



**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM**  
**GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR**  
**ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLÓGIA TANSZÉK**

**FÉMGÖMBHÉJ ERŐSÍTÉSŰ SZINTAKTIKUS FÉM HABOK MECHANIKAI**  
**TULAJDONSÁGAI**

**TDK DOLGOZAT**

**BÁLINT ATTILA, KOVÁCS ZSOLT, SZLANCSIK ATTILA**

**KONZULENSEK:**  
**DR. MÁJLINGER KORNÉL**  
**DR. ORBULOV IMRE NORBERT**

**2013**

## TARTALOMJEGYZÉK

|                                                                          |                                        |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>A DOLGOZATBAN SZEREPLŐ JELÖLÉSEK .....</b>                            | <b>HIBA! A KÖNYVJELZŐ NEM LÉTEZIK.</b> |
| <b>A DOLGOZATBAN SZEREPLŐ RÖVIDÍTÉSEK .....</b>                          | <b>HIBA! A KÖNYVJELZŐ NEM LÉTEZIK.</b> |
| <b>1. BEVEZETÉS .....</b>                                                | <b>4</b>                               |
| <b>2. SZAKIRODALOMI ÁTTEKINTÉS.....</b>                                  | <b>5</b>                               |
| 2.1. A SZINTAKTIKUS FÉMHAJOK FEJLŐDÉSTÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉSE .....         | 5                                      |
| 2.2. A SZINTAKTIKUS FÉMHAJOK FOGALMA, CSOPORTOSÍTÁSA .....               | 5                                      |
| 2.3. A SZINTAKTIKUS FÉMHAJOK MÁTRIXANYAGAI.....                          | 6                                      |
| 2.4. A SZINTAKTIKUS FÉMHAJOKNÁL FELHASZNÁLT GÖMBHÉJAK TULAJDONSÁGAI..... | 7                                      |
| 2.5. A SZINTAKTIKUS FÉMHAJOK GYÁRTÁSI LEHETŐSÉGEI.....                   | 8                                      |
| 2.6. A SZINTAKTIKUS FÉMHAJOK ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI.....                | 12                                     |
| 2.7. SZINTAKTIKUS FÉMHAJOK NYOMÓSZILÁRDSÁGI VIZSGÁLATAI.....             | 12                                     |
| <b>3. CÉLKITŰZÉS.....</b>                                                | <b>20</b>                              |
| <b>4. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS BERENDEZÉSEK .....</b>                      | <b>21</b>                              |
| 4.1. A FÉMHAJOGYÁRTÁSHOZ FELHASZNÁLT ALAPANYAGOK .....                   | 21                                     |
| 4.2. A GYÁRTÁSNÁL HASZNÁLT BERENDEZÉSEK .....                            | 21                                     |
| 4.3. A VIZSGÁLATOKHOZ HASZNÁLT BERENDEZÉSEK.....                         | 22                                     |
| <b>5. KÍSÉRLETI MUNKA .....</b>                                          | <b>23</b>                              |
| 5.1. AZ ERŐSÍTŐANYAG VIZSGÁLATA.....                                     | 23                                     |
| 5.1.1. A gömbhéjak jellemző méretének meghatározása.....                 | 23                                     |
| 5.1.2. A gömbhéjak sűrűségének meghatározása.....                        | 24                                     |
| 5.1.3. A gömbhéjak felületi morfológiájának vizsgálata .....             | 24                                     |
| 5.2. A SZINTAKTIKUS FÉMHAJOK GYÁRTÁSA.....                               | 25                                     |
| 5.2.1. Szintaktikus fémhajoggyártás kézi bekeveréses módszerrel .....    | 25                                     |
| 5.2.2. Szintaktikus fémhajoggyártás gravitációs öntéssel .....           | 26                                     |
| 5.2.3. Szintaktikus fémhajoggyártás közepes infiltrálással .....         | 26                                     |
| 5.2.4. Szintaktikus fémhajoggyártás kisnyomású infiltrálással .....      | 27                                     |
| 5.3. AZ ELŐÁLLÍTOTT KOMPOZITOK ELNEVEZÉSEI .....                         | 28                                     |
| 5.4. A FÉMHAJOK VIZSGÁLATAI.....                                         | 29                                     |
| 5.4.1. A szintaktikus fémhajok sűrűségének mérése .....                  | 29                                     |
| 5.4.2. A szintaktikus fémhajok metallográfiai vizsgálatai .....          | 30                                     |
| 5.4.3. A szintaktikus fémhajok mechanikai vizsgálatai.....               | 31                                     |

|            |                                              |                                        |
|------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>6.</b>  | <b>EREDMÉNYEK.....</b>                       | <b>35</b>                              |
| 6.1.       | SŰRŰSÉGMÉRÉS EREDMÉNYEI .....                | 35                                     |
| 6.2.       | A METALLOGRÁFIAI VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI..... | 35                                     |
| 6.3.       | MECHANIKAI VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI .....      | 37                                     |
| <b>7.</b>  | <b>ÖSSZEFOGLALÁS.....</b>                    | <b>44</b>                              |
| <b>8.</b>  | <b>SUMMARY IN ENGLISH.....</b>               | <b>45</b>                              |
| <b>9.</b>  | <b>IRODALOMJEGYZÉK.....</b>                  | <b>46</b>                              |
| <b>10.</b> | <b>KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....</b>              | <b>49</b>                              |
| <b>11.</b> | <b>MELLÉKLETEK.....</b>                      | <b>HIBA! A KÖNYVJELZŐ NEM LÉTEZIK.</b> |

## 1. Bevezetés

A mai modern világban egyre nagyobb kényszer az energiahatékonyságra való törekvés. Ennek kapcsán két fontos fejlesztési irány is van az anyagok szempontjából: az egyik, hogy a terhelés fő irányában, vagy irányában az anyag teherviselő képessége minél nagyobb legyen, a másik a tömegcsökkentés, amivel a fajlagos tulajdonságok javíthatók. Az első esetre a különféle kompozitok, míg a másodikra speciális kompozitok a fémhabok nyújthatnak hatékony megoldást. A két megoldás ötvözeteként állnak elő az úgynevezett szintaktikus fémhabok. Sűrűségük kicsi, ezért fajlagos tulajdonságaik kiemelkedőek, ugyanakkor a hagyományos fémhaboknál az esetek többségében sokkalta nagyobb szilárdságúak, és az energiaelnyelő képességük is nagyobb. A szintaktikus fémhabokat két módszerrel, keveréssel, vagy (igényesebb esetben) nyomásos infiltrálással állítják elő. Mivel habanyagok, ezért elsősorban nyomásra vannak igénybe véve, ennek megfelelően a nyomóvizsgálati jellemzőiket széles körben tanulmányozzák. Legfontosabb jellemzőik a nyomószilárdság, a törési alakváltozás, a szerkezeti merevség és az adott alakváltozásig elnyelt mechanikai munka. A mechanikai tulajdonságokra befolyással van a mikroszerkezet is, ezért fontos ennek tanulmányozása. Ennek kapcsán a legfontosabb tisztázandó kérdés a gömbhéjak és a mátrixanyag közötti kapcsolat megfelelése. Ez a határréteg, vagy átmeneti réteg a felelős a kompozitban a terhelésátadásra a gömbhéjak és a mátrix között.

A fenti figyelemreméltó tulajdonságok alapján döntöttünk a szintaktikus fémhabok kutatása mellett.

## **2. Szakirodalmi áttekintés**

### **2.1. A szintaktikus fémhabok fejlődéstörténeti áttekintése**

A szintaktikus fémhabok az 1960-as évek végén publikált [1] polimer mátrixú szintaktikus habokból alakultak ki. Az első, szintaktikus fémhabokkal foglalkozó publikációk az 1990-es évek elején-közepén jelentek meg. A szintaktikus fémhabokkal foglalkozó tudományterület aktív, hisz alkalmazásbeli lehetőségei még 50 évvel a tudományág kialakulása után is kiaknázatlanok, köszönhetően annak is, hogy mint megannyi más anyag, a szintaktikus habok is harcászati fejlesztés termékei. Jelenlegi publikációkban is sok tisztázatlan kérdés merül fel, melyek új lehetőségeket nyitnak új kutatások indítására [2]. Saját dolgozatunk létrehozását is ez a tény motiválta. Egy újfajta szintaktikus fémhab nyomószilárdsági tulajdonságainak vizsgálatával szeretnénk volna gyarapítani a szintaktikus fémhabok tudományágának jelenleg még nem túl bő bázisát. A következő alfejezetekben a szakirodalom kutatás eredményeit foglaljuk össze. Mivel pontosan megegyező szintaktikus fémhab nem szerepelt az adatbázisokban, ezért a más kutatók általi különböző fémhabokon végzett vizsgálatokkal elért eredményeket foglaljuk össze.

### **2.2. A szintaktikus fémhabok fogalma, csoportosítása**

A kompozitok, olyan szerkezeti anyagok, amelyeket két vagy több anyag egyesítésével állítanak elő annak érdekében, hogy előtérbe helyezzék az alkotók alkalmazás szempontjából fontos és előnyös tulajdonságait akár a hátrányos jellemzőik háttérbe szorítása mellett. A szintaktikus fémhabokat a részecske erősítésű kompozitok anyagcsaládjába sorolhatjuk. Az alkotókat mátrixanyagnak (vagy befogadóanyagnak), illetve erősítőanyagnak nevezik. A kompozitok harmadik fontos része az átmeneti réteg az erősítőanyag és a mátrix között, ami a terhelésátadásért felelős. Megkülönböztetnek mesterséges (az ember által létrehozott) és természetes kompozitokat [3]. Mesterséges kompozit például a beton, a szénszál-erősítésű polimerek és természetesen a szintaktikus fémhabok. A legősibb természetes kompozit a fa, illetve a bambusz [4].

