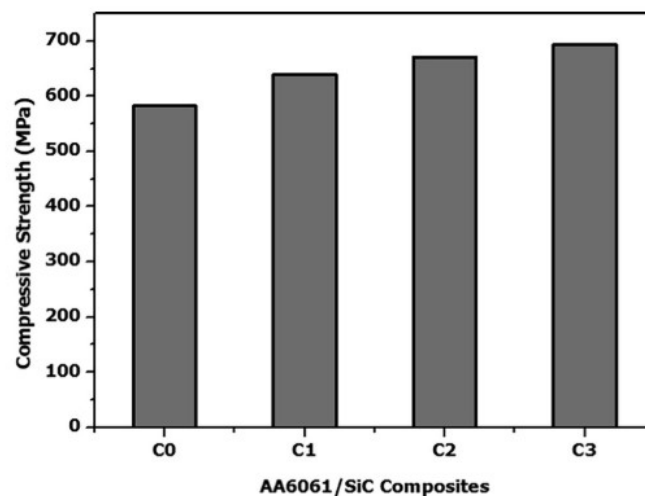
2. táblázat: Minták elnevezése és összetétele [26]

Minta sorszáma	Összetétel	Minta elnevezése
1	AA6061 + 0 t% SiC	C0
2	AA6061 + 2,5 t% SiC	C1
3	AA6061 + 5 t% SiC	C2
4	AA6061 + 7,5 t% SiC	C3



16. ábra: C0 (a), C1 (b), C2 (c) és C3 (d) minta szövetszerkezete [26]

A mintákat keménységmérésnek és zömítővizsgálatnak vetették alá. A zömítés eredményeit a 17. ábra mutatja be.

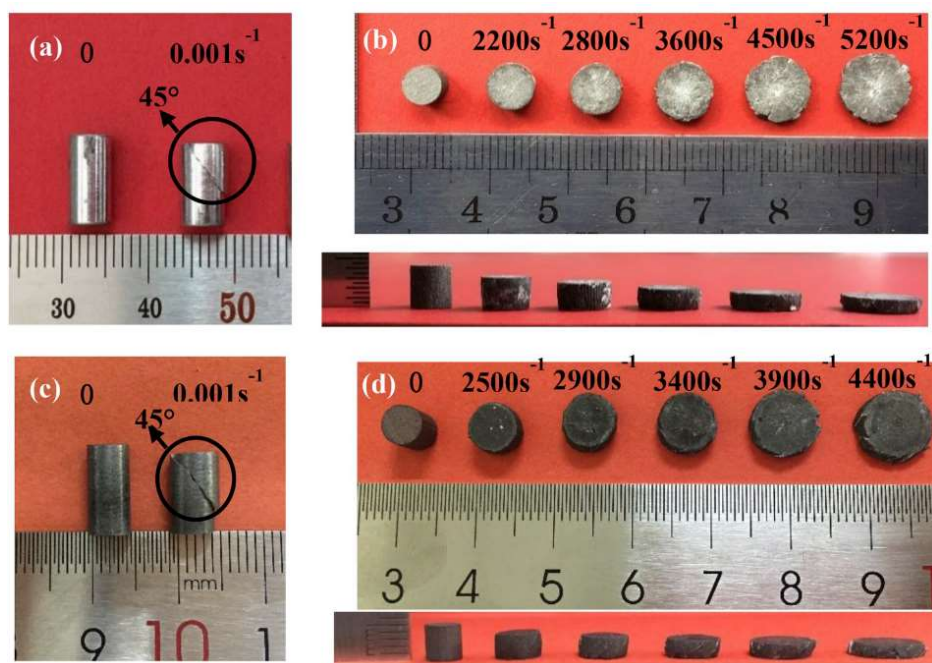


17. ábra: Nyomószilárdsági értékek eltérő erősítési arány esetén [26]

A vizsgálatok során megállapították, hogy az alumínium mátrix és a szilícium-karbid erősítőanyag közt erős kapcsolat alakult ki, szemcsefelületi kiválások nélkül, valamint a keménység, sűrűség és nyomószilárdság arányosan nő az erősítőanyag mennyiségének növelésével [26].

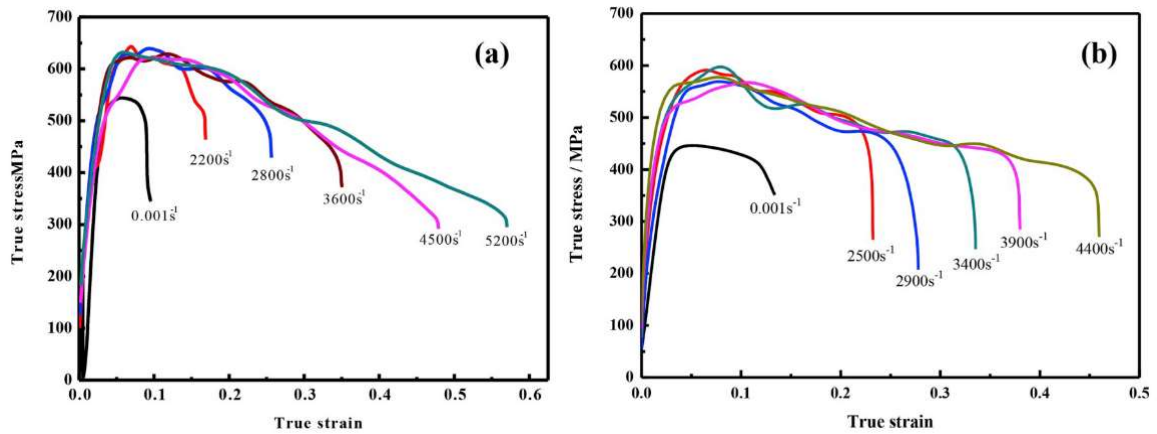
A SiC erősítőanyag részecskék méretének hatását Tengke Ye és társai vizsgálták. Kutatásuk során a két eltérő átlagos méretű szilícium-karbiddal töltött alumíniumot vetettek alá kvázi-

statikus és dinamikus zömítővizsgálatnak. Meg kell említeni, hogy a pontos mátrix anyag összetételét nem közölték le a publikációban, így az eredmények nem reprodukálhatóak teljes mértékben, ettől függetlenül megfelelő kiindulási pontot ad a feldolgozott témával kapcsolatban. A próbadarabokat az AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials intézet gyártotta nyomásos infiltrálással, melynek folyamán megolvasztott alumíniumötvözet port préselték bele a hidegen sajtolt szilícium-karbid vázba. Az erősítőanyag mennyisége 65 t% volt mindkét minta esetén. Az erősítőanyag két méretkategóriájának meghatározása során 10 és 50 μm átlagos értéket állapítottak meg. A dinamikus zömítővizsgálathoz Split-Hopkinson Pressure Bar elrendezést használtak, amelyet a 11. ábra ismertet. Kvázi-statikusan zömítés esetén jellegzetes 45° -ban mentek tönkre a próbatestek, míg nagy deformációsebesség mellett a magasság csökkent és az átmérő nőtt meg drasztikus mértékben, ahogy azt a 18. ábra is mutatja [27].

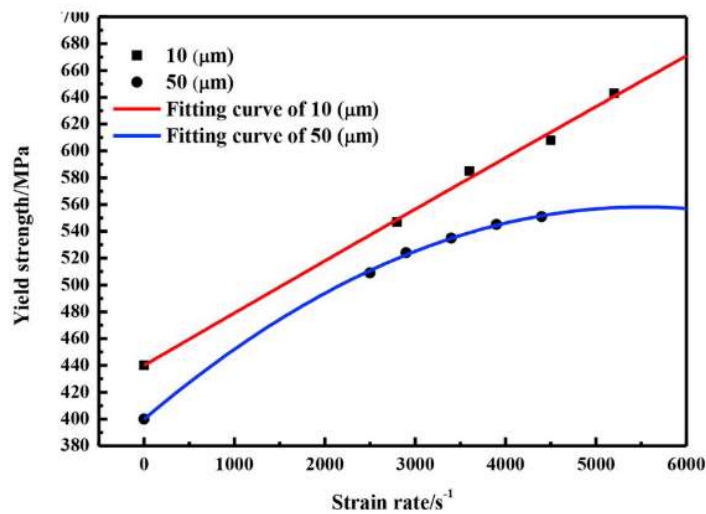


18. ábra: Kvázi statikus zömítés eredménye 10 μm -es (a) és 50 μm -es (c), illetve nagy deformációsebességű próba eredményei 10 μm -es (b) és 50 μm -es (d) erősítőanyag esetén [27]

A zömítőpróbák során felvett görbéket a 19. ábra mutatja be. Ezeken megfigyelhető, hogy a deformációsebesség növekedésével nő a maximális alakváltozás, valamint a kvázi-statikusan esethez képest jelentős mértékben nő a maximális feszültség. A folyáshatár deformációsebesség függvényében vett változását a 20. ábra mutatja [27].



19. ábra: Zömítőpróbák valódi feszültség-valódi alakváltozás görbéi 10 μm -es (a) és 50 μm -es (b) erősítőanyag esetén [27]



20. ábra: Folyáshatár a deformációsebesség függvényében [27]

A kutatás során megállapították, hogy a folyáshatár a deformációsebességgel egyenesen arányosan nő, továbbá a kisebb erősítőanyag szemcseméret nagyobb folyáshatárt eredményez, mivel ennek szemcséi a tönkremenetel során nehezebben fordulnak ki a mátrixanyagból. Továbbá kimutatták, hogy a 10 μm -es erősítőanyaggal készített kompozit energiaelnyelő képessége 1,50-szer nagyobb az acélnál. Ez alapján az erősítőanyag szemcseméretének csökkentésével fokozható a vizsgált minták zömítéssel szembeni ellenállása és energiaelnyelő képessége [27].

Ez alapján a három példa alapján következtethetünk arra, hogy a szilíciumkarbid erősítés minden esetben növelni fogja a vizsgált mintáink mechanikai tulajdonságait, tekintettel a fémhabok jellemző igénybevételére.

4. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

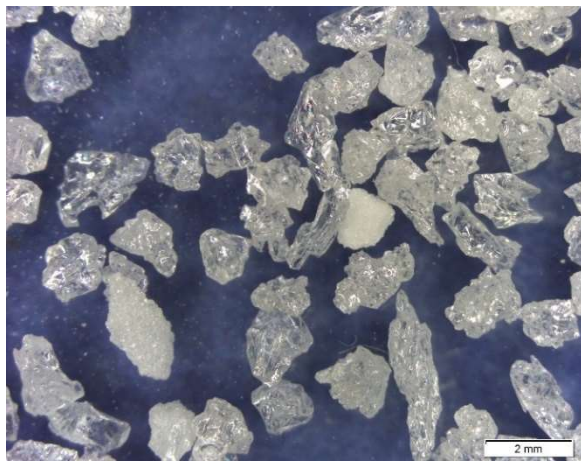
A próbatestek elkészítéséhez A356 (7Si-0,3Mg) jelölésű alumínium ötvözetet használtunk (Alumelt Engineering Kft, Várpalota, Magyarország). Ez a fajta ötvözet nagyon jó öntési tulajdonságokkal rendelkezik és könnyen megmunkálható. Ezen tulajdonságai miatt igen elterjedt alapanyag bonyolult öntvények készítésére, ezért gyakran használja az autóipar és a repülőgépipar, továbbá alkalmas szivattyúházak, járókerekek és nagy szilárdságú szerkezeti öntvények készítésére is. Ez az alumínium ötvözet kiválóan keményíthető, amellyel mechanikai tulajdonságai javíthatók [28].

A felhasznált anyag ötvözőinek pontos összetétele az alábbi táblázatban található a beszállítói adatlap alapján (3. táblázat).

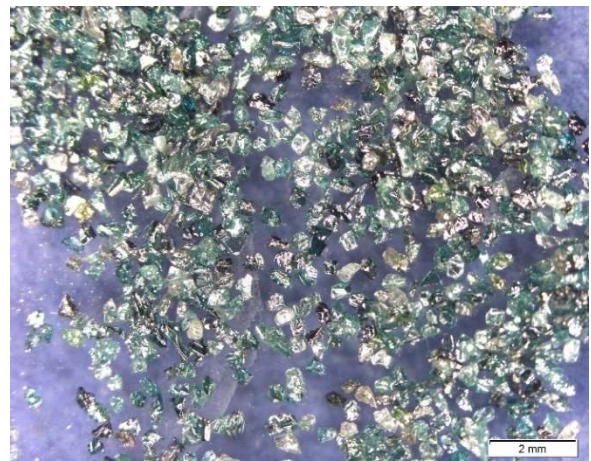
3. táblázat: A356 (7Si-0,3Mg) alumínium ötvözet szabvány szerinti kémiai összetétele [29]

Kémiai elem	Tömeg%
Si	6,50-7,50
Fe	0,20
Cu	0,20
Mn	0,10
Mg	0,20-0,45
Zn	0,10
Ti	0,20

Erősítőanyagként ~ 1 mm Al_2O_3 részecskéket és $\sim 0,4$ mm-es SiC részecskéket használtunk (21. ábra). Ezeket az anyagokat általában csiszolóanyagként használják az iparban, ugyanis nagy keménységű, nagy nyomószilárdsággal rendelkező, stabil, tűzálló anyagokról van szó, az alumínium-oxid olvadáspontja $\sim 2000^\circ\text{C}$, míg a szilícium-karbid olvadáspontja $\sim 2700^\circ\text{C}$.