A szintaktikus fémhabok olyan zárt cellás porózus szerkezeti anyagok, amelyekben a porozitást a fémes mátrixanyagba ágyazott, egymáshoz képest többé-kevésbé szabályos és egyenletes elrendeződésű gömbhéjak segítségével bevitt üregek adják. Ezek, a tervszerűen

bevitt üregek adják a szintaktikus fémhabok gömbhéjakból adódó porozitását. A mátrixanyag és a gömbhéjak között átmeneti réteg (interfész) jön létre [2].

A beágyazással két pozitív eredmény érhető el. A porozitás létrejöttével az anyag sűrűsége, ezáltal tömege csökkenthető, miközben a porozitás mértéke és eloszlása irányíthatóvá válik. A másik fő eredmény pedig az, hogy a mátrix-anyagot egy nagyobb szilárdságú anyaggal is erősíthetjük, ezáltal a sűrűsége vetített fajlagos szilárdságértékek nagyobbak lesznek [5].

A zárt cellás, szintaktikus fémhabok sűrűsége a nyílt cellás fémhabok sűrűségének akár kétszerese, háromszorosa is lehet ugyanolyan porozitási tulajdonságok mellett, viszont a szintaktikus fémhabok rugalmassági modulusa és szilárdsága nagyobb. Szerkezeti elemeknél, ahol a megfelelő szilárdsági modulus az egyik legfontosabb kritérium, a szintaktikus fémhabok használata lehetőséget nyújt a nagyobb sűrűségű anyagok kiváltására [6].

A szintaktikus fémhabok csoportosítása történhet a mátrix anyaga, a gömbhéjak anyaga, mérete, térkitöltése, illetve a szintaktikus hab sűrűsége, előállítás és az alkalmazási területük alapján. Külön csoportosítási szempont lehet az is, hogy hány alkotósnak tekintik a szintaktikus habokat. Egyes szakirodalmi források szerint a szintaktikus habok kétalkotósak: mátrixból és gömbhéjakból állnak. Mások szerint háromalkotósak, melyekben a harmadik fázis az elégtelen infiltráció miatt a mátrixban a gömbhéjak között jelenlévő nem kívánt üregek (nem kívánt porozitás) [2].

### **2.3. A szintaktikus fémhabok mátrixanyagai**

A mátrix anyagául az esetek többségében alumíniumot, könnyűfémeket, esetleg titánötvözetet használnak. Az alumínium sűrűsége  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , ezáltal a gyártott alkatrészek tömege is kicsi lesz. Olvadáspontja  $660 \text{ }^\circ\text{C}$ , ami lehetővé teszi a viszonylag kis energia befektetéssel járó megolvasztását. Érdemes megemlíteni, hogy az egyik legelterjedtebb alumínium ötvözet, az AlSi12 olvadáspontja csupán  $\sim 575 \text{ }^\circ\text{C}$ . Az alumínium gazdaságossági szempontból is kiváló választás, hisz piaci ára más fémekhez viszonyítva, mint például a titán vagy a magnézium, nagyságrendekkel olcsóbb, valamint nem utolsó sorban könnyen újrahasznosítható [7]. Az alumínium ötvözetek többsége jól önthető, ami szintén a gyárthatóságot könnyíti. Számos ötvözete ismert, ezáltal többféle szintaktikus fémhab létrehozására is lehetőséget nyújt, melyek különböző mechanikai értékekkel fognak rendelkezni, ezáltal szélesebb alkalmazási területen lehet őket felhasználni. A szintaktikus fémhabokkal foglalkozó szakirodalom 99%-a valamilyen alumínium mátrixú szintaktikus

habbal foglalkozik, jellemzően technikai tisztaságú (Al1050, a továbbiakban Al99,5) vagy közel eutektikus összetételű, S-ötvezésű alumíniummal (szilumin, a továbbiakban AlSi12) [2].

## **2.4. A szintaktikus fémhaboknál felhasznált gömbhéjak tulajdonságai**

A szintaktikus habok gömbhéjait alapanyaguktól függően változatos technológiával (cseppentéses eljárás, koaxiális fűvás, szol-gél eljárás stb.) állítják elő. A koaxiális fűvókák módszere során a gömbhéj anyagát finom por alakban kötőanyag bekeverésével acetonos oldatba viszik. A keverék egy speciális, koaxiális fűvókán keresztül cső formájában távozik. A levegőbe lépve a cső szétszakadozik, majd zuhanás közben a felületi feszültség hatására gömbhéjakká húzódik össze, közben az oldószer elpárolog. A kialakult gömbhéjakat a teljes szilárdság érdekében szinterelni kell. A gyártási folyamat kapacitása jellemzően 2000-15000 gömbhéj percenként, a jellemző átmérő 1-6 mm, a falvastagság 40 és 200  $\mu\text{m}$  között változik. Egy másik lehetőség az elvesző magos eljárás, melynek során éghető maganyagra viszik fel a fal anyagát finom por formájában. Az eljárás végső lépése szintén a szinterelés. További lehetőség a szol-gél eljárás. Mindhárom fenti eljárás végén szinterelést kell végrehajtani, ami a fal anyagának tömörségét hivatott biztosítani. Mivel ezt nem lehet nyomás alatt végezni, a fal lyukacsossága, porozitása nem szűnik meg teljesen [8]. A lyukacsosság miatt a szintaktikus fémhabok gyártása során maguk a gömbhéjak is mátrixanyaggal telítődhetnek. Így azonban a tömegcsökkentés és azon keresztül a fajlagos tulajdonságok javítása sem valósul meg.

A szintaktikus fémhabokban olyan gömbhéjakat alkalmaznak, amelyek hőállóak és kémiaiilag stabilak, mivel a mátrixanyagok olvadék állapotban nagyon reakcióképesek. A gömbhéjak anyaga lehet fém, kerámia, illetve üveg [6-8]. A kereskedelemben a leggyakoribbak a különböző vegyes oxidos összetételű kerámia gömbhéjak. Ezek a 20-500  $\mu\text{m}$  nagyságrendbe eső gömbhéjak tömegesen keletkeznek egy szén-erőműi technológia melléktermékeként és átmérőjük és/vagy sűrűségük alapján szétválogatva kerülnek forgalomba. Napjainkban egyre inkább elterjedőben vannak a szén gömbhéjak is akár különféle polimer, akár könnyűfém mátrixú kompozitokban. A szén mikrogömbhéjak előnye a kis sűrűségben és az ennek köszönhetően elérhető nagy fajlagos mechanikai tulajdonságokban van [2]. A szintaktikus fémhabokban lehetőség van még fém alapanyagú gömbhéjak alkalmazására is [9-10]. Előnyük, hogy az alapanyaguk olcsó, tetszés szerinti

ötvözetek alkalmazhatók és nagyon jó a hőállóságuk. Ezen érvek alapján választottuk vizsgálatainkhoz a gömbhéj típust.

A szintaktikus fémhabokban előforduló gömbhéjak tipikus átmérő tartománya 0,01-4 mm, illetve a tipikus falvastagság a 0,001-1 mm nagyságrendbe esik [2]. A gömbhéjak méreteloszlása szerint megkülönböztetünk unimodális és bimodális eloszlású gömbhéjakat [11]. A gömbhéjak falvastagsága fontos, hiszen ha a falvastagság eloszlását meg tudjuk adni, akkor a kompozit szilárdsági tulajdonságai pontosan meghatározhatóak [12]. A gömbhéjak legfontosabb jellemzője a gömbhéj belső  $r$  és külső  $R$  sugarának az aránya. Ezen fontos jellemző leírására vezették be az  $\eta$  sugárárányt, mely a gömbhéjak falvastagságával ( $f$ ) is kifejezhető:

$$\eta = \frac{r}{R} = 1 - \frac{f}{R}, \quad (1)$$

A gömbhéjakat egyenként vizsgálva azt tapasztalták, hogy azok szilárdsága a sugárárány csökkenésével csökken, azonban, ha a gömbhéjakat tömegesen vizsgálták a nyomószilárdság a sugárárány csökkenésével egyenes arányosságban nőtt. Ennek magyarázata, hogy a gömbhéjak nem összeroppannak, hanem nyíródnak, amely esetben a gömbhéjak a hibákra kevésbé érzékenyek [13]. Még több következtetés vonható le abból, hogyha a gömbhéjakat a mátrix-anyaggal együtt vizsgáljuk. Lhuissier és kutatócsoportja vizsgálatokat végeztek acél gömbhéjakat tartalmazó fémhabokon [14]. Kimutatták, hogy azonos sűrűségű fémhaboknál nyomószilárdsági próba során a gömbhéjak mérete nem befolyásolja az eredményt. Mivel a vizsgált fémhabjaikban a gömbhéjak falvastagság-sugár aránya megegyezett, következtetésképpen levonható, hogy a fémhab sűrűsége határozza meg a hab nyomószilárdsági tulajdonságait és nem a gömbhéjak mérete.

Összefoglalásképp elmondható, hogy a kereskedelmi forgalomban szintaktikus fémhabok gyártására szánt számos anyagtípussal rendelkező gömbhéj található. A fent említett megfontolások alapján, valamint nagy alakváltozó képességük miatt választottuk a Globomet márkanevű vasgömbhéjakat.

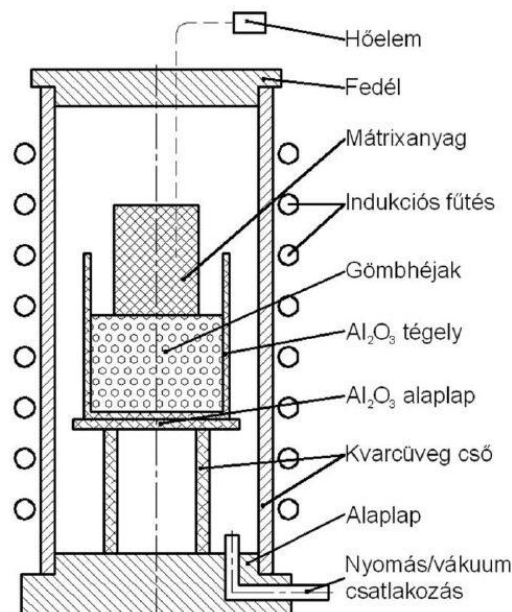
## **2.5. A szintaktikus fémhabok gyártási lehetőségei**

A szintaktikus fémhabokat több módszerrel, bekeveréssel, öntéssel, vagy (műszakilag igényesebb esetben) nyomásos infiltrálással állítják elő [15-18]. Ebben a fejezetben a főbb gyártási módszerek bemutatására kerül sor.