(a)



(b)

21. ábra: Használt erősítőanyagok: (a) 1 mm nagyságú Al_2O_3 részecskék, (b) SiC részecskék

A szakirodalmi áttekintésben leírtak alapján arra számítottunk, hogy az alumínium-oxid és a szilícium-karbid is megfelelő anyagok lesznek a szintaktikus fémhabok erősítésére. Viszont a szakirodalmi áttekintés során nanokompozitokat vizsgáltak, míg az általunk végzett kutatás során a felhasznált erősítőanyagok mérete jelentősen nagyobb, mint a fentebb említett alumínium-oxid és szilícium-karbid részecskéké. Ezt az indokolja, hogy a kisnyomásos infiltráláshoz az erősítőanyagot a töltőanyaggal előre összekeverve töltöttük a mintába. Amennyiben az erősítőanyag szemcseméretét csökkentenénk, akár drasztikus méretben, hogy elérjük a szakirodalomban megtalálható, és az előbbieken bemutatott erősítési maximumot, nem lenne lehetséges az erősítőanyag egyenletes eloszlata a töltő gömbhéjak között. Ez a technológiai akadály kiküszöbölhető lenne a gyártástechnológia változtatásával, keverékes öntési eljárás esetén megfelelő mértékben elosztható az erősítőanyag. Infiltrálás esetén a formában lévő töltőanyag nagy valószínűséggel megszűrné a keveréket, ezért a töltőanyagot is keveréssel lenne érdemes bejuttatni a mátrixanyagba, ebben az esetben azonban csökkenne a térkitöltés.

A kutatás során két féle töltőanyagot vizsgáltunk:

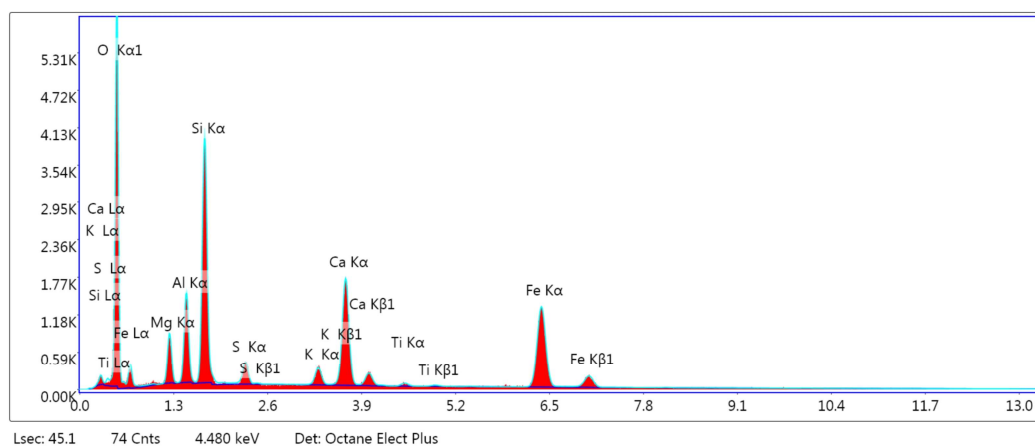
- 3-3,5 mm átmérőjű duzzasztott agyagkavics (3. ábra (a)).
- 2,4 mm átmérőjű Al_2O_3 C795 kerámia gömbhéj (3. ábra (b))

Agyagkavicsot több iparág is alkalmaz, a legelterjedtebbek az építészeti és a kertészeti felhasználások. Az agyaggolyók számos kedvező tulajdonsággal rendelkeznek, ugyanis könnyű, nagy nyomószilárdságú anyagról van szó, továbbá fagy- és tűzálló, jó hő- és hangszigetelő. Ezen felül olcsó, környezetbarát, valamint kémiaiilag stabil, így megfelelő előkészítés után újra felhasználható anyag. Kémiai és mechanikai tulajdonságait az alábbi

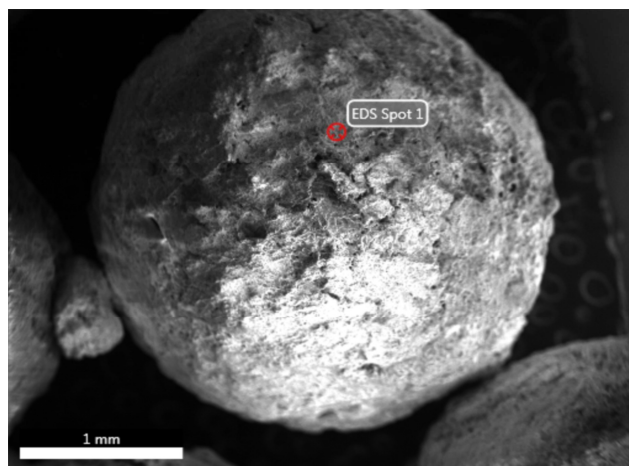
táblázatok foglalják össze (4. táblázat, 5. táblázat). A kémiai összetételt pásztázó elektronmikroszkópon EDS (energiadisperzív röntgen spektrometria) méréssel határoztuk meg. A mérés helye és spektruma az alábbi ábrán látható (22. ábra).

4. táblázat: Ø3 mm duzzasztott agyagkavics kémiai összetétele

Elem	Tömeg%	Atom %
O	43,50	63,58
Mg	3,84	3,69
Al	5,60	4,85
Si	13,55	11,28
S	1,48	1,08
K	1,49	0,89
Ca	10,98	6,40
Ti	0,37	0,18
Fe	19,21	8,04



(a)



(b)

22. ábra: Duzzasztott agyagkavics EDS vizsgálat spektruma (a) és a mintavétel helye (b)

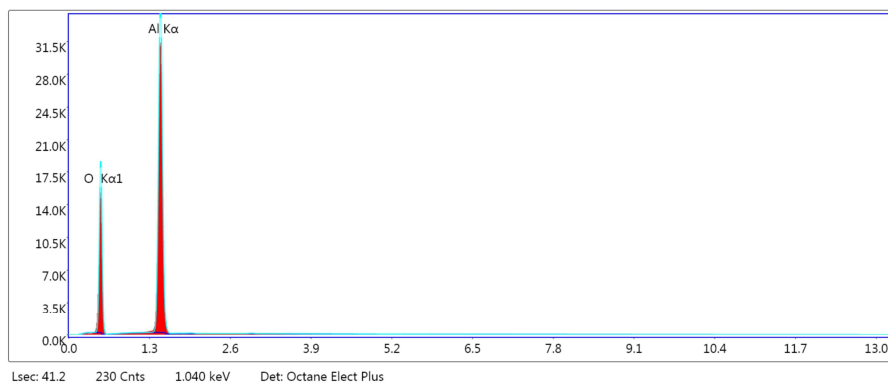
5. táblázat: Ø3 mm duzzasztott agyagkavics és Ø2,4 kerámia gömbhéj vizsgálata során mért és számított eredmények, mechanikai tulajdonságok [19].

Töltőanyag	Átmérő (mm)	Térfogat (mm ³)	Tömeg (g)	Sűrűség ($\frac{g}{cm^3}$)	Törőerő (N)	Falvastagság (μm)
LECAP	3,24±0,65	19,47±56,77	0,0141±0,0074	0,76±0,2	38,1±11,8	-
CHSs	2,29±0,16	6,41±1,32	0,0068±0,0013	0,92±0,05	42,3±24,6	24±0,5

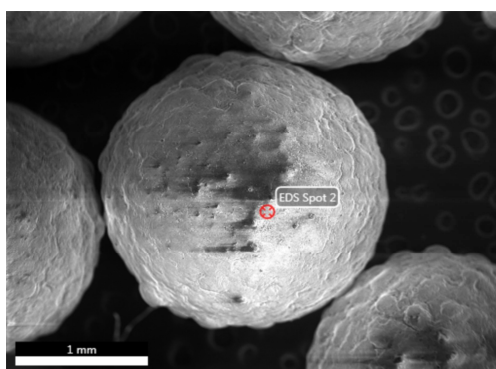
Az EDS mérési eljárás az elektronnyalámban a mintába beérkező elektronok energiavesztésén alapul. Ilyen módszerrel mértük meg a kerámia töltőanyag és az erősítőanyagok kémiai összetételét is, ami az alábbi táblázatban és ábrán látható (6. táblázat, 23. ábra). A gömbhéjak mechanikai tulajdonságait a fenti táblázat foglalja össze (5. táblázat).

6. táblázat: Kerámia gömbhéj kémiai összetétele

Elem	Tömeg %	Atom %
O	47,38	60,29
Al	52,62	39,71



(a)



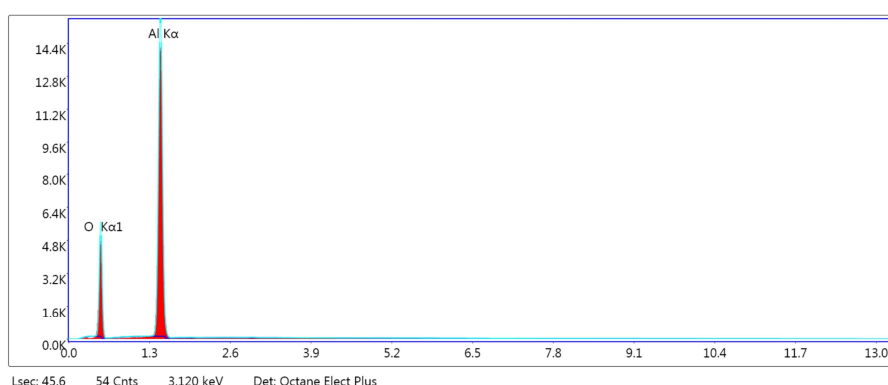
(b)

23. ábra: A kerámia gömbhéj EDS mérés spektruma (a) mérés helye (b)

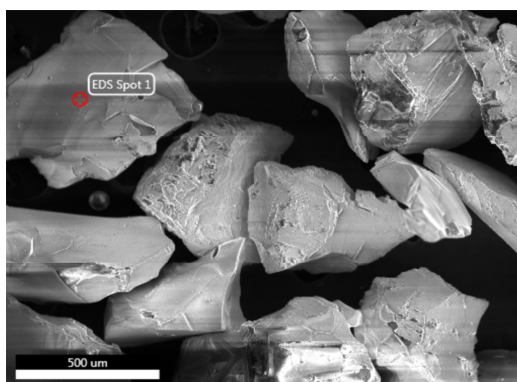
A beérkező elektronok rugalmatlanul ütköznek a minta atomjaival, aminek következtében azok energiát nyelnek el, az így elnyelt energiát röntgen sugárzás formájában sugározzák ki. A 0,4 mm szemcseméretű alumínium-oxid összetételét, EDS spektrumát és a mintavétel helyét az alábbi táblázat és ábra mutatja be (7. táblázat, 24. ábra).

7. táblázat: A 0,4 mm szemcseméretű alumínium-oxid kémiai összetétele

Elem	Tömeg %	Atom %
O	40,09	53,02
Al	59,91	46,98



(a)



(b)

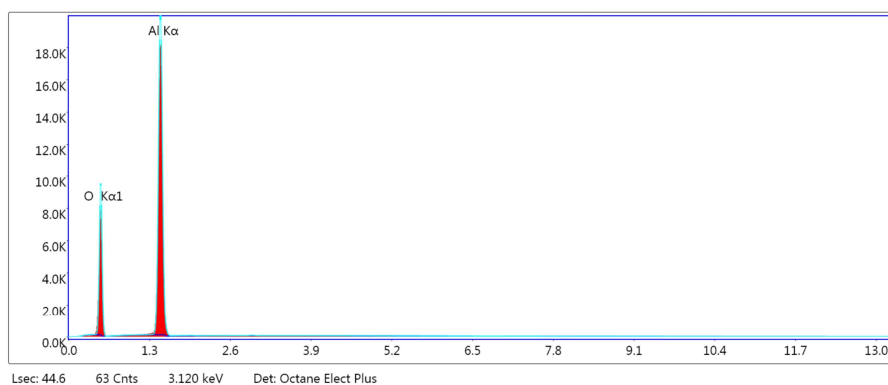
24. ábra: A 0,4 mm szemcseméretű alumínium-oxid erősítőanyag EDS spektruma (a) és a mérés helye (b)

Az így beérkező fotonok a detektor kiürített terében (electron trap, elektroncsapda) elektron-párokat hoznak létre, melynek összenergiája megegyezik a sugárzásával. A detektorban így keletkezett töltéskülönbséget mérve meg tudjuk határozni a sugárzás energiáját, melynek hullámhossza karakterisztikus jellemzője az azt kibocsájtó atomnak, az intenzitása pedig a mennyiségének függvénye. Az 1 mm szemcseméretű alumínium-oxid erősítőanyag kémiai

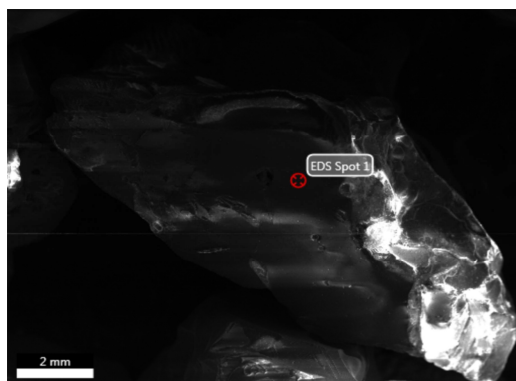
összetétele és a mérés spektruma, valamint helye az alábbi ábrán és táblázatban látható (8. táblázat, 25. ábra).