Az egyik legismertebb gyártási módszer a keveréses eljárás. Az eljárás során a mátrixanyagot indukciós hevítéssel grafit- vagy oxidkerámia tégelyben olvasztják meg. Az ömledéket gáztalanítják, majd általában mechanikus úton belekeverik az előmelegített mikrogömbhéjakat. Az előmelegítés korrigálja a mikrogömbhéjak apróbb sérüléseit és eltávolítja az esetleges szerves lerakódásokat a felületükről. Ezután a homogenizált keveréket formába öntik, és hagyják megszilárdulni. Az eljárásra példa Daoud [19] munkája. Daoud [19] ZnAl22-es mátrix-anyagú, nikkelbevonatos kerámia mikrogömbhéjakat tartalmazó szintaktikus fémhabot állított elő. Előmelegített grafit tégelyben megolvasztott 1 kg cinket és alumíniumot. Mikor a ZnAl22 ötvözet elérte a 600 °C-ot, beindította a keverési folyamatot. Ezután adagolta az ötvözetbe a különböző térfogat tartományú mikrogömbhéjakat, 600 fordulat/perc keverési sebesség mellett. A keverési folyamat 4 percig tartott. A keveréket 630 °C-on öntötte a vasöntőformába. Az eljárás után a keveréket 30 percig 400 °C-on villamos kemencében hőkezelt, majd vízbe helyezve hagyta kihűlni. A keveréses eljárás előnye, hogy a gömbhéjak térkitöltése pontosan beállítható. Hátránya, hogy a keverés során a gömbhéjak töredezhetnek, és hogy az eljárással nem lehet a maximális gömbhéj-térkitöltést és így maximális sűrűségcsökkentést elérni [2].

A másik legelterjedtebb eljárás a nyomásos infiltrálás, amelyet elsősorban nagy térkitöltésű szintaktikus fémhabok esetén alkalmaznak. Az eljárás során külső nyomást alkalmazva kényszerítik a mátrixanyagot, hogy a gömbhéjak közé hatoljon. Az eljárás előnye, hogy egy olvasztótégely segítségével gyakorlatilag bármilyen alumínium mátrixú szintaktikus fémhab előállítható, széles skálán változtatható térkitöltéssel, ezért nagyon univerzális. A szakirodalomban számos publikációban megjelenik ez a fajta eljárás. A következőkben ezen publikációk által mutatom be a nyomásos infiltráció több típusát.

Palmer és társai [20] 45 és 270 µm átmérőjű kerámia mikrogömbhéjakat ágyaztak Al1350, Al5083, Al6061 típusú alumínium mátrixba. Az infiltrációjukhoz használt berendezésük az 2.1. ábrán látható.

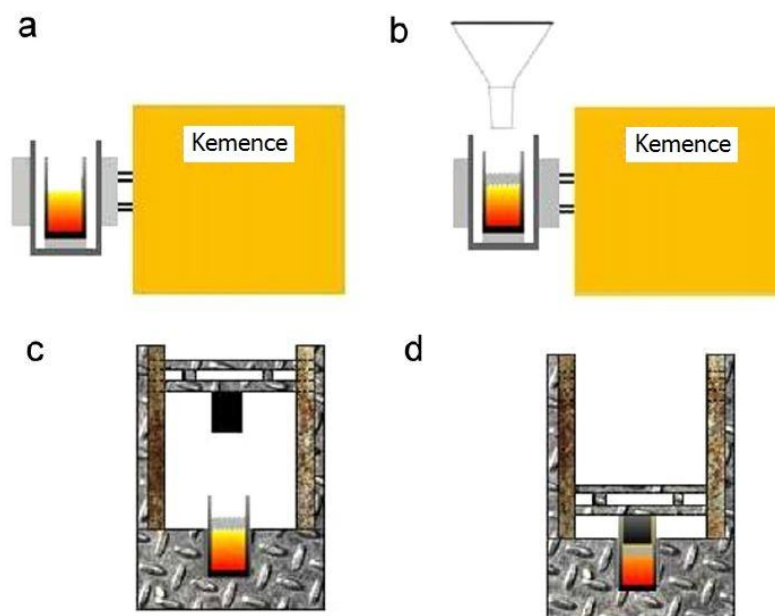


2.1. ábra Nyomásos infiltráló berendezés Palmer alapján [20]

A gömbhéjakkal töltött öntőformát zárható kamrába tették, majd a rendszert vákuum alá helyezve argon gázzal töltötték fel, ezzel biztosítva az oxigén hiányos hevítést. Ezután inert gáz segítségével hozták létre a 450 kPa-os infiltrációs nyomást. Az infiltráció során az egyik legnagyobb probléma, melyre nagy figyelmet kell fordítani a nem kívánt porozitásnak az elkerülése. A fémhab mechanikai tulajdonságait, szilárdsági minőségét nagymértékben rontja. Ennek a jelenségnek Palmer és társai szerint két fő okozója van. Az első az infiltrálás során összetört, kilyukadt gömbhéjából kiszabaduló gázok. A másik fő ok pedig az inert gáz nem teljes eltávozása a rendszerből az infiltráció befejeztével.

A nyomásos infiltrálásnak egy ritkábban alkalmazott változatát használták Castro és Nutt [21]. Kerámia mikrogömbhéjakat ágyaztak 0,5% szenet és 1,4% szilíciumot tartalmazó acél mátrix-anyagba. Az acél használata, mint mátrix-anyag nem szokványos, hisz a fémhab sűrűsége nagyobb lesz, mint ahogy alumíniumot használnánk. Ellenben az acél mátrixú szintaktikus fémhabok szilárdsági értékei jobbnak bizonyultak a könnyűfém mátrixú változatokénál, valamint nagyobb mechanikai energia elnyelésére is képesek. A szakirodalomban nagyon kevés acél mátrixú habbal foglalkozó cikk található, melyet leginkább a gyártási nehézségek indokolnak, hisz az acél rosszul nedvesíti a kerámia gömbhéjakat, ezáltal közös rendszerük létrehozásához sok kulcs paraméter pontos kontrollálása szükséges. Castro és Nutt munkája viszont sikeresnek bizonyult. Gyártási folyamatuk első lépéseként olvasztótégelyben megolvasztottak 580 g acélt. Mikor az acél teljesen megolvadt, az olvadék felszínére adagolták a mikrogömbhéjakat. A nagy felhajtóerő

miatt a gömbhéjak a felszínen maradtak. Az infiltrációt megelőzően 3 percig hagyták hevülni a gömbhéjakat, mely az infiltráció minőségének javítása érdekében történt. Az infiltrációhoz szükséges nyomást egy felülről érkező 600 °C-ra előmelegített grafit dugattyúval hozták létre. A dugattyú sebességének megválasztása kiemelkedően fontos volt a nem kívánt porozitás megelőzésének szempontjából. A dugattyú először kis sebességgel szorította ki a nem kívánt levegőt a tégelyből, majd ezután hirtelen sebességváltoztatással hozták létre a 0,5 MPa-os nyomást, mellyel megtörtént az infiltrációs folyamat. Gyártási folyamatuk a 2.2. ábrán látható.



**2.2. ábra** Nyomásos infiltráló berendezés Castro és Nutt alapján, Infiltrációs folyamat: (a) olvasztás, (b) mikrogömbhéjak hozzáadása, (c) infiltráció kezdete, (d) infiltráció befejezése [21]

Egy harmadik lehetőség az infiltrációs folyamat megvalósítására a Rabiei és O'Neill [22] által alkalmazott gravitációs eljárás. Az infiltráláshoz szükséges nyomást ebben az esetben a megolvasztott mátrixanyag súlyából eredő statikus nyomás szolgáltatja. A megvalósítható infiltrálási nyomást csak az ömledék oszlop magassága korlátozza [2].

Összefoglalásképpen megállapíthatjuk, hogy a szakirodalomban számos gyártási mód került feldolgozásra, amelyek közül kedvező tulajdonságaik miatt csak a keveréses eljárás és a nyomásos infiltrálás terjedt el. A fenti megfontolások alapján saját szintaktikus fémhabjaink előállításához szintén a nyomásos infiltrálás módszerét választottuk. Saját gyártási folyamatunk és berendezésünk részletes bemutatására az 5.2-es fejezetben kerül sor.

## 2.6. A szintaktikus fémhabok alkalmazási lehetőségei

Alkalmazásukat az ipari gyakorlatban, elsősorban a növekvő terhelések nyomán fellépő megnövekedett mechanikai igénybevételek és kis sűrűségük szorgalmazzák. Alkalmazásuk mellett szólnak további előnyös tulajdonságaik is, mint például a láng- és hőállóság (tűzvédelem, kis hőtágulási együttható, kúszásállóság), kémiai stabilitás, nagy szerkezeti merevség (tartószerkezetek, szendvicspanelek, szelvények mechanikai stabilitásának növelése), a cellás szerkezetből adódó nagy mechanikai energiaelnyelés (ütközők, lökhárítók), zaj- és rezgéscsillapítás (rezgéscsillapító szerkezetek, zajvédelem), radarhullámok elnyelése, illetve szórása. Mivel a szintaktikus habok mátrixa fém, erősítőanyaga pedig fém, vagy kerámia, a termikus stabilitásuk és kémiai stabilitásuk jónak mondható. Az alkalmazott könnyűfémek olvadáspontja a polimer habok degradációs hőmérsékleténél nagyobb, korrózióállóságuk pedig kitűnő. Ezért nagyobb hőmérsékleten, nedves vagy korrozív környezetben üzemeltetve is megbízhatóak [2].