8. táblázat: Az 1mm szemcseméretű alumínium-oxid kémiai összetétele

Elem	Tömeg %	Atom %
O	44,71	57,70
Al	55,29	42,30



(a)



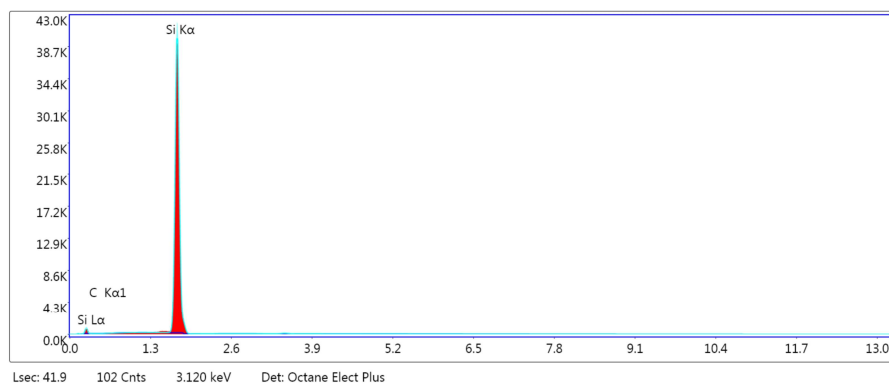
(b)

25. ábra: Az 1mm szemcseméretű alumínium-oxid EDS spektruma (a) és a mérés helye (b)

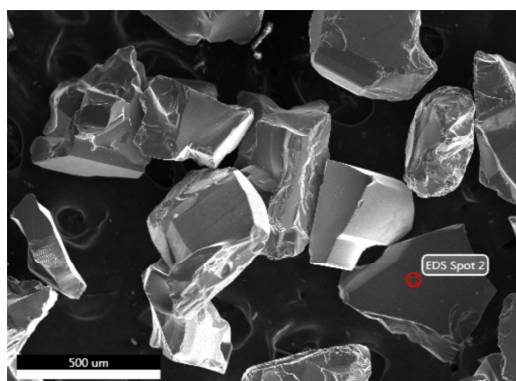
A képek készítésénél felmerült a probléma, hogy egyes vizsgált anyagok csak kis mértékben vagy egyáltalán nem elektromos vezetők, így a minták feltöltődtek, és a kép kiégett. Ezt úgy szokták kiküszöbölni, hogy vékony aranyréteggel vonják be a vizsgált mintát, ebben az esetben azonban nem tudtunk volna anyagösszetételt mérni, mivel az EDS egy felületi mérési eljárás. Emellett a vizsgált minták homogenitása miatt a túltöltődés okozta nyalábcúsúzás sem eredményezett hibát a mérés folyamán. A 0,4mm szemcseméretű szilícium-karbid összetételét, az EDS spektrumát és a meglövés helyét az alábbi táblázat és ábra mutatja be (9. táblázat, 26. ábra).

9. táblázat: A szilícium-karbid kémiai összetétele

Elem	Tömeg %	Atom %
C	26,37	45,57
Si	73,63	54,43



(a)



(b)

26. ábra: A szilícium-karbid EDS spektruma (a) és a mérés helye (b)

A próbadarabokat kisnyomásos infiltrációs öntéssel állítottuk elő. Első lépésként DUE-CI N77 grafit spray-vel vékony grafitréteget hoztunk létre az öntőtégely belső felületén, amelyeket hagytunk kiszáradni, ezt a folyamatot kemencében történő szárítással lehetett gyorsítani. Ez azért fontos, mert a kialakult vékony grafitréteg megkönnyíti a minta öntőformából való eltávolítását. Ezután alumínium-oxid gyapottal kitöltük az öntőforma légkieresztő furatát, amelyen a töltő- és erősítőanyag közé szorult levegő tud távozni az öntés során. Következő lépésként a töltő- és erősítőanyag kimérése és összekeverése következett, az ehhez használt eszközök az alábbi képen láthatóak (27. ábra).



27. ábra: Töltő- és erősítőanyag kimérésére és keverésére használt eszközök

A kimért töltőanyagot és erősítőanyagot kézi keveréssel elegyítettük addig, amíg szemrevételezés alapján megállapíthattuk, hogy az erősítőanyag eloszlás megfelelően homogén. A minta betöltését követően acélhálót helyeztünk a töltőanyag-erősítőanyag keverék tetejére úgy, hogy a hálódarab terítékének mérete két párhuzamos oldal mentén nagyobb legyen a minta üregének keresztmetszeti méreténél. Ezeket a túllógásokat felhajtottuk 90° -nál valamivel kisebb szögben, így a hálódarab rögzült a minta belsejében, és nem mozdul el kifelé. Ez azért fontos, mert a töltőanyag sűrűsége kisebb a mátrix anyagénál és így öntés közben felúszna az olvadék tetejére.

A betöltött mintákat Lindbert/Blue M típusú dobozkemencében (28. ábra) melegítettük elő 600°C -ra. Az így előkészített darabokat IND IF-10 indukciós kemencében olvasztottuk meg.

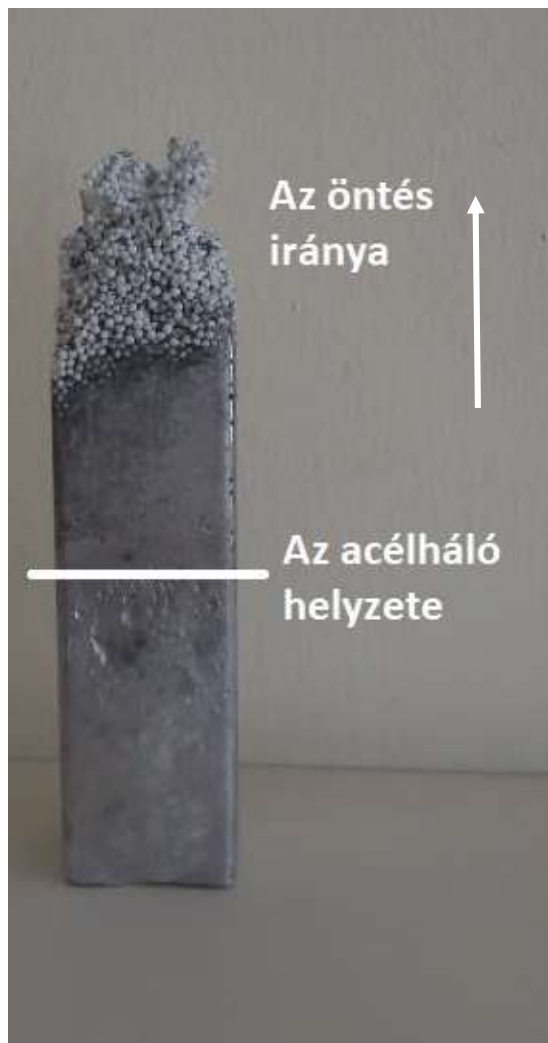


28. ábra: Lindbert/Blue M típusú kemence

Az olvadt mátrixanyagot betöltöttük a mintába, majd annak tetejére ráhelyeztük a gázbevezető fedelet, majd a mintát a fedéllel együtt behelyeztük egy megfogó keretbe (29. ábra), ami rögzítette a fedelet a mintán. Erre azért van szükség, mert 5 bar (500 kPa) nyomású argon gázt vezettünk az öntőmintába, ezzel bepréselve az olvadt mátrix anyagot a töltőanyag-erősítőanyag keverék közé. A fedél öntőmintához csatlakozó részét zsinórtömítéssel tömítettük. Ennek a tömítésnek az elégtelensége hibás öntéshez vezetett egy alkalommal, ennek eredménye az alábbi ábrán látható (30. ábra). Az eljárás előnye, hogy nem igényel nagyméretű ipari berendezéseket, a felhasznált eszközök és berendezések más eljárás esetén is szükségesek. Mivel a gáznyomás palackból is biztosítható, nem szükséges külön infrastruktúrát kiépíteni hozzá. Minden további eszköz, úgymint öntőforma, gázbevezető fedél és megfogó keret, nem von maga után nagy költséget, szerkezeti acélból összeállíthatóak.



29. ábra: Nyomásos infiltráláshoz használt megfogó keret és az öntéshez szükséges egyéb eszközök



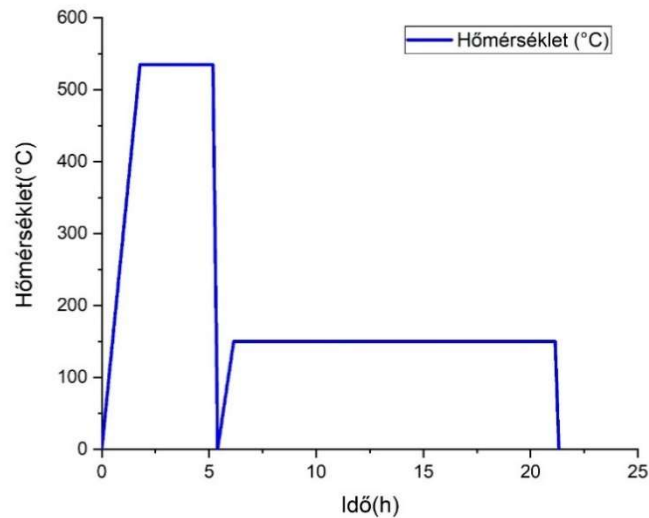
(a)



(b)

30. ábra: Hibás öntés elégtelen tömítés esetén (a) és sikeres öntés eredménye (b)

A próbatesteket a jobb mechanikai tulajdonságok elérése érdekében kiválasztott keményítéssel hőkezeltük, amely két lépésből áll. Az első lépés egy homogenizáló hőkezelés 535°C -on 4 órán át, a gyors hűtés után pedig egy mesterséges öregítés 150°C -on 15 órán át. A homogenizáló hőkezelés során a cél az ötvözetben megtalálható kiválások oldatba vitele. Ezután egy gyors hűtés következik, amelynek célja, hogy ötvözőkben túltelített szilárd oldat jöjjön létre, majd a mesterséges öregítés során a túltelített szilárd oldatból ötvözőkben dús fázisok válnak ki. A hőkezelés ciklusát a 31. ábra mutatja.



31. ábra: Próbatetek hőkezelési folyamata: Hevítés $300 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{h}}$ – val 535°C -ra, hőntartás 4 órán keresztül, majd gyors hűtés. Ezután hevítés $200 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{h}}$ – val 150°C -ra, hőntartás 15 órán keresztül, végül pedig gyors hűtés.

A próbatetek mechanikai tulajdonságait kvázi-statisztikus nyomóvizsgálatokkal mértük, amelyhez egy MTS 810 típusú (32. ábra) hidraulikus univerzális anyagvizsgáló berendezést használtunk. A vizsgálat során a próbateteket legalább 50%-os alakváltozásig terheljük $4 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ keresztfej sebesség mellett. A berendezés acél nyomólemezei és az ezzel érintkező próbatest felületei között szilárd kenést alkalmaztunk. A mérés során kapott erő és keresztfej elmozdulás adatpárokból meghatározható a próbatest törőszilárdsága, a platófeszültsége és az általa elnyelt fajlagos energia mennyisége.



32. ábra: MTS 810 (Material Test System) zömítő berendezés

5. EREDMÉNYEK

5.1. Sűrűségmérés

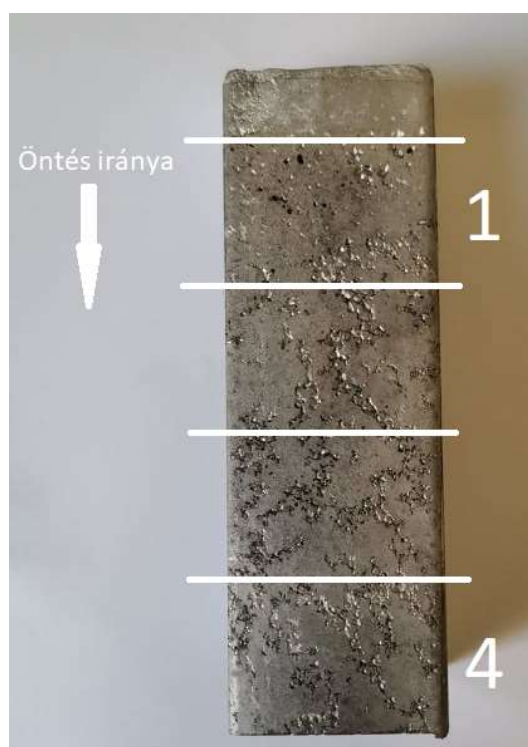
A vizsgált próbatestek geometriai méreteit az alábbi táblázat foglalja össze (10. táblázat). Az L01-es és L04-es sorszámú próbatestek erősítőanyag nélküli duzzasztott agyagkavics töltőanyagú fémhabok. A L01-es jelölésű próbatest az öntés során keletkezett tömb felső részéből került kimunkálásra, a L04-es pedig a tömb aljából, ahogy azt a 33. ábra is mutatja. Az L31-es és L34-es jelölésű próbatest 20 tf% 1 mm nagyságú Al₂O₃ erősítőanyagot, a L71-es és L74-es sorszámú pedig 20 tf% 0,4 mm nagyságú SiC erősítőanyagot tartalmaz. A sűrűség értékekből látszik, hogy a tömb tetejéből és aljából kimunkált próbatest ugyanolyan, vagy közel azonos sűrűséggel rendelkezik. A másik két esetben az L54-es és L74-es jelölésű próbatest sűrűsége kisebb, mint az L51-es és az L71-es jelölésűé.

10. táblázat: Vizsgált próbatestek geometriai méretei

Sorszám	Tömeg (g)	Átmérő (mm)	Magasság (mm)	Térfogat (cm ³)	Sűrűség (g/cm ³)
L01	44,67	30,16	39,92	28,52	1,57
L04	44,57	29,92	40,25	28,31	1,57
L31	60,11	31,60	45,98	36,06	1,67
L34	64,11	32,98	45,03	38,48	1,67
L51	55,89	31,30	40,20	30,93	1,81
L54	45,06	30,10	40,10	28,53	1,58
L71	52,88	31,00	40,00	30,19	1,75
L74	50,77	31,50	40,10	31,25	1,62

11. Táblázat: A duzzasztott agyagkavicssal töltött minták jelölései

Sorszám	Erősítőanyag	Átlagos szemcseméret (mm)
L0	Nincs erősítőanyag	-
L3	Alumínium-oxid	1
L5	Alumínium-oxid	0,4
L7	Szilícium-karbid	0,4



33. ábra: Próbatess sorszámozása a tömbben való elhelyezkedése alapján

A kerámia gömbhéjjal töltött próbatess méretei az alábbi táblázatban láthatóak (12. táblázat). A sorszám első számjegye a minta jelölésére, a második számjegy az öntvényen belüli elhelyezkedésére utal, ahogy az a fenti képen is látható (33. ábra). Minden öntés során 20 tf% erősítőanyagot használtunk, az egyes minták jelölései és a felhasznált erősítőanyag típusát és méretét az alábbi 13. táblázat mutatja be. A próbatess kimunkálása során több nehézség is adódott, aminek következtében csak a legfelső darabok készültek el, ezeket tudtuk vizsgálni.

12. táblázat A kerámia gömbhéjjal töltött próbadarabok sűrűsége

Sorszám	Átmérő (mm)	Magasság (mm)	Térfogat (cm ³)	Tömeg (g)	Sűrűség (g/cm ³)
C21	30,40	40,50	29,40	53,74	1,83
C31	30,00	40,60	28,70	50,64	1,76
C41	30,2	41,10	29,44	52,27	1,79

13. táblázat A kerámia gömbhéjjal töltött minták jelölései

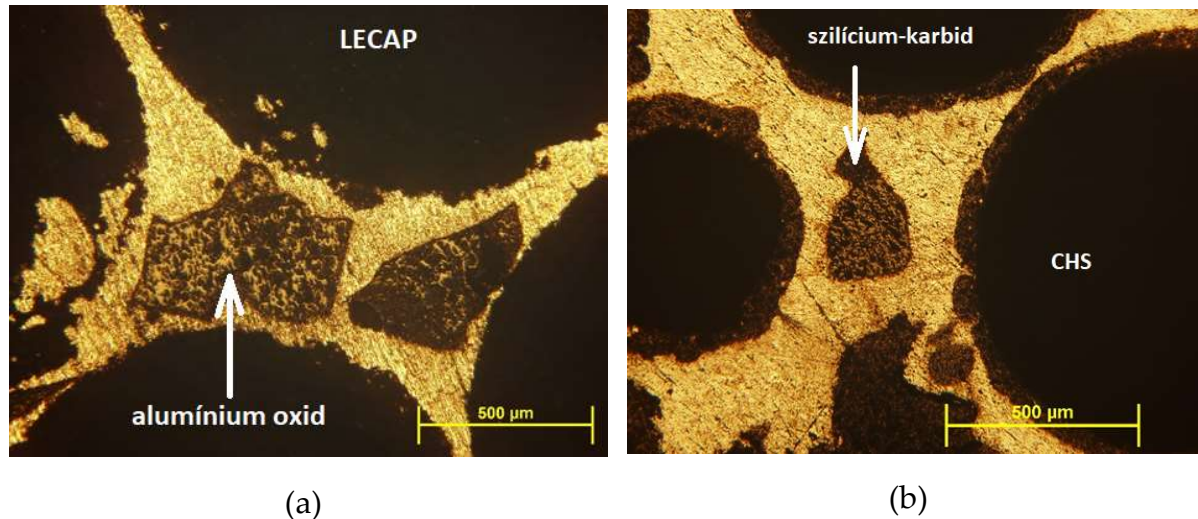
Sorszám	Erősítőanyag	Átlagos szemcseméret (mm)
C2	Szilícium-karbid	0,4
C3	Alumínium-oxid	0,4
C4	Alumínium-oxid	1

A forgácsolás során két tényező nehezítette a folyamatot, ami a lapkák kopása és a kerámia porozitása. A kerámia nagy keménysége miatt a 30x30 mm-es négyzetes alapterületű, 40 mm magas próbadarabok Ø30 mm méretűre történő lemunkálása során a nagy keménységű szerszámlapka rendkívül nagy sebességgel kopott a fémhabban található kerámiaszemcsék miatt, a kimunkált darabok számánál eggyel kevesebb használódott el.

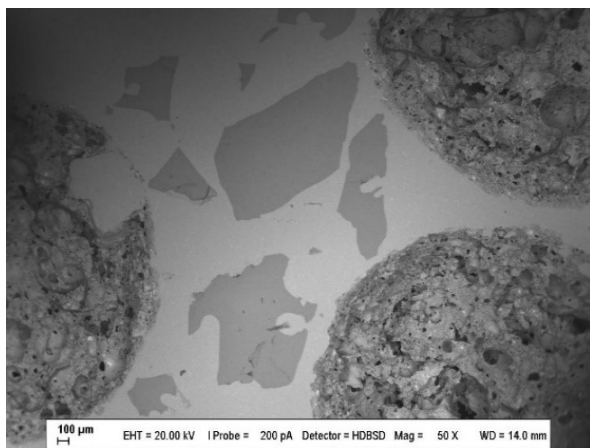
5.2. Mikroszerkezeti vizsgálatok

Az elkészült öntvényekből egy 10 mm széles darabot levágtunk mikroszkópos vizsgálathoz. Ezeket a mintákat megcsiszoltuk P80-astól P4000-es szemcsedurvaságú csiszolópapírral, majd políroztuk őket 3 µm-es és 1 µm-es gyémántsuszpenzióval. Általában az alumínium polírozásához nem gyémántsuszpenziót, hanem alumínium-oxid szuszpenziót (Topol-6) használnak, azonban a kerámia erősítőanyag miatt ez nem lett volna megfelelő. Olympus PMG 3-mas fémmikroszkóppal, Olympus SZX16 sztereomikroszkóppal és pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk a polírozott minták szerkezetét.

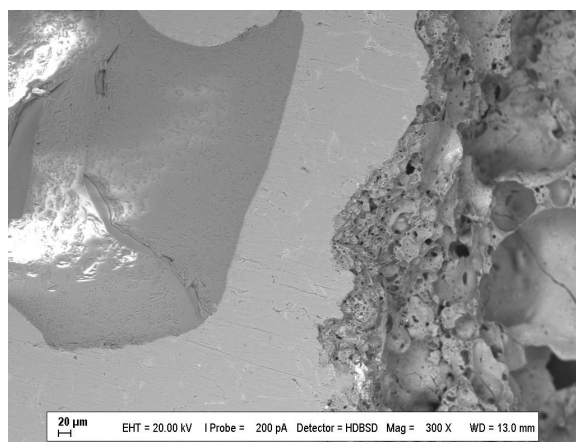
A vizsgálatok során megállapítottuk, hogy az alumínium mátrix teljesen kitöltötte a töltőanyag és az erősítőanyag közti helyet, ahogy az az alábbi képeken is látható (34. ábra, 35. ábra).



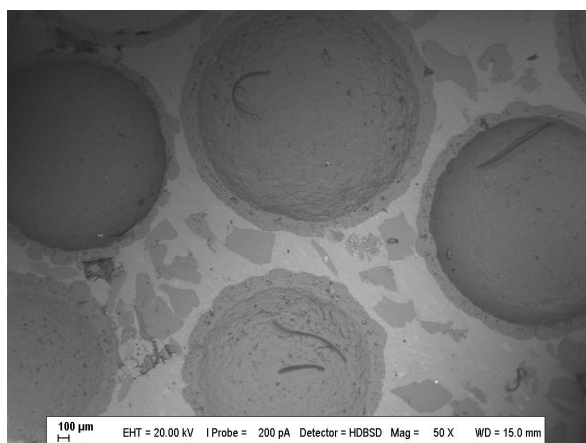
34. ábra: Duzzasztott agyagkavicccsal és 1 mm szemcseméretű alumínium-oxiddal (a) és kerámia gömbhéjjal és 0,4 mm szemcseméretű szilícium-karbiddal (b) készült erősített fémhab fémmikroszkópos felvétele



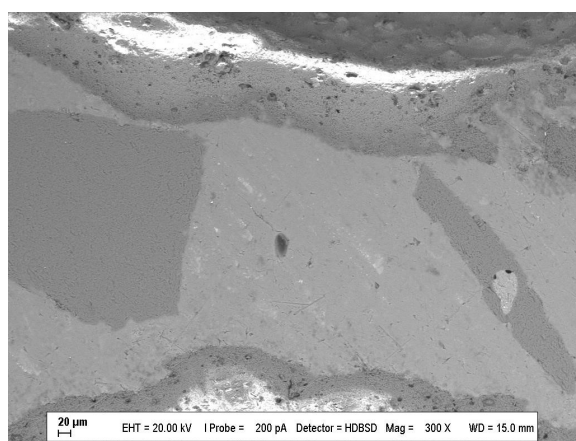
(a)



(b)

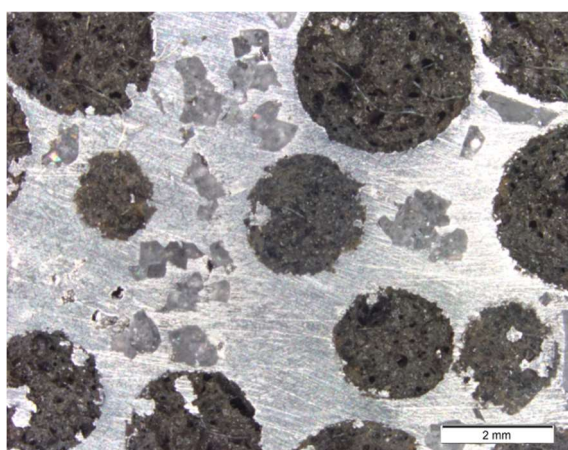


(c)