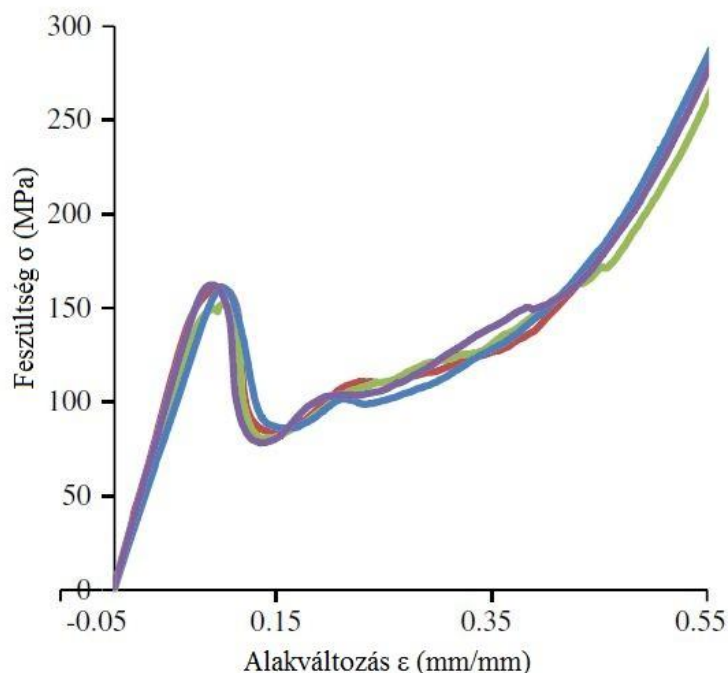
Az alumínium mátrixú fémhabok trendjétől eltér a titán mátrixú fémhabok alkalmazása. Titán mátrixú szintaktikus fémhabokat csak speciális esetben gyártanak. Mivel a titán egyéni tulajdonságai közé tartozik biokompatibilitás és a kitűnő korrózióállóság, szintaktikus fémhab változata is új megoldásokat nyújthat [7].

A szintaktikus fémhabok nem utolsó sorban innovatív lehetőségeket nyújtanak a repülőgépek, illetve a tengeri járművek tömegének csökkentése, hiszen ez által növelhető a jármű befogadóképessége, raktere. [2, 6, 23].

## 2.7. Szintaktikus fémhabok nyomószilárdsági vizsgálatai

A szintaktikus fémhabok legfontosabb tulajdonsága a mechanikai energiaelnyelés, legjellemzőbb igénybevételük a nyomás. Az előző alfejezetben láthattuk, hogy a legtöbb alkalmazás is erre épít. A nyomó igénybevétel fontossága miatt a leggyakrabban alkalmazott vizsgálati módszer a nyomóvizsgálat [2]. Ebben a fejezetben a szakirodalomban publikált kvázistatikus nyomóvizsgálatokkal foglalkozó munkák eredményeit ismertetjük.

A próbatestek összenyomódása alatt elnyelt mechanikai energiát a feszültség-alakváltozás diagramról olvashatjuk le. A 2.3. ábrán egy tipikus nyomógörbe látható.

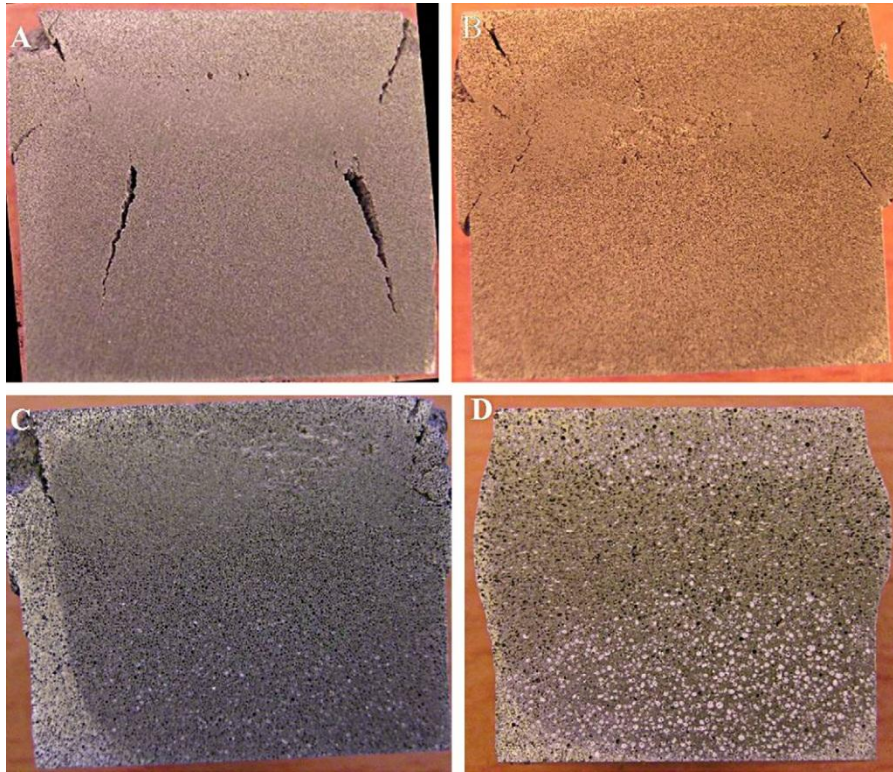


**2.3. ábra** Al365/SiC fémhab kvázistatikus nyomógörbéje Luong és társai [6] alapján

A nyomógörbe alatti terület arányos a nyomóvizsgálat során elnyelt mechanikai energiával. A diagramok jellege elsősorban a teljes porozitástól, illetve a gömbhéjak és a mátrixanyag tulajdonságaitól függ.

Tao és Zhao [24] alumínium mátrixú, kerámia mikrogömbhéj erősítésű szintaktikus fémhabokon végeztek nyomószilárdsági tesztek. Mivel a szintaktikus fémhabjuk gyártási módjaként ők is a nyomásos infiltrálást választották, kiváló alapot ad összehasonlításra, hisz mi is ezzel az előállítási móddal dolgoztunk. Szakító, nyíró és nyomószilárdsági vizsgálatokat végeztek, melyek közül minket jelenleg csak a nyomószilárdsági eredmények érdekelnek. Mátrixanyagként Al 6082 típusú alumínium ötvözetet választottak. Kerámia mikrogömbhéjaik összetétele ~60%  $\text{SiO}_2$ , ~40%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  és 0.4 – 0.5%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  tömegszázalékban megadva. Kétféle, belül szivacsos, illetve porózus szerkezetű mikrogömbhéjakkal dolgoztak, melyek átlagos sűrűsége  $0,6 \text{ g/cm}^3$ . Mikrogömbhéjaik mérete a 20-500  $\mu\text{m}$ -es tartományba esik. Négy különböző szintaktikus fémhabot állítottak elő, melyek különböző mechanikai tulajdonságokkal rendelkeztek. Fémhabjuk 60 térf.% kerámia mikrogömbhéjat és 40 térf.% Al 6082 mátrix-anyagot tartalmazott. A kvázistatikus nyomóvizsgálataikhoz mind a 4 típusú fémhabból 3-3 mintadarabot vizsgáltak. Próbatesteik átmérője 21 mm volt. A vizsgálatok után kimutatták, hogy a kerámia mikrogömbhéjakat tartalmazó szintaktikus fémhaboknak két fő tönkremeneteli módja van: képlékeny deformáció által, vagy merev törés, melyet képlékeny deformáció előz meg. A kerámia

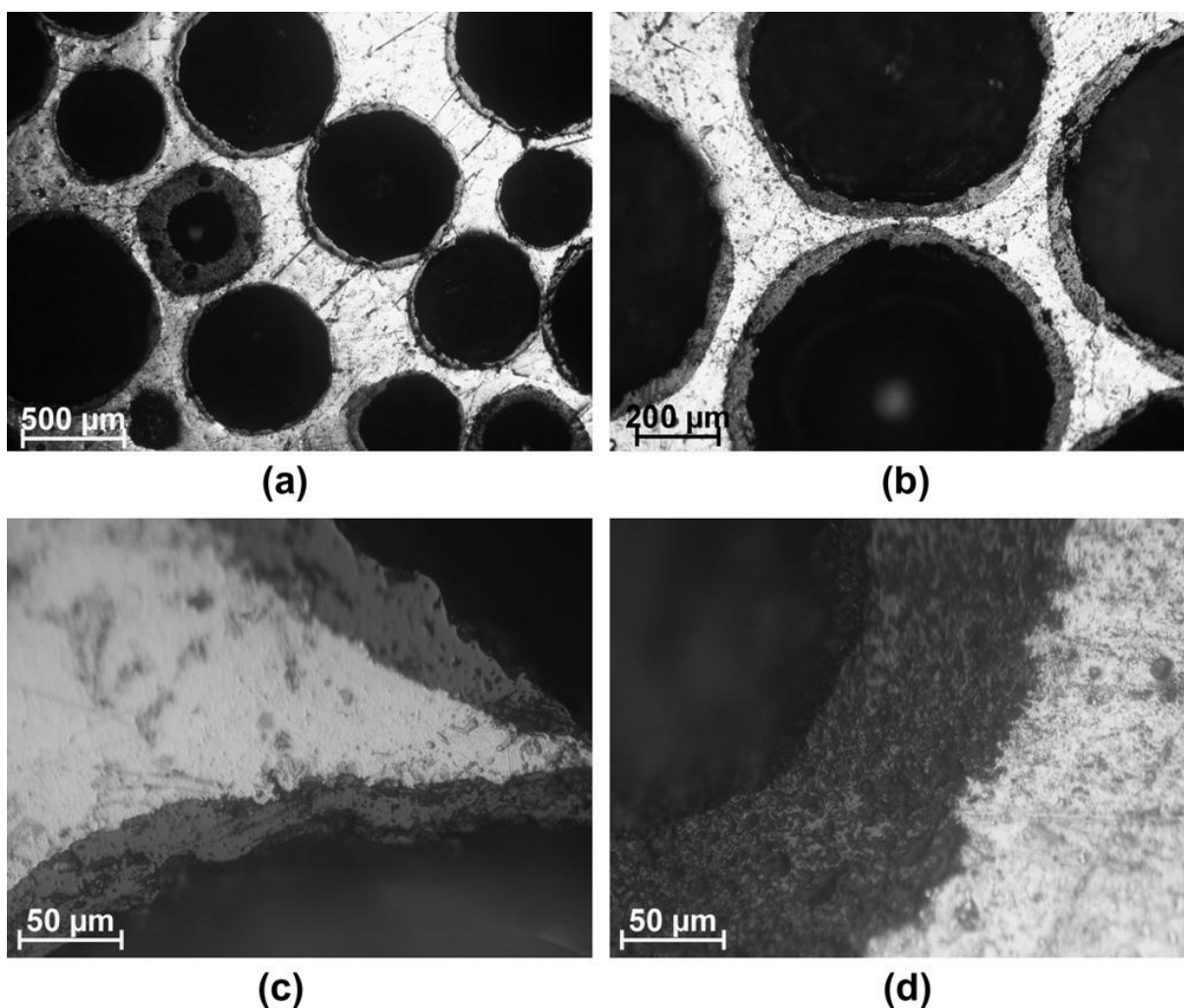
mikrogömbhéjakat tartalmazó szintaktikus fémhab kvázistatikus nyomóvizsgálati tesztjei után kimutatható, hogy a nyomófeszültség hatására egyes próbatesteikben repedések, hasadások jelentek meg (2.4. ábra).