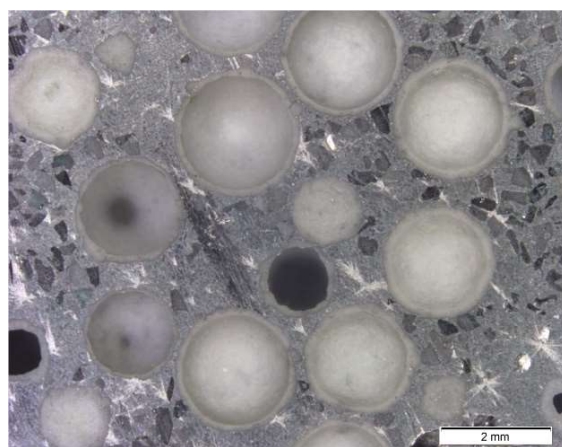


(d)

35. ábra SEM felvétel az alumínium mátrix kapcsolódásáról az agyagkavicshoz és az 1mm szemcseméretű alumínium-oxidhoz 50x-es (a) és 300x-os (b) nagyításban, valamint a kerámia gömbhéjhoz és a 0,4mm szemcseméretű szilícium-karbidhoz 50x-es (c) és 300x-os (d) nagyításban



(a)



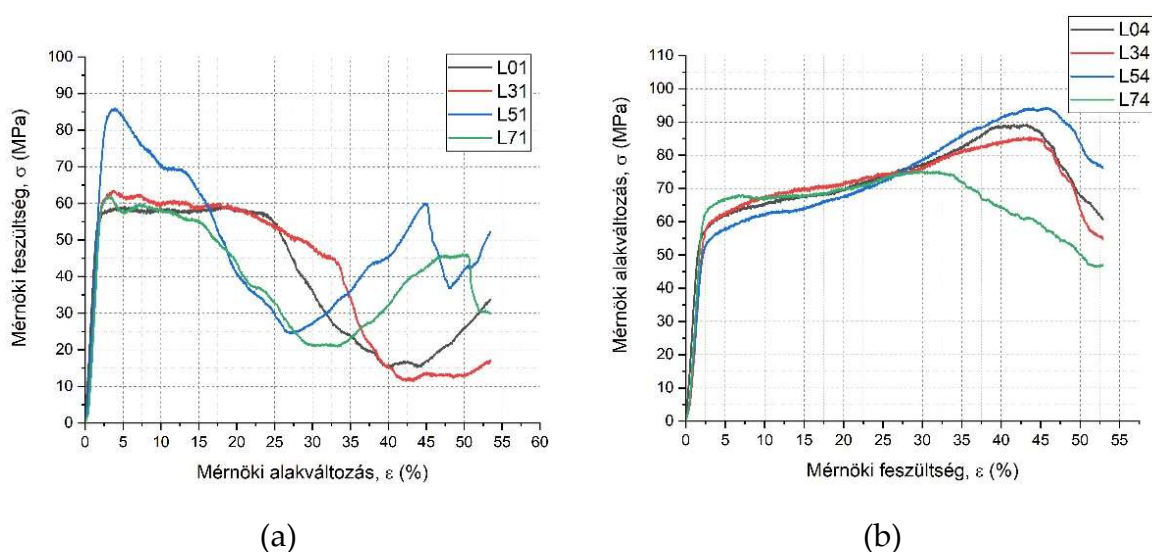
(b)

36. ábra Duzzasztott agyagkavicsal és 1 mm szemcseméretű alumínium-oxiddal (a) és kerámia gömbhéjjal és 0,4 mm szemcseméretű alumínium-oxiddal (b) készült erősített fémhab (sztereómikroszkópos felvétel)

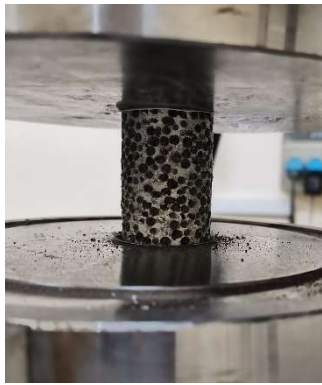
Sztereómikroszkóppal készített felvételeket mutat be a fenti ábra (36. ábra). Az ilyen módszerrel készített felvételeket használtuk arra, hogy az átlagos szemcseméret nagyságát megmérjük az egyes erősítőanyagoknak. Minden típusból tíz-tíz szemcse méretét mértük le két tengely mentén, az eredményeket pedig kiátlagoltuk. Az így felvett táblázatok a mellékletben találhatóak (16. táblázat, 17. táblázat, 18. táblázat). Az eredményeket értékelve arra a következtetésre jutottunk, hogy az átlagos méretbeli eltérések elfogadhatóak figyelembe véve ezeknek az anyagoknak a felhasználási területét (csiszolóanyag, mint azt már fentebb említettük), hogy ez a terület milyen méretpontosságot igényel, valamint az anyagok keménységéből és a darabok méretéből adódó megmunkálási lehetőségeket.

5.3. Mechanikai vizsgálatok

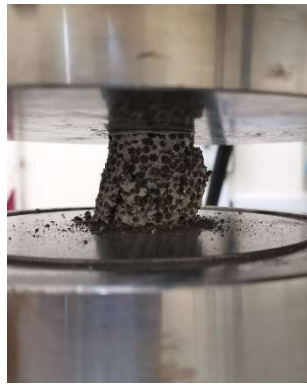
A kvázi-statisztikus nyomóvizsgálat eredményeit a az alábbi ábra mutatja mérnöki alakváltozás-mérnöki feszültség rendszerben (37. ábra). A diagramok azonos tömb-béli elhelyezkedésnél különböző erősítőanyag alkalmazásával is hasonló jelleget, míg a tömb tetejéből és aljából származó próbatestek egymástól igen különböző jelleget mutatnak. A 37. ábra (a) felében látható, hogy erősítőanyag alkalmazásával a törőszilárdság értéke növekedett. Erősítőanyag alkalmazása nélkül a törőszilárdság 50 MPa, 20 tf% SiC erősítőanyaggal 61 MPa-ra, 20 tf% 1 mm nagyságú Al₂O₃ erősítőanyag használatával 63 MPa-ra nőtt ez az érték. Kiugró növekedés figyelhető meg 20 tf% 0,4 mm nagyságú Al₂O₃ használatakor, ekkor a törőszilárdság értéke 94 MPa. Szintén ezen a diagramon megfigyelhető, hogy a feszültség értékek meredeken estek ~15%-os alakváltozás után. A vizsgálatok során készített felvételeken látható a tönkremenetel folyamata, ezt szemléltetik az alábbi ábrák (38. ábra, 39. ábra).



37. ábra: Kvázi-statisztikus nyomóvizsgálat eredménye mérnöki alakváltozás-mérnöki feszültség rendszerben: (a) L01, L31, L51, L71 számú próbatestek, (b) L04, L34, L54, L74 számú próbatestek



(a)



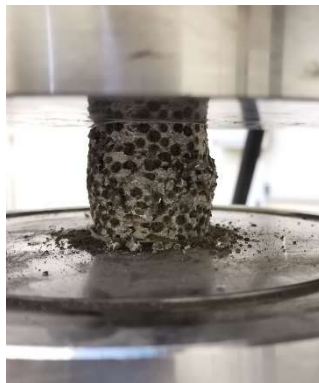
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

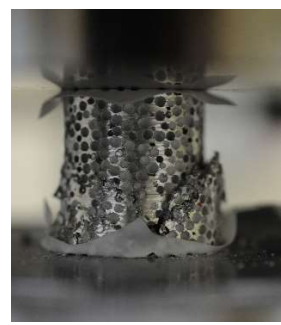
38. ábra: Zömítés folyamata: (a-c) L31-es próbatest esetén, (d-f) L34-es próbatest esetén



(a)



(b)



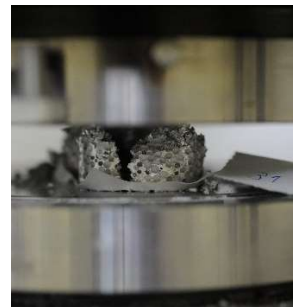
(c)



(d)

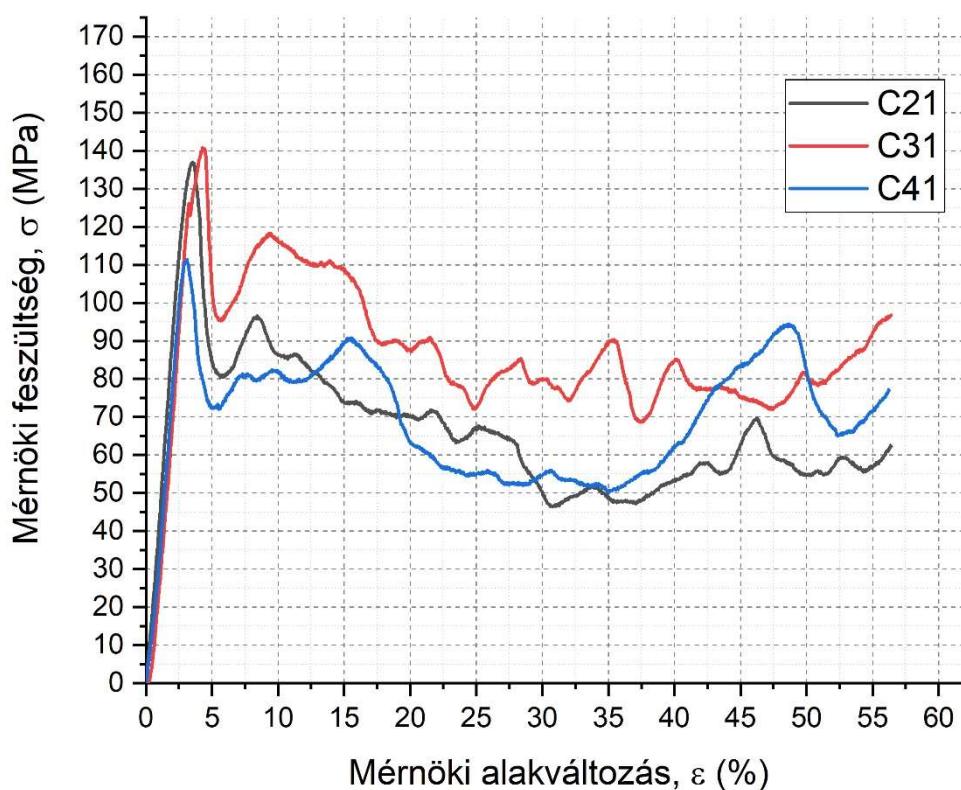


(e)



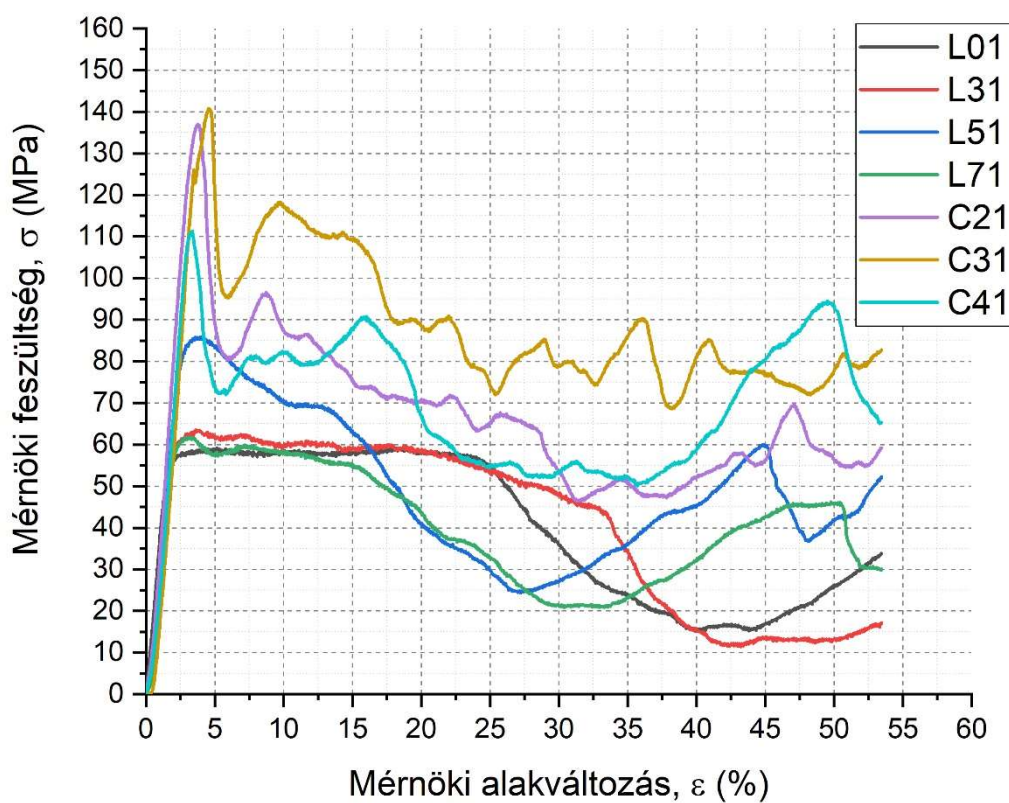
(f)