**2.4. ábra** Hosszmetszeti makrofelvételek Thao és Zhao alapján - Al 6082 mátrixú szintaktikus fémhab, A-B) nagyobb szilárdságú C-D) alacsonyabb szilárdságú kerámia gömbhéjat tartalmaz [24]

A gyengébb tulajdonságokkal rendelkező mintadarabokon nem figyelhető meg repedés, mert itt a tönkremenetel folyamatos. A két viselkedés azzal magyarázható, hogy a jobb szilárdsági értékekkel rendelkező típusok jobban hajlamosak rideg törésre, míg a gyengébb típusoknál rugalmas deformáció figyelhető meg. Tesztjeik során kimutatták, hogy a jobb szilárdsági tulajdonságokkal rendelkező fémhabok 120-130 MPa, illetve a gyengébb típusok 50-75 MPa nyomószilárdsággal rendelkeznek.

Luong és társai munkájuk során A356 ötvezetű [25] mátrix-anyagba ágyazott SiC kerámia mikrogömbhéj [26] erősítésű szintaktikus fémhabot vizsgáltak. A szakirodalomban ez a fajta szintaktikus fémhab az egyik leggyakrabban vizsgált típus. Gömbhéjaik szerkezete belül üres, átmérőjük 1 mm, falvastagságuk 70  $\mu\text{m}$ . Fémhabjukat nyomásos infiltrálással állították elő, melynek mért sűrűsége 1,8  $\text{g/cm}^3$ .



**2.5. ábra** A365-ös mátrixú, SiC gömbhéj erősítésű fémhabról, optikai mikroszkóppal készített mikrofelveletek. a,b) részecske eloszlás a kompozitban, c,d) mátrix-gömbhéj kapcsolat [6]

A 2.5. ábrán optikai mikroszkóppal készített metallográfiai felvételeik láthatóak az előállított fémhabról. A felnagyított felvételeken megfigyelhető a mátrix és a gömbhéjak között létrejött átmeneti réteg. A szintaktikus fémhabokban ennek a rétegnek a kialakulása kiemelkedő fontosságú, hisz a megfelelő nedvesítés létrejöttének hiányában nem állítható elő a megfelelő minőségű szintaktikus fémhab. Viszont Luong és társai felvételein kitűnő kapcsolat figyelhető meg a mátrix és a gömbhéjak között, melynek eredménye az erős mechanika kapcsolat, valamint a megfelelően nagy adhéziós erők létrejötte.

Az optikai felvételek elkészítése után, a mintadarabokat kvázistatikus nyomóvizsgálatnak vetették alá. Hengeres próbatestek átmérője 10 mm, magasságuk 5 mm volt. A nem kívánt sűrűlődést az érintkező felületek közé bevitt kenőanyag hozzáadásával oldották meg. Nyomóvizsgálatuk során 5 darab próbatestet vizsgáltak. A nyomóvizsgálat során elért eredményeiket az 2.3. ábra és az 2.1. táblázat foglalja össze.

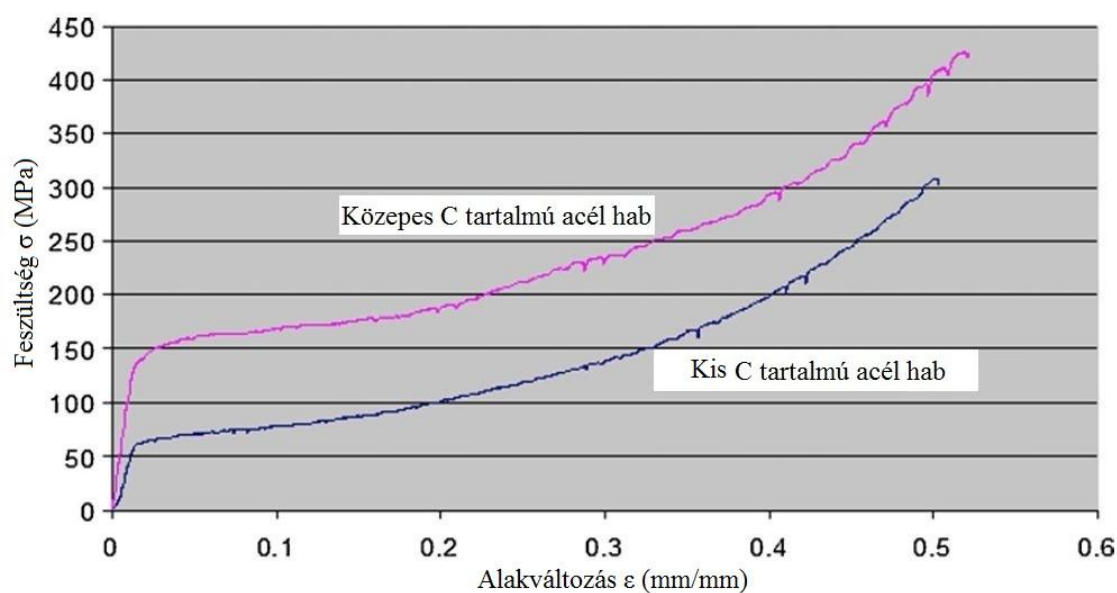
**2.1. táblázat** A356/SiC fémhabon végzet kvázistatikus nyomóvizsgálat eredményei [6]

| <b>Minta sorszáma</b> | <b>Modulus (GPa)</b> | <b>Nyomószilárdság (MPa)</b> | <b>Platófeszültség (MPa)</b> |
|-----------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1                     | 2,08                 | 161                          | 107                          |
| 2                     | 1,85                 | 152                          | 111                          |
| 3                     | 1,71                 | 161                          | 102                          |
| 4                     | 2,02                 | 162                          | 105                          |
| 5                     | 2,10                 | 181                          | 126                          |

A 2.3. ábráról leolvasható, hogy az Al356-os mátrixú, SiC gömbhéjakat tartalmazó szintaktikus fémhab átlagos nyomószilárdsága 163 MPa, az átlagos platófeszültség 110 MPa. Az ábrán megfigyelhető a szintaktikus fémhabokra általánosan jellemző előnyös karakterisztika. A megfigyelhető nagymértékű alakváltozás nagy mennyiségű mechanikai energiaelnyelést tesz lehetővé.

Nyomószilárdsági vizsgálataikon túl Luong és társai [6] bizonyítottak egy általános trendet, miszerint egy szintaktikus fémhab nyomószilárdsága annál nagyobb, minél nagyobb az adott hab sűrűsége. A legtöbb alumínium-, titán- és vasötvözetre teljesül ez az állítás. Példaképp a magnézium ötvözetek és az A365-os alumínium ötvözet a kivételek közé tartozik. A SiC mikrogömbhéjak használatával elérték, hogy olyan szintaktikus fémhabot hozzanak létre, melynek sűrűsége kisebb, viszont mechanikai tulajdonságai előnyösebbek, mint a jelenleg létező szintaktikus fémhaboké.

Castro és Nutt [21] is kvázistatikus nyomóvizsgálatot végeztek az előállított próbatesteiken. A zömítési sebesség a teszt során 1 mm/perc volt. Négyzetes hasáb alakú mintadarabjaik oldalhosszúsága 8,38 mm, magasságuk 11,68 mm volt. Nyomóvizsgálatuk eredménye a 2.6. ábrán látható.



2.6. ábra Acél mátrixú szintaktikus hab nyomógörbéi Castro és Nutt alapján [21]

Az ábrán megfigyelhetők a szintaktikus fémhabokra jellemző nyomógörbe jellegzetes szakaszai. Az első szakasz lineáris rugalmas deformáció melyet egy olyan szakasz követ, ahol a görbe meredeksége közelít zéróhoz. Az ennél a szakasznál leolvasott feszültségértéket nevezzük nyomószilárdságnak. Ezután következik a plató szakasz, melynél a gömbhéjak fala meghajlik és maguk a gömbhéjak fokozatosan tönkremennek. Az ideális energiaelnyelő anyagnál ez a görbe szakasz tökéletesen nulla meredekséggel rendelkezne, de a fémhaboknál, mint láthatjuk, az értékek enyhén növekednek. Miután az összes gömbhéj tönkrement, a görbe hirtelen megugrik (a porózus anyag feltömörödik)[2].

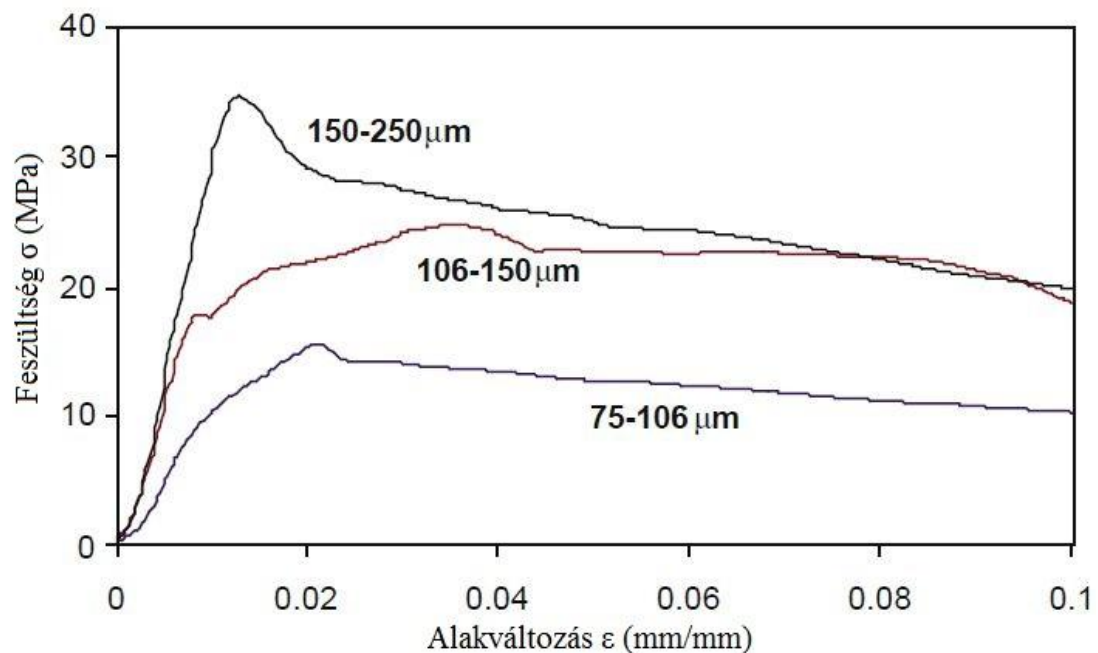
Egy szintaktikus fémhab nyomószilárdsága nagyban függ a hab sűrűségétől és a mátrix-anyag egyezményes folyáshatárától. Ez meg is mutatkozik az 2.4. ábrán feltüntetett két hab típusnál. A szén mennyiségének növelése a mátrixanyagban nagyobb nyomószilárdsággal rendelkező szintaktikus fémhabot eredményez.

Nagyobb sűrűség esetén a fémhab mechanikai energiaelnyelő tulajdonsága is nagymértékben javul. Castro és Nutt [21] vizsgálatai szerint 50 százalékos alakváltozásnál az kis széntartalmú acél hab  $69,45 \text{ MJ/m}^3$  energiát képes elnyelni, addig a nagyobb sűrűségű közepes széntartalmú acél-mátrixszal rendelkező majdnem kétszer ennyi,  $122,68 \text{ MJ/m}^3$  energia elnyelésére képes. A Ruan és társai által vizsgált alumínium mátrixú nem szintaktikus (hagyományos) fémhab  $2,6 \text{ MJ/m}^3$  elnyelésére képes 50%-os alakváltozásnál [27], melyet Castro és Nutt eredményeivel összehasonlítva tisztán látszik, hogy ez az érték meg sem közelíti a szintaktikus fémhabbal elért energiaelnyelési értéket.

Vizsgálataik után következtetésképpen levonták, hogy a szintaktikus fémhabok szilárdsági tulajdonságaik sokkal magasabb értékűek a hagyományos fémhabokhoz viszonyítva, ezáltal alkalmazásuk nagymértékben indokolt.

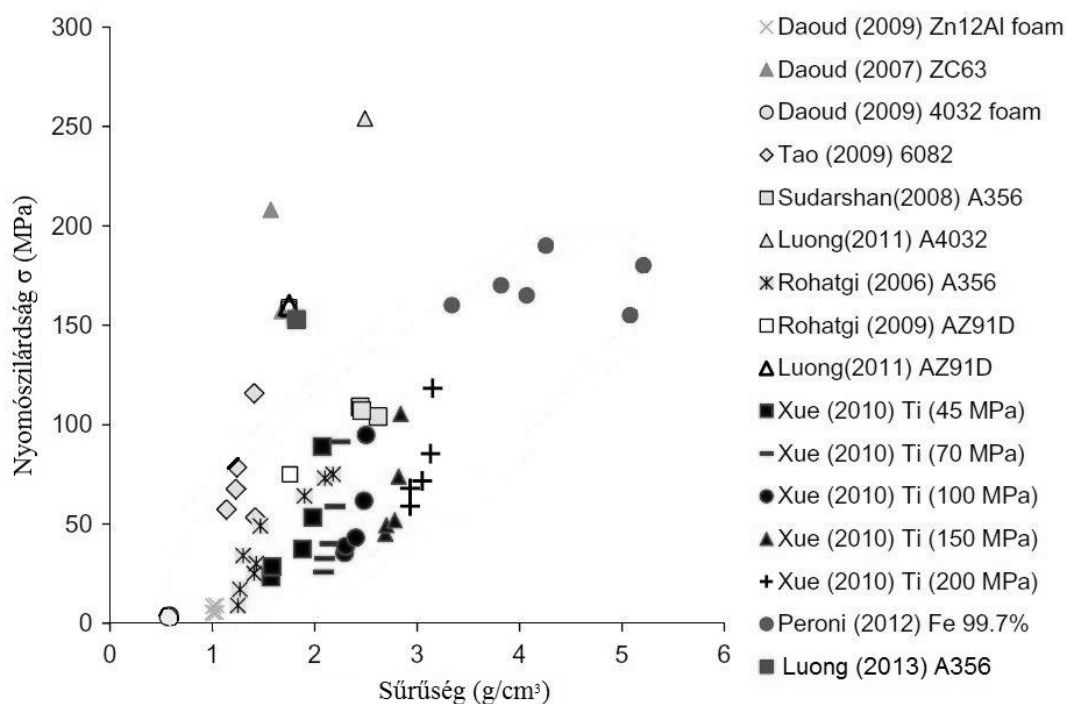
Ugyancsak nyomóvizsgálatot végeztek Rohatgi és társai is [28] nyomásos infiltrálással előállított szintaktikus fémhabokon. A mátrixanyag ~6,5-7,5 t% Si-tartalmú alumíniumötvözet (A356) volt. Ezen ötvözet előnyös tulajdonságai közé tartozik a jó korrózióállóság és a kitűnő hegeszthetőség. Fémhabjaik előállításához kerámia mikrogömbhéjakat használtak.

A mechanikai vizsgálatok azt mutatták, hogy a mikrogömbhéjak méretének növelésével az infiltráció mértéke javult, vagyis a gömbhéjak közötti, nemkívánt porozitás csökkent. Hasonló hatást figyeltek meg az infiltrálási nyomáskülönbség növelésekor is. Az infiltrálási nyomást 140 kPa-ról 250 kPa-ra növelve a nemkívánt porozitás mértéke ~50%-kal csökkent. A hőmérséklet változtatásával kapcsolatban megállapították, hogy a növelt hőmérsékletű olvadék kisebb teljes porozitást eredményezett a munkadarabokban, mivel a hőmérséklet növelésével az olvadék viszkozitása valószínűleg csökkent, így könnyebben hatolt be a mikrogömbhéjak közötti kis üregek-be. A nemkívánt porozitás csökkenésével a platófeszültség, a nyomószilárdság és a rugalmassági modulus is értelemszerűen nőtt. A mikrogömbhéjak térkitöltését növelve az alakváltozási tartomány (a platós szakasz) hossza növelhető volt és így nőtt a mechanikai energiaelnyelés is [2].



2.7. ábra Alakváltozás-feszültség diagramok Rohatgi és társai [28] alapján

A mikrogömbhéjak méretének növelése az infiltráció mértékének javulását idézi elő, viszont a 2.7. ábrán megfigyelhető, hogy egyidejűleg a fémhab mechanikai energiaelnyelő képességét rontja. Az ábráról leolvasható, hogy a 150-250  $\mu\text{m}$  mérettartományú mikrogömbhéjakkal rendelkező fémhab kétszer akkora mechanikai energia elnyelésére képes, mint a 75-106  $\mu\text{m}$  méretű gömbhéjjal rendelkező típus.



**2.8. ábra** Alumínium, magnézium, titán és vas mátrixú szintaktikus fémhabok szilárdsági tulajdonságainak az összehasonlítása [6]

A 2.8. ábrán számos kutató szintaktikus fémhabokon elvégzett szilárdsági vizsgálatainak eredményei láthatóak összefoglalva. Az egyes fémhabok különböző mátrix-anyagokkal és gömbhéjakkal rendelkeztek. Az ábra bizonyítja azt az állítást, hogy a fémhabok tulajdonságait a mátrix-anyag, a gömbhéjak és a gyártástechnológiák változtatásával széles skálán tudjuk változtatni.