39. ábra A zömítés folyamata (a-d) és a tönkremeneteli végállapot (e-f) a C31-es próbatest esetén



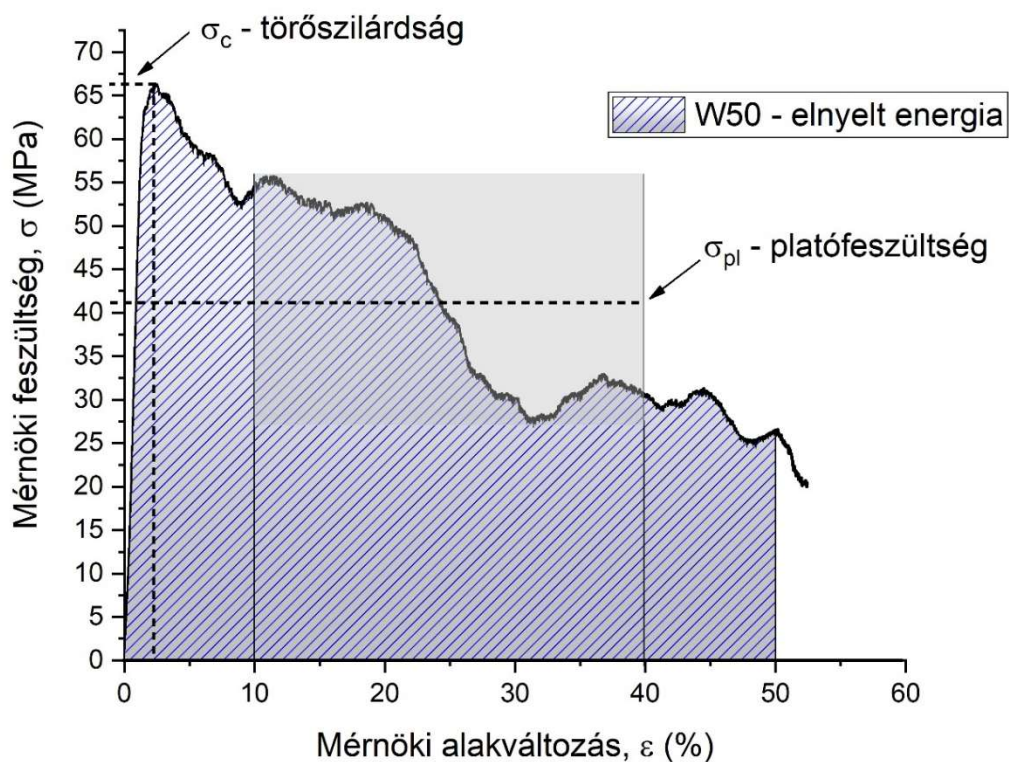
40. ábra: Kvázi-statikú nyomóvizsgálat eredménye C21, C31 és C41 számú próbatestek esetén mérőki alakváltóás-mérőki feszültség rendszerben

A zömítőpróba során felvett diagramon (40. ábra) látható, hogy az előzetes feltételezéseinknek eleget téve a kerámia gömbhéjjal töltött anyagoknak a kezdeti szakaszban van egy kiemelkedő feszültségértékük, amit a kerámia gömbhéj okoz. Az agyagkavicsal töltött mintákkal összehasonlítva a gömbhéjjal készült minták plató szakaszában jelentősen nagyobbak az ugrások, ahogy ez az alábbi összesített diagramon látható (41. ábra).



41. ábra: Kvázi-statiszusz nyomóvizsgálat eredményeit összesítő diagram

A vizsgált fémhabok mechanikai tulajdonságait a zömítővizsgálat során kapott eredményekből származtattuk. Ilyen tulajdonságok a törőszilárdság (σ_c), a platőfeszültség (σ_{pl}) ami alatt a mért feszültségek átlagát értjük 10% és 40% alakváltozás között és az elnyelt energia (W_{50}), ami pedig az 50%-os alakváltozásig mért görbe alatti terület értéke, ezt az alábbi ábra magyarázza (42. ábra).

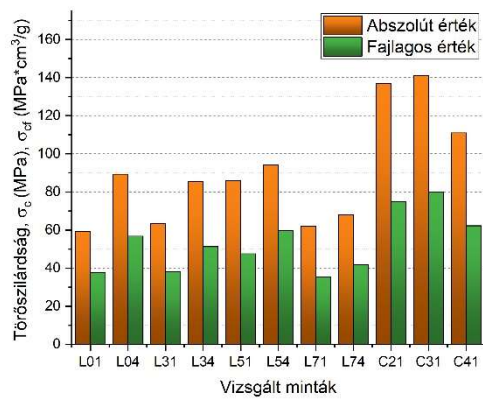


42. ábra: Fémhabok mechanikai tulajdonságait ismertető diagram

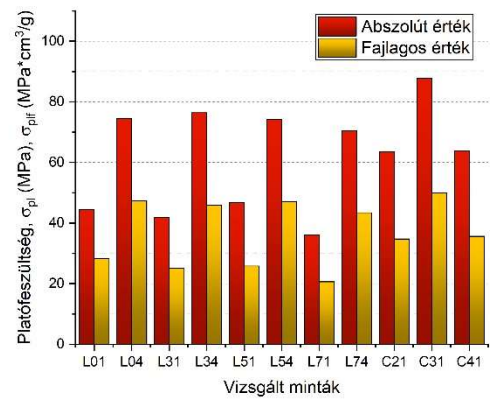
Az előzőekben ismertetett származtatott értékeket a 14. táblázat foglalja össze és a 43. ábra jeleníti meg a fajlagos értékekkel kiegészítve. A fajlagos értékek alatt a számított érték és a vizsgált minta sűrűségének a hányadosát értjük. Látható, hogy a legtöbb kerámia töltőanyagú minta esetén a törőszilárdság jelentősen nagyobb, mint az ugyanolyan erősítőanyagot tartalmazó duzzasztott agyagkavics töltőanyagú minta. A platófeszültség és az elnyelt energia mennyisége is meghaladja a duzzasztott agyagkavicsal töltött minták értékeit, de már kisebb mértékben, mint a törőszilárdság.

14. táblázat: A vizsgált minták mechanikai tulajdonságai

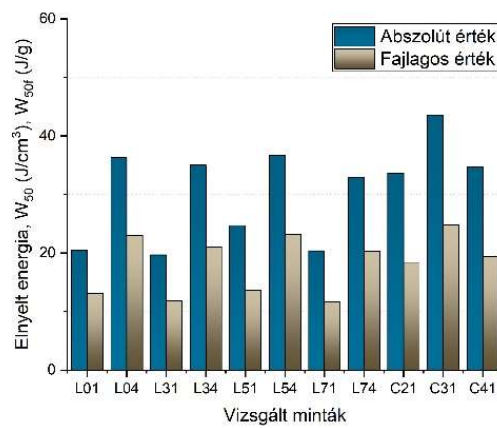
Minta sorszáma	$\sigma_c (MPa)$	$\sigma_{pl} (MPa)$	$W_{50} \left(\frac{J}{cm^3} \right)$	Fajlagos $\sigma_c \left(\frac{MPa \cdot cm^3}{g} \right)$	Fajlagos $\sigma_{pl} \left(\frac{MPa \cdot cm^3}{g} \right)$	Fajlagos $W_{50} \left(\frac{J}{g} \right)$
L01	59	44	20,49	38	28	13,08
L04	89	75	36,28	57	47	23,04
L31	64	42	19,66	38	25	11,79
L34	69	76	35,05	51	46	21,03
L51	86	47	24,70	48	26	13,67
L54	63	74	36,67	60	47	23,22
L71	62	36	20,38	35	21	11,64
L74	68	71	32,97	42	43	20,29
C21	137	64	33,66	75	35	18,39
C31	141	88	43,59	80	50	24,77
C41	111	64	34,73	62	36	19,40



(a)



(b)



(c)

43. ábra: A zömítővizsgálat eredményei: (a) σ_c – törőszilárdság és σ_{cf} – fajlagos törőszilárdság, (b) σ_{pl} – platófeszültség és σ_{plf} – fajlagos platófeszültség, (c) W_{50} – elnyelt energia és W_{50f} – fajlagos elnyelt energia

5.4. Ár összehasonlítása

A mechanikai vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy a kerámia gömbhéjjal töltött próbatestek jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a duzzasztott agyagkavicsal töltöttek. Ez a megállapítás maga után von egy, az iparban gyakran hangoztatott, az árra vonatkozó kérdéskört. Az alábbiakban azt tárgyaljuk, hogy anyagi szempontból hogyan teljesítettek az egyes anyagok. Ebben az esetben csak a töltőanyag árát vizsgáljuk, mivel a felhasznált mátrix- és erősítőanyag, valamint a gyártáshoz használt szerszámok azonosnak mondhatóak.

A duzzasztott agyagkavics Liapor márkanéven fut, kereskedelmi forgalomban könnyen elérhető, beszerzési árát tekintve 5000 és 6000 Forint közt mozog egy 50 literes zsák. Ezek a zsákok tartalmazhatnak tört szemcséket, amelyeket szitálással távolítottunk el, az átszítált mennyiség 1/3-át tették ki.

A kerámia gömbhéj beszerzése jelentősen nehezebb, csupán a német Hollomet GmbH-től szerezhetőek be a régiókban. A cég Globocer néven árulja a gömbhéjakat, beszerzési árukat tekintve 1500 Euróba kerül egy 40 literes zsák. Az alábbi ábrán az Euró napi árfolyamának változása látható az előző félév folyamán (44. ábra). Az öntéseket augusztusban és szeptemberben végeztük, az átlagos árfolyam 360 Ft/EUR volt ebben az időszakban [30].

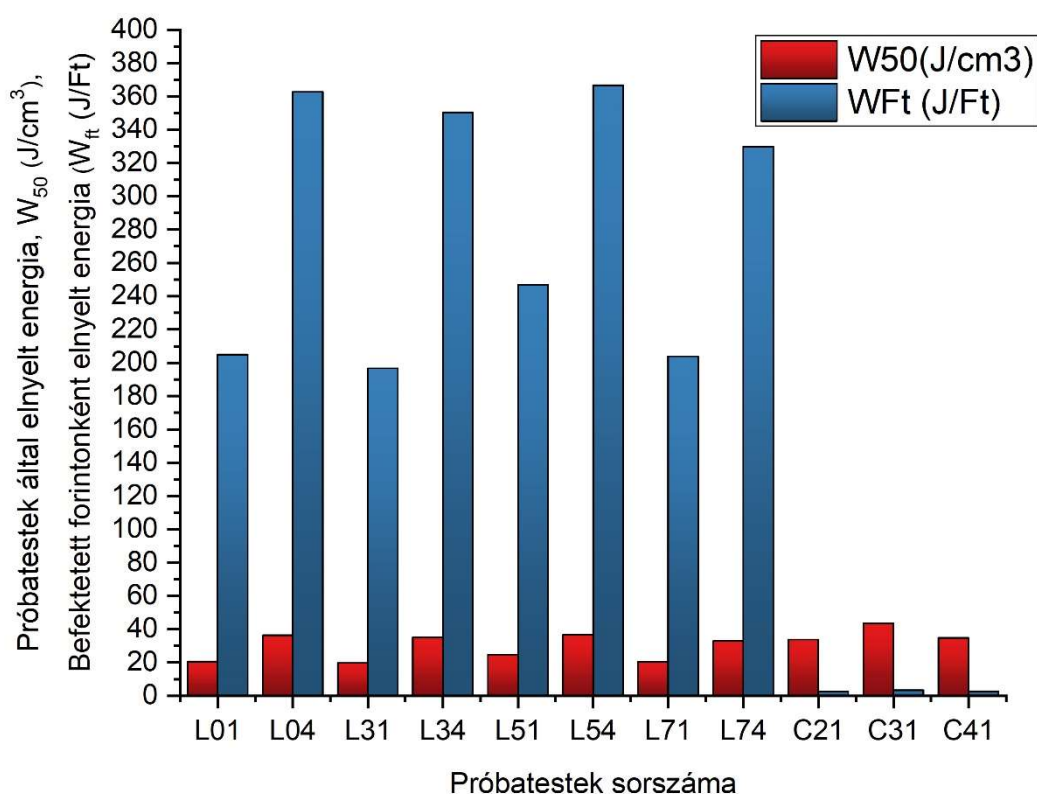


44. ábra: Euró árfolyam változása az előző hat hónapban [30]

15. táblázat: Töltőanyag ára

Típus	Beszállítói ár	Egységár (Ft/l)	Egységár (Ft/cm ³)	Öntésenként felhasznált mennyiség (cm ³)	Felhasznált mennyiség ára (Ft/próbatest)
Duzzasztott agyagkavics	5000 Ft / 50 l	100	0,1	241	6,025
Kerámia gömbhéj	1500 EUR/40 l (540000 Ft/40l)	13500	13,5	241	813,375

Ebben a táblázatban (15. táblázat) összefoglaltuk a beszerzési árat, az egységárat, az egy öntéshez felhasznált mennyiséget és az egy próbatesthez szükséges mennyiség árát (egy öntésből 4 próbatest készült, mint azt a 33. ábra is mutatja). Az alábbi ábrán az egyes próbatestek által elnyelt energiának és az egységárnak a hányadosa látható (45. ábra).