Összefoglalásul megállapítható, hogy a kvázistatikus nyomóvizsgálat a fémhabok legalapvetőbb vizsgálatai közé tartozik. A múltban számos publikáció foglalkozik e vizsgálat tanulmányozásával, azonban összehasonlításuk nehézkes, mivel gyártástechnológiák az egyes kutatók munkái során különbözőek, illetve a mérési paraméterek is elég széles skálán térnek el egymástól.

### 3. Célkitűzés

Az előzőekben részletezett szakirodalmi publikációk során és alapján a következő célkitűzéseket fogalmaztuk meg.

1. Kísérletekkel igazolni, hogy a kisnyomású infiltráció alkalmas alumínium mátrixú, vasgömbhéjakkal erősített szintaktikus fémhabok előállítására.

2. Különböző mátrixanyagú szintaktikus fémhabok előállítása olyan mennyiségben, hogy statisztikailag értelmezhető és értékelhető mintához jussunk.

3. Az előállított kompozitok mikroszerkezeti vizsgálata, különös tekintettel az erősítőanyag és a mátrixanyag közötti átmeneti rétegre, amely a kompozitban a teherátadásért felelős.

4. Kvázistatikus nyomóvizsgálatokkal felderíteni az előállított kompozitok mechanikai tulajdonságait, különös tekintettel a nyomószilárdságra, törési alakváltozásra és az alakváltozás során elnyelt mechanikai munkára.

A következő fejezetekben ezeknek a célkitűzéseknek a megvalósítását, eredményeit mutatjuk be.

## 4. Felhasznált anyagok és berendezések

A következőkben a szintaktikus fémhabok gyártásához és vizsgálatához felhasznált anyagokat és gépeket fogjuk ismertetni.

### 4.1. A fémhabgyártáshoz felhasznált alapanyagok

A szintaktikus fémhabok két alkotóelemből állnak, a mátrixból és az erősítőanyagból. A munkánk során 4 különböző mátrixanyagból gyártottunk fémhabot, technikai tisztaságú alumíniumból (Al99,5), AlSi12-ből, AlMgSi1-ből és AlCu5-ből. Ezek kémiai összetételét ellenőriztük, energia-diszperzív röntgen analízissel, aminek az eredménye az 4.1. táblázatban látható.

**4.1. táblázat** A mátrixanyagok energia-diszperzív röntgen analízis szerinti összetétele

| Mátrix | Al99,5-GM | AlSi12-GM | AlMgSi1-GM | AlCu5-GM |
|--------|-----------|-----------|------------|----------|
| Elem   | (t%)      |           |            |          |
| Al     | 99,5      | 86,0      | 97,0       | 95,0     |
| Si     | 0,1       | 12,8      | 1,1        | -        |
| Fe     | 0,1       | 0,1       | 0,5        | -        |
| Mg     | -         | 0,1       | 1,1        | -        |
| Cu     | -         | -         | -          | 4,5      |
| Egyéb  | 0,3       | 1,0       | 0,3        | 0,5      |

A fémhabjaink erősítéséhez a Hollomet nevű cég által gyártott Globomet márkajelzésű vas gömbhéjat használtunk. Az erősítőanyag főbb tulajdonságai az összetétel, a jellemző geometria, és a sűrűség. Ezeket a gyártó közölte, de az értékeket mi is ellenőriztük saját mérésekkel, aminek az eredményét később ismertetjük részletesen.

### 4.2. A gyártásnál használt berendezések

A gyártás során használtuk a Power Trak 15-96 típusú indukciós kemencét a mátrixanyag megolvasztásához, egy Lindberg/BlueM típusú kemencét a gömbhéjak, és az öntőforma előmelegítéséhez, és egy sajátkészítésű öntőformát, amit később részletesen ismertetünk.

### **4.3. A vizsgálatokhoz használt berendezések**

Az gyártott fémhabokat széleskörű vizsgálatoknak vetettük alá. A metallográfiai vizsgálatok előkészítésénél használtuk a Jean Wirtz típusú csiszológépet az előzetes, durva csiszoláshoz, egy Buehler gyártmányú, Power Head típusú polírozógépet a finomcsiszoláshoz és a polírozáshoz. A vizsgálatokhoz Olympus PMG3 típusú fénymikroszkópot, Nikon sztereomikroszkópot, és Philips XL30 típusú pásztázó elektronmikroszkópot használtunk. A mechanikai vizsgálatainkhoz a MTS 810 típusú hidraulikus, univerzális anyagvizsgáló gépet használtuk. A nyomóvizsgálatokat hengeres próbatesteken végeztük, ezek méretei, valamint a vizsgálati paraméterek a későbbiekben kerülnek bemutatásra.

## 5. Kísérleti munka

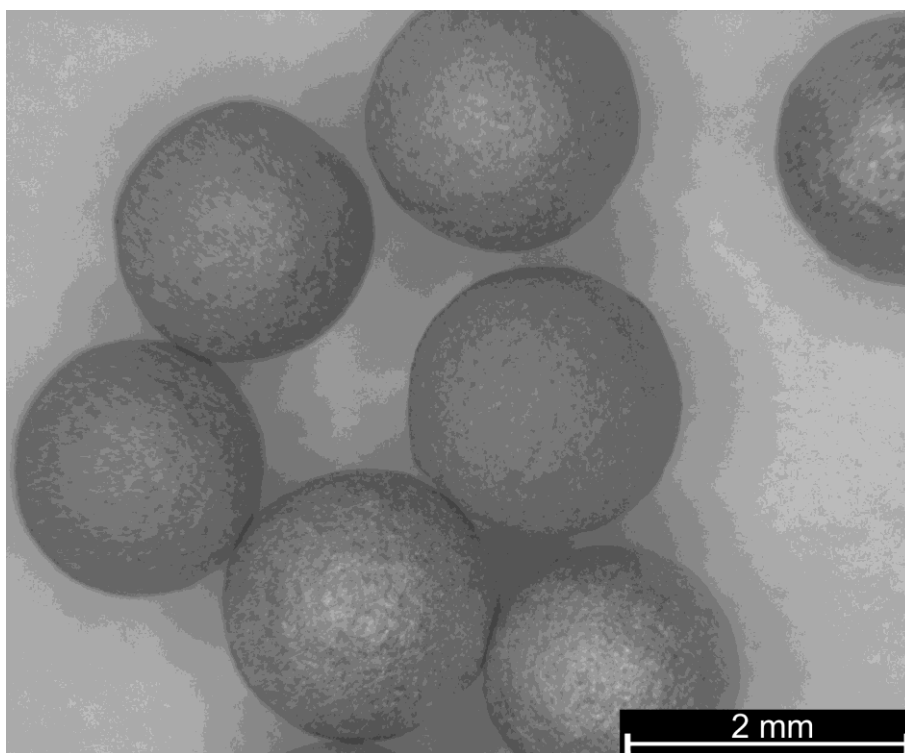
Ebben a fejezetben az általunk elvégzett kísérleteket részletezzük.

### 5.1. Az erősítőanyag vizsgálata

Mielőtt a gyártási kísérleteke megkezdjük volna, szükségesnek tartottuk jobban megismerni az általunk felhasznált anyagok tulajdonságait, és egyben ellenőrizni a gyártó által közzétett adatokat, ezért a gömbhéjakat átfogóan elemeztük, amit ebben a fejezetben részletezünk.

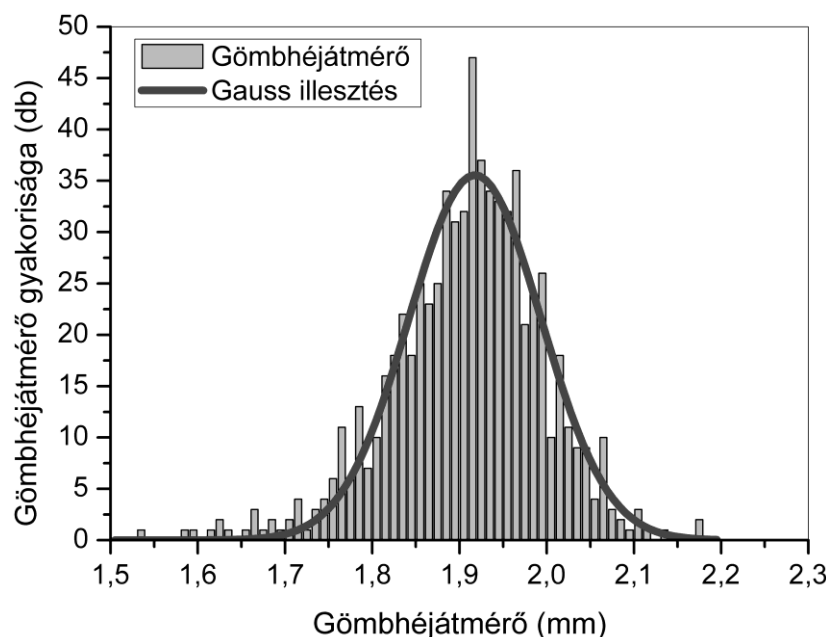
#### 5.1.1. A gömbhéjak jellemző méretének meghatározása

Az átlagos átmérő meghatározásához 700 darab gömbhéj átmérőjét mértük meg. Az átmérők megméréséhez a fénymikroszkóp képét számítógép segítségével megjelenítettük (5.1. ábra), és egy hossz mérésre szolgáló szoftver segítségével kaptuk meg az átmérők értékét.



5.1. ábra A gömbhéjakról készült fénymikroszkópos felvétel

A kapott méreteloszlására egy Gauss görbét illesztettünk százados felosztással, amit a 5.2. ábra szemléltet.



5.2. ábra A gömbhéjak méreteloszlására illesztett Gauss görbe

Az ábrán jól látszik, hogy a görbe jól illeszkedik, és az ábráról leolvasható jellemző átlagos gömbhéj átmérő értéke 1,918 mm, míg az átmérő szórása 0,076 mm. Ezek az értékek nem egyeznek meg a gyártó által megadott értékkel (1,4 - 1,8 mm). Az illesztett Gauss harang viszonylag széles, ami alátámasztja a számított szórásértékeket.