45. ábra: Az elnyelt energia a térfogat és a befektetett pénz függvényében

Ez azt mutatja meg, hogy befektetett forintonként hány Joule energiát nyel el az anyag kompresszió közben. Azért választottuk ezt a megközelítést, mert a gyakorlatban mérlegelni

kell, hogy a várható terhelések vagy a geometria korlátozó hatása indokoltá teszi-e a jelentősen drágább töltőanyag használatát. Amennyiben a mechanikai teljesítményigényt (törőszilárdság) nem elégíti ki, nem használható agyagkavics töltőanyagként. Abban az esetben, amikor ennek az igénynek eleget tesz, akkor az energiaelnyelési tulajdonságai összemérhetők a kerámia gömbhéjjal töltött anyaggal, és ebben az esetben az ár döntő szempont.

6. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE, KÖVETKEZTETÉSEK

Sikeresen gyártottunk A356 mátrixanyagú ~1 mm és ~0,4 mm szemcsenagyságú Al_2O_3 és ~0,4 mm szemcsenagyságú SiC részecskékkel erősített szintaktikus fémhabokat.

- A mikroszerkezeti képekből látható, hogy a mátrix anyaga az erősítő szemcséket teljes mértékben körbeveszi, porozitási hibákat nem figyeltünk meg a tömbben.
- Mechanikai vizsgálatokból megállapítottuk, hogy a duzzasztott agyagkavics esetén a hozzáadott nagy méretű (1 mm szemcseméretű) Al_2O_3 és a SiC részecske nem minden esetben erősítette az anyagot, a kisebb méretű Al_2O_3 azonban minden mért esetben erősítő hatást fejtett ki. A legnagyobb mértékben ez az utóbbi erősítőanyagrészecske növelte a fajlagos törőszilárdság értékét a tömb tetejéből származó minta esetén, ennek értéke 26%. A többi esetben igen kis növekedés tapasztalható, illetve egyes minták esetén még csökkent is ennek az értéke. A fajlagos platófeszültség minden esetben csökkent. A fajlagos energiaelnyelés mértéke pedig minden esetben nőtt a kis méretű alumínium-oxid erősítőanyag használatával az erősítőanyag nélküli mintákhoz képest. A tömb tetejéből származó minta esetén 5 %-kal nőtt az értéke.
- Összességében tehát elmondható, hogy a kis méretű alumínium-oxid részecskéknek erősítő hatása van duzzasztott agyagkavics töltőanyagú fémhabok esetén, ugyanis ekkora értékű törőszilárdságot a használata nélkül nem lehet elérni. Az erősítőanyag méretéről tehát elmondható, hogy érdemes minél kisebb részecskéket használni, mint az alapötletként szolgáló Duralcan® kompozit, amelyben 20 μm szemcseméretű SiC erősítőanyag van, azonban az ilyen nagyságrendbe eső méret esetén már más gyártási eljárás szükséges, hogy a megfelelő keveredés megtörténjen. Ilyen eljárás lehet például a bekeveréses öntési eljárás.
- A duzzasztott agyagkaviccsal töltött minták esetén megfigyelhető, hogy a tömb tetejéből és az aljából kimunkált próbatestek nyomóvizsgálatából származó mérnöki alakváltozás és mérnöki feszültség rendszerben ábrázolt görbéje teljesen más jelleget mutat (37. ábra). Ennek oka nem egyértelmű, de több tulajdonságban is eltérhet a két minta:
 - A jelenséget magyarázhatná, hogy a tömb tetején és az alján eltérő mennyiségben van jelen az erősítőanyag, azonban az erősítőanyagot nem tartalmazó minta esetén is megfigyelhető ez a jellegbeli különbség, illetve a két próbatest sűrűsége is megegyezik.

- A két próbatest között egy nagy különbség van, ami a gyártásból adódik, ez pedig a téglék alján lévő kilevegőző nyílás, ahonnan a 4-es számú próbatestek származnak. Azonban más mátrixanyagok vizsgálatakor ez a jelenség nem volt megfigyelhető, így ez sem egyértelmű indok.
- Az infiltrálás és a kilevegőzés hatására elképzelhető, hogy az erősítőanyag a tömb szélére áramlott a gyártás során, amely rész a próbatestek hengeresre való kimunkálásakor el lett távolítva és ezáltal sokkal kevesebb erősítőanyagot tartalmaztak a zömített minták. Ez meg is figyelhető a görbéken és a zömítés folyamán is látható volt, hogy nem jelent meg az erősítőanyag ridegítő hatása.
- Megfigyelhető, hogy minden esetben kedvezőbb mechanikai tulajdonságokat biztosít a kerámia gömbhéjjal töltött fémhab minta, a legnagyobb különbségek a törőszilárdságban figyelhetők meg, ahol még fajlagos esetben is 68% és afeletti értékeket kaptunk. A nagy alumínium-oxid minták esetén ez az érték 97%-os eredmény, tehát közel duplája, mint az ugyanezen erősítőanyagú duzzasztott agyagkavics minta esetén. A platófeszültség kis alumínium-oxid erősítőanyag esetén nőtt a leginkább, 93%-kal. Ugyan ezen mintákat vizsgálva a fajlagos energia elnyelés mértéke is jelentősen nőtt, ennek értéke 81%.
- Összességében elmondható, hogy a kerámia gömbhéjjal sokkal jobb mechanikai tulajdonságokat tudunk elérni azonos gyártási módszerrel, azonban nem szabad megfeledkezni a két töltőanyag közötti árkülönbségről.

6.1. Jövőbeli tervek

A legyártott tömböket minden esetben négyfelé vágtuk, ezekből ezen dolgozatban a legfelső, azaz az 1-es és a legalsó, azaz a 4-es jelölésű mintákat tudtuk vizsgálni. A továbbiakban mindenképp szeretnénk a többi próbatestet is kiértékelni, ezáltal komplexebb képet kaphatunk az erősítőanyag szintaktikus fémhabra gyakorolt hatásáról, valamint az erősítőanyag eloszlásáról infiltrálás esetén.

Továbbá szeretnénk többféle erősítőanyagot is alkalmazni és elemezni azok gyárthatóságát, mikroszerkezetét és mechanikai tulajdonságait mind kerámia gömbhéj mind pedig duzzasztott agyagkavics töltőanyag esetén. Ezekre példa a különböző minőségű szilícium-karbid és rézzel bevont szénszál. Ezen felül szeretnénk többféle térfogatszázalékú erősítést vizsgálni ugyanazon erősítőanyag és töltőanyag használatakor.

A megmunkálási nehézségek miatt szeretnénk in-situ vékonyfalú acélcsőbe infiltrálni és ezen gyártási eljárás alkalmazásakor vizsgálni a próbatesteket.

7. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] D. Gábor, “PORÓZUS SZERKEZETEK,” pp. 212–245, [Online]. Available: http://real.mtak.hu/91321/1/3_1.pdf.
- [2] X. Mao, “Processing of Ceramic Foams,” *Recent Adv. Porous Ceram.*, no. September, 2018, doi: 10.5772/intechopen.71006.
- [3] D. C. Wijeyesekera, L. Numbikannu, T. N. H. T. Ismail, and I. Bakar, “Mitigating Settlement of Structures founded on Peat,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 136, no. 1, 2016, doi: 10.1088/1757-899X/136/1/012042.
- [4] D. L. Tomasko *et al.*, “Development of CO₂ for polymer foam applications,” *J. Supercrit. Fluids*, vol. 47, no. 3, pp. 493–499, 2009, doi: 10.1016/j.supflu.2008.10.018.
- [5] M. District, “LANIK-CERAMIC-FOAM-FILTERS-CER229-8.” <https://materialdistrict.com/material/ceramic-foam>.
- [6] F. Fraunhofer, I. Ifam, D. Dresden, F. I. Dresden, C. M. Materials, and O. M. Foams, “Open-cell Metal Foams,” pp. 1–8, 2021, [Online]. Available: https://www.ifam.fraunhofer.de/en/Profile/Locations/Dresden/Cellular_metallic_materials/offenzellige_metallschaume.html.
- [7] C. Wall and M. Physics, “Foams Cell Wall Mathematical Physics Aluminum,” pp. 1–7, 2021, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/post/What-is-the-physics-behind-the-number-of-pores-cells-in-aluminum-foams-during-the-gas-expansion-of-the-manufacturing-process>.
- [8] B. Khan, “Bullets and Shields Against Radiation,” pp. 1–5, 2021, [Online]. Available: <https://www.engineering.com/story/composite-metal-foam-stops-bullets-and-shields-against-radiation>.
- [9] O. I. Norbert, “Szintaktikus fémhabok PhD- értekezés,” 2009.
- [10] L. J. G. M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck and J. W. H. and H. N. G. Wadley, *Metal Foams : a Design Guide Metal Foams : A Design Guide*, vol. 3069, no. FEBRUARY 2002. 2016.
- [11] W. Csilla, “Fémhabok szerkezeti és mechanikai vizsgálata,” 2006.
- [12] K. Péter, K. Csilla, R. Zsuzsanna, and L. János, “Fémhabok előállításának módszerei,” [Online]. Available: http://anyagokvilaga.hu/tartalom/2001/apr/kenesei_kadar_rajkovits_lendvai.htm.
- [13] F. García-Moreno, “Commercial applications of metal foams: Their properties and production,” *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 2, pp. 20–24, 2016, doi: 10.3390/ma9020085.

- [14] M. M. Composites, P. Metallurgy, S. Atomisation, T. W. B. Laser, and L. Gallardo, "Materials – Special materials production 6 Special materials production," pp. 1–49, 2002.
- [15] Aluinvent, "Aluinvent- Alumínium hab árnyékoló panel.pdf," [Online]. Available: <http://aluinvent.com/references/aluminiumhab-arnyekolo-fuggonyfal-szerkezeten/>.
- [16] L. E. Murr, "Additive manufacturing of biomedical devices: an overview," *Mater. Technol.*, vol. 33, no. 1, pp. 57–70, 2018, doi: 10.1080/10667857.2017.1389052.
- [17] M. Garcia-Avila, M. Portanova, and A. Rabiei, "Ballistic performance of composite metal foams," *Compos. Struct.*, vol. 125, pp. 202–211, 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.01.031.
- [18] J. Marx, M. Portanova, and A. Rabiei, "Ballistic performance of composite metal foam against large caliber threats," *Compos. Struct.*, vol. 225, no. April, p. 111032, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111032.
- [19] A. Szlancsik, B. Katona, A. Kemény, and D. Károly, "On the filler materials of metal matrix syntactic foams," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 12, 2019, doi: 10.3390/ma12122023.
- [20] B. Katona, "Szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságai ciklikus , illetve nagy alakváltozási sebességű zömítés során PhD- értekezés," p. 99, 2018.
- [21] A. M. S-De-la-muela, L. E. G. Cambronero, and J. M. Ruiz-Román, "Molten metal infiltration methods to process metal matrix syntactic foams," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 1, 2020, doi: 10.3390/met10010149.
- [22] J. Marx and A. Rabiei, "Overview of Composite Metal Foams and Their Properties and Performance," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 19, no. 11, pp. 1–13, 2017, doi: 10.1002/adem.201600776.
- [23] 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, no. November 2018, pp. 190–195, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.541.
- [24] Z. Zaiemyekheh, G. H. Liaghat, H. Ahmadi, M. K. Khan, and O. Razmkhah, "Effect of strain rate on deformation behavior of aluminum matrix composites with Al₂O₃ nanoparticles," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 753, no. November 2018, pp. 276–284, 2019, doi: 10.1016/j.msea.2019.03.052.
- [25] 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, no. xxxx, pp. 968–970, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.09.068.
- [26] S. Orazbayev, M. Gabdullin, T. Ramazanov, Z. Askar, and Z. Rakhymzhan, “Obtaining hydrophobic surfaces in atmospheric pressure plasma,” *Mater. Today Proc.*, vol. 20, no. xxxx, pp. 335–341, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.10.052.
- [27] T. Ye, Y. Xu, and J. Ren, “Effects of SiC particle size on mechanical properties of SiC particle reinforced aluminum metal matrix composite,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 753, no. November 2018, pp. 146–155, 2019, doi: 10.1016/j.msea.2019.03.037.
- [28] A. Casting, “A356 Aluminum Casting,” pp. 1–6, 2020, [Online]. Available: <https://www.forcebeyond.com/a356-aluminum-casting/>.
- [29] S. Cast, “Aluminum A356 . 0-T6 , Sand Cast,” pp. 5–6, 2013, [Online]. Available: http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=d524d6bf305c4ce99414cabd1c7ed070.
- [30] “Euro árfolyam (EUR / HUF),” p. 2021, 2022, [Online]. Available: <https://www.portfolio.hu/arfolyam/EURHUF/EUR-HUF Spot?>

7.1. Ábrajegyzék

1. ábra: Néhány példa celluláris anyagok bemutatására: (a) fa szerkezeti felépítése [3], (b) szivacsos csontszövet [3], (c) polimer hab [4], (d) kerámia hab [5]	6
2. ábra: Különböző szerkezetű fémhabok: (a) nyílt cellás [6], (b) zárt cellás [7], (c) szintaktikus fémhab [8]...	7
3. ábra: Felhasznált töltőanyagok: (a) duzzasztott agyagkavics, (b) kerámia gömbhéj	8
4. ábraCélkitűzéseink vázlatosan összefoglalva.....	9
5. ábra: Fémhabok alkalmazása a járműiparban: (a) Ferrari 360-as modell karosszériája. A pirosan karikázott területen két alumínium hab tartóelem ad extra merevséget és ütközés esetén kiváló energia elnyelő tulajdonságokkal rendelkezi [14]. (b) ICE motorvonat karosszéria alumínium szendviesszerkezete [13].....	11
6. ábra: Aluivent által készített alumínium hab árnyékoló panel [15]	12
7. ábra: Egy kerámia-fémhab kompozit anyag ballisztikai vizsgálatának eredménye 12,7x99 mm-es töltény esetén. Az (a) és (c) ábrák mutatják a panelt a golyó becsapódásának irányából a (b) és (d) ábrák pedig a panel hátoldalát [18].....	13
8. ábra: (a) Az infiltrálás során a mátrix nem töltötte ki teljesen a gömbhéjak közötti teret [22], (b) az infiltrálás során az olvadék teljesen kitölti a gömbhéj belsejét.....	15
9. ábra: Szinterelés hőmérséklet-idő diagramja [23].....	16
10. ábra: Zömítő folyáshatár (a) és általános nyomószilárdság (b) Al-Al ₂ O ₃ nanokompozit esetén [23].	17

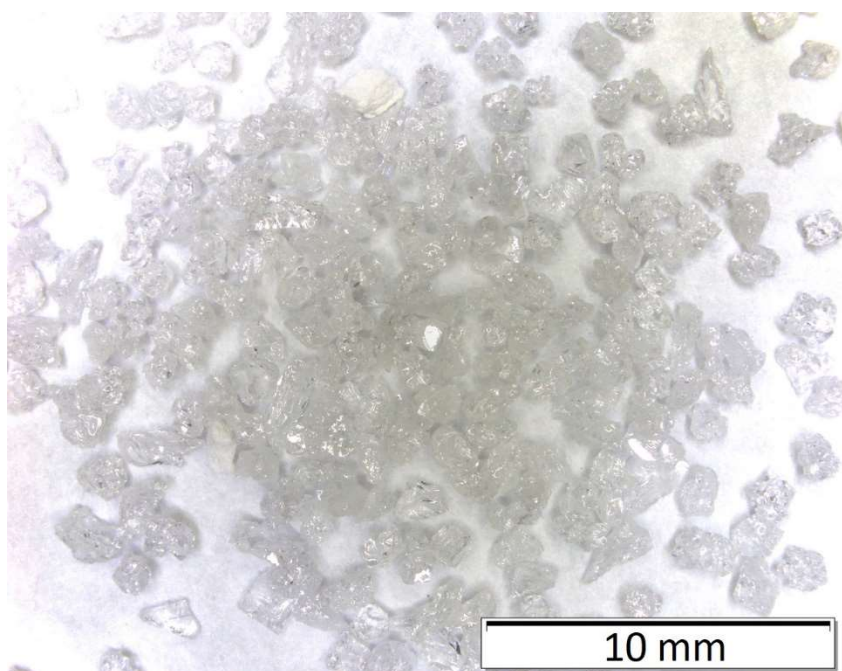
11. ábra: Nagy deformációsebességű vizsgálathoz használt Split-Hopkinson Pressure Bar elrendezés elméleti vázlata [24].....	17
12. ábra: (a) : Feszültség-alakváltozás görbék eltérő erősítési arány esetén [24], (b) : Elnyelt energia- Al_2O_3 tf% és Al_2O_3 t%-folyáshatár görbék [24]	18
13. ábra: Feszültség-alakváltozás görbék eltérő erősítési arány esetén 700 s^{-1} (a.), 1400 s^{-1} (b.), 3000 s^{-1} (c.) alakváltozás esetén, és az elnyelt energia- Al_2O_3 t% görbék eltérő terhelési sebesség mellett [24]. ..	18
14. ábra: Kocka alakú próbatestek keménységméréshez [25].....	19
15. ábra: Elterő tömegszázalékban erősített alumíniumkompozit nyomószilárdsága [25]	20
16. ábra: C0 (a), C1 (b), C2 (c) és C3 (d) minta szövetszerkezete [26]	21
17. ábra: Nyomószilárdsági értékek eltérő erősítési arány esetén [26]	21
18. ábra: Kvázi statikus zömítés eredménye $10 \mu\text{m}$ -es (a) és $50 \mu\text{m}$ -es (c), illetve nagy deformációsebességű próba eredményei $10 \mu\text{m}$ -es (b) és $50 \mu\text{m}$ -es (d) erősítőanyag esetén [27]	22
19. ábra: Zömítőpróbák valódi feszültség-valódi alakváltozás görbéi $10 \mu\text{m}$ -es (a) és $50 \mu\text{m}$ -es (b) erősítőanyag esetén [27]	23
20. ábra: Folyáshatár a deformációsebesség függvényében [27]	23
21. ábra: Használt erősítőanyagok: (a) 1 mm nagyságú Al_2O_3 részecskék, (b) SiC részecskék	25
22. ábra: Duzzasztott agyagkavics EDS vizsgálat spektruma (a) és a mintavétel helye (b).....	26
23. ábra: A kerámia gömbhéj EDS mérés spektruma (a) mérés helye (b)	27
24. ábra: A $0,4 \text{ mm}$ szemcseméretű alumínium-oxid erősítőanyag EDS spektruma (a) és a mérés helye (b) ..	28
25. ábra: Az 1 mm szemcseméretű alumínium-oxid EDS spektruma (a) és a mérés helye (b).....	29
26. ábra: A szilícium-karbid EDS spektruma (a) és a mérés helye (b)	30
27. ábra: Töltő- és erősítőanyag kimérésére és keverésére használt eszközök	31
28. ábra: Lindbert/Blue M típusú kemence.....	31
29. ábra: Nyomásos infiltráláshoz használt megfogó keret és az öntéshez szükséges egyéb eszközök	32
30. ábra: Hibás öntés elégtelen tömítés esetén (a) és sikeres öntés eredménye (b).....	33
31. ábra: Próbatestek hőkezelési folyamata: Hevítés 300°C – <i>val</i> 535°C -ra, hőn tartás 4 óra n keresztül, majd gyors hűtés. Ezután hevítés 200°C h – <i>val</i> 150°C -ra, hőn tartás 15 óra n keresztül, végül pedig gyors hűtés.....	34
32. ábra: MTS 810 (Material Test System) zömítő berendezés	34
33. ábra: Próbatest sorszámozása a tömbben való elhelyezkedése alapján.....	36
34. ábra: Duzzasztott agyagkavicsal és 1 mm szemcseméretű alumínium-oxiddal (a) és kerámia gömbhéjjal és $0,4 \text{ mm}$ szemcseméretű szilícium-karbiddal (b) készült erősített fémhab fémmikroszkópos felvétele	37
35. ábra SEM felvétel az alumínium mátrix kapcsolódásáról az agyagkavicsához és az 1 mm szemcseméretű alumínium-oxidhoz (a), valamint a kerámia gömbhéjhoz és a $0,4 \text{ mm}$ szemcseméretű szilícium-karbidhoz (b) ..	38
36. ábra Duzzasztott agyagkavicsal és 1 mm szemcseméretű alumínium-oxiddal (a) és kerámia gömbhéjjal és $0,4 \text{ mm}$ szemcseméretű alumínium-oxiddal (b) készült erősített fémhab (sztereómikroszkópos felvétel)	38
37. ábra: Kvázi-statisztikus nyomóvizsgálat eredménye mérnöki alakváltozás-mérnöki feszültség rendszerben: (a) L01, L31, L51, L71 számú próbatestek, (b) L04, L34, L54, L74 számú próbatestek	39
38. ábra: Zömítés folyamata: (a-c) L31-es próbatest esetén, (d-f) L34-es próbatest esetén.....	40
39. ábra A zömítés folyamata (a-d) és a tönkremeneteli végállapot (e-f) a C31-es próbatest esetén.....	40

40. ábra: Kvázi-statikusan nyomóvizsgálat eredménye C21, C31 és C41 számú próbatestek esetén mérnöki alakváltozás-mérnöki feszültség rendszerben.....	41
41. ábra: Kvázi-statikusan nyomóvizsgálat eredményeit összesítő diagram	42
42. ábra: Fémhabok mechanikai tulajdonságait ismertető diagram	43
43. ábra: A zömítővizsgálat eredményei: (a) σ_c – törőszilárdság és σ_{cf} – fajlagos törőszilárdság, (b) σ_{pl} – platófeszültség és σ_{plf} – fajlagos platófeszültség, (c) W_{50} – elnyelt energia és W_{50f} – fajlagos elnyelt energia	44
44. ábra: Euró árfolyam változása az előző hat hónapban	45
45. ábra: Az elnyelt energia a térfogat és a befektetett pénz függvényében	46

8. MELLÉKLET

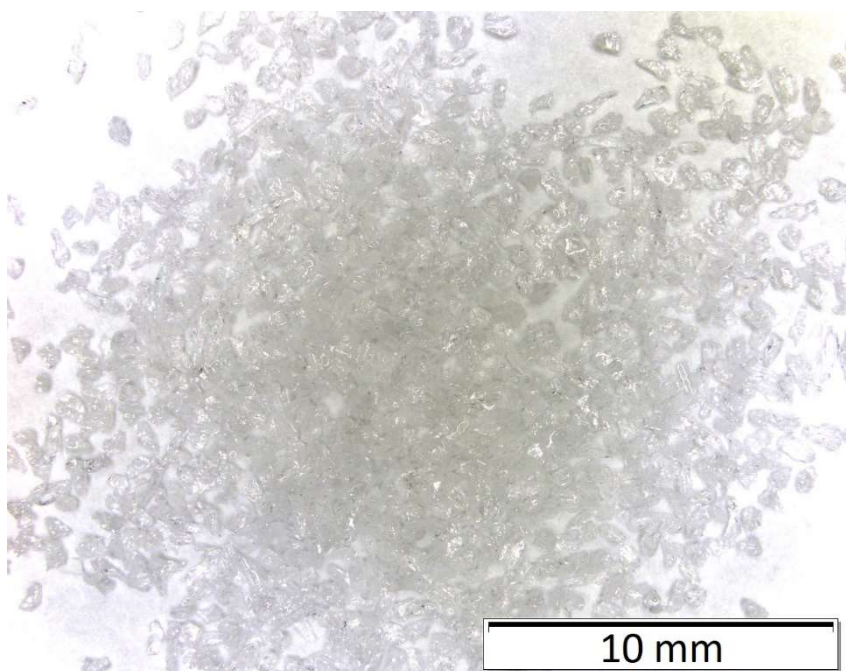
16. táblázat Az 1mm szemcseméretű alumínium-oxid szemcsemérete mérés alapján

Erősítőanyag	Hossz (μm)	Szélesség (μm)
1	1904	1098
2	1540	1035
3	1570	1287
4	1444	893
5	1630	1108
6	1167	1151
7	1038	1096
8	1226	1022
9	1010	817
10	1024	1069
átlag	1355,3	1057,6



17. táblázat Az 0,4mm szemcseméretű alumínium-oxid szemcsemérete mérés alapján

Erősítőanyag	Hossz (μm)	Szélesség (μm)
1	798	547
2	817	484
3	583	584
4	693	669
5	576	854
6	744	563
7	660	559
8	629	452
9	670	515
10	742	531
átlag	691,2	575,8



18. táblázat A 0,4mm szemcseméretű szilícium-karbid szemcsemérete mérés alapján

Erősítőanyag	Hossz (μm)	Szélesség (μm)
1	399	341
2	395	420
3	569	285
4	564	466
5	402	302
6	611	406
7	594	519
8	572	375
9	364	426
10	569	404
átlag	503,9	394,4