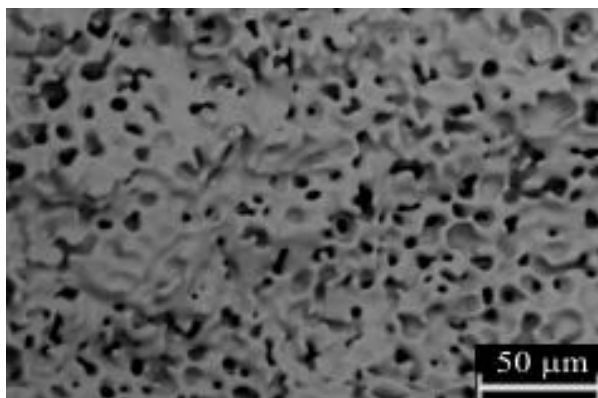
### 5.1.2. A gömbhéjak sűrűségének meghatározása

A gömbhéjak sűrűségének a megméréséhez először ki kellett szűrni a lyukasfalú gömbhéjakat. Ehhez alkoholba merítettük őket és a felszínen fennmaradt gömbhéjakat leföldröttük. Ezek után a gömbhéjak sűrűségét Arkhimédész törvénye segítségével megmértük. A gömbhéjak sűrűsége  $0,393 \text{ g/cm}^3$ -nek adódott. Az általunk mért érték ez esetben jól közelíti a gyártó által megadottat.

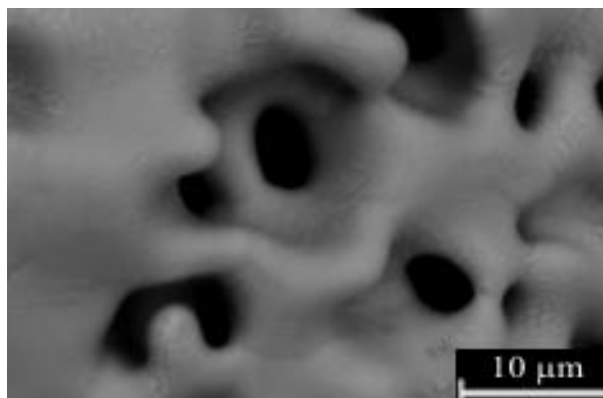
### 5.1.3. A gömbhéjak felületi morfológiájának vizsgálata

A kompozitokban a mátrixanyag és az erősítőanyag között a terhelést az interfész, egy átmeneti réteg adja át, aminek a minősége nagyban függ az erősítőanyag felületétől, ezért pásztázó elektronmikroszkóppal (Scanning Electron Microscope, SEM) is megvizsgáltuk a kísérletek során használt gömbhéjak felületét. A SEM-nél 20 kV-os gyorsítófeszültséget, és visszaszórt elektron (Back Scattered Electron, BSE) detektort alkalmaztunk. A SEM felvételeken (5.3. ábra és 5.4. ábra) jól látszik a gömbhéj falának szivacsossága, ami nagy

felületének köszönhetően várhatóan kitűnő kapcsolatot létesít, a mátrixanyag és a gömbhéj között.



**5.3. ábra** A gömbhéj faláról készült SEM felvétel BSE detektorral



**5.4. ábra** A gömbhéj faláról készült SEM felvétel BSE detektorral nagyobb nagyításnál

## 5.2. A szintaktikus fémhabok gyártása

A fémhabok gyártásának több módja is lehetséges (bekeveréses módszer, nyomásos infiltráció, porkohászati eljárás stb.). Első lépésként mi többet is kipróbáltunk Al99,5 mátrixszal, hogy ki tudjuk választani azt, amelyik megfelelő minőségű és reprodukálható minták gyártására ad lehetőséget a későbbi vizsgálatainkhoz.

### 5.2.1. Szintaktikus fémhabgyártás kézi bekeveréses módszerrel

Elsőnek a kézi bekeveréssel próbáltunk meg fémhabot gyártani, mert egyszerű, gyors, és nem igényel hosszú előkészületet. A folyamat során egy hőálló formába öntöttünk gömbhéjakat, majd különböző előmelegítési hőmérsékleten, 20, 200, 400, 600°C-on beleöntöttük a ~700 Celsius fokos alumíniumot, majd kézi keveréssel elegyítettük.



**5.5. ábra** Bekeveréssel előállított fémhab makrofotója

Ahogy az 5.5. ábra mutatja, a gömbhéjak a kisebb sűrűség miatt nem merültek el, a fémömladék felszíne közelében maradtak. Ezért ez a gyártási mód egyik előmelegítési hőfokon sem nyújtott megfelelő minőségű habok gyártására lehetőséget, emellett a minták reprodukálhatósága sem megoldott, ezért ezt a módszert elvetettük.

### **5.2.2. Szintaktikus fémhabgyártás gravitációs öntéssel**

Ezután a gravitációs öntést vizsgáltuk. Egy grafit öntőformát kettéosztottuk felül  $\text{Al}_2\text{O}_3$  lemezzel, alul pedig fémhálóval. Az utóbbi, egy félig áteresztő hártaként funkcionál, az ömladékot átengedte, de a gömbhéjakat nem. A forma egyik oldalát feltöltöttük gömbhéjakkal, és felül leszorítottuk őket egy ráccsal, a másik oldalon pedig beleöntöttük a  $\sim 700^\circ\text{C}$ -os alumíniumot. Ezt a kísérletet is több különböző előmelegítési hőmérsékleten végeztük el, 20, 200, 400,  $600^\circ\text{C}$ -on. A kísérlet során azt tapasztaltuk, hogy az alumínium ömladék nem képes arra egyik hőmérsékleten sem, hogy a hálón megfelelő mennyiségben átfolyjon. Ezért ez a gyártási folyamat bár viszonylag jó reprodukálhatóságot biztosít, de nem képes használható mennyiségű fémhab gyártására.

### **5.2.3. Szintaktikus fémhabgyártás közepes nyomású infiltrálással**

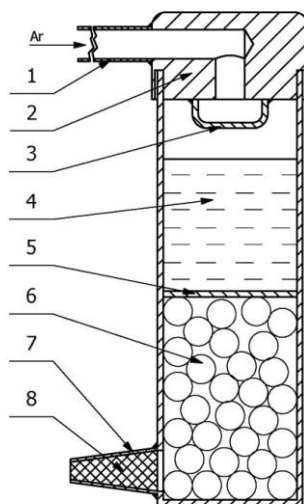
A közepes nyomású infiltrálásnál ugyanazokat a paramétereket alkalmaztuk, mint korábban kerámia gömbhéj erősítésű fémhaboknál [2]. Az így előállított mintáinkban a gömbhéjak csaknem mindegyike telítődött mátrixanyaggal, ami az 5.6. ábrán látható. Mivel a darabok teljesen elvesztették hab jellegüket ez a megoldás nem alkalmas fém gömbhéjakkal erősített szintaktikus fémhabok előállítására. Valószínűleg megoldást jelenthetne a problémára vastagabb falú fémgömbhéjak alkalmazása.



5.6. ábra A közepes nyomású infiltrálással készült próbatest

#### 5.2.4. Szintaktikus fémhabgyártás kisnyomású infiltrálással

Az általunk jónak vélt és használt módszer a kisnyomású infiltrálás volt. Ehhez készítettünk egy saját öntőformát, amit az 5.7. ábra szemléltet.



5.7. ábra A kisnyomású infiltráláshoz készített berendezés sematikus ábrája

Jelölések: 1. gázbevezetés, 2. zárófedél, 3. gázterelő lemez, 4. ömledék,  
5. fémháló, 6. gömbhéjak, 7. kipufogó, 8.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  paplan

Az öntőforma elkészítéséhez egy 40×50 mm-es keresztmetszetű zártszelvény (belső mérete ~35×45 mm) darabot használtunk fel, aminek az alját behegesztettük, az oldalát kifúrattuk, és a lyukba egy csövet hegesztettünk (7). Az így kapott darab belsejét grafit-spray-

el kigrafitoztuk, hogy a gyártás során az alumínium ne lépjen reakcióba a szelvény falával, és hogy a gyártási folyamat végén a minta könnyebben eltávolítható legyen. A csövet megtöltöttük alumínium oxid paplannal (8), majd a végét összeroppantottuk, hogy a nyomásnak ellenálljon. A szelvény oldalára hegesztettünk egy fémlapot is, hogy a gyártás során, felhevült állapotban könnyebben mozgatható legyen. Ezek után a formát félig megtöltöttük gömbhéjakkal (6), kézi ütögetéssel tömörítettük, majd leszorítottuk egy fémráccsal (5), különben a sűrűségkülönbség miatt ugyanaz a jelenség játszódna le, mint a kézi bekeveréses módszernél. Ezek után a formát megfelelő hőmérsékletre melegítettük elő, majd a  $\sim 700^{\circ}\text{C}$ -os ömledékkal (4) feltöltöttük az öntőformát, és lezártuk a zárófedéllel (2), ami a szelvény tömítettségéért felelt, és azért, hogy a gázt rajta keresztül jutassuk el a kamrába. Ezen kívül a pipába egy lemez is bele lett hegesztve, a gáz áramlásának szétosztatása miatt (3). A pipán keresztül végül Argon gázt juttattunk be adott nyomáson, 30 másodpercig (1). Az idő letelte után a szelvényt víz alatt hűtöttük, majd az alját lefűrészeltük, két szemközti élén gyorsdarabolóval végigvágtuk, hogy a fémhabhoz hozzájussunk. A kísérletet több különböző előmelegítési hőmérsékleten, 20, 200, 300, 400,  $600^{\circ}\text{C}$  és nyomáson, 1, 2, 3, 4 bar-on végeztük el, amíg meg nem találtuk az ideális beállításokat. A további kísérleteket az így meghatározott paraméterek mellett végeztük, ami:  $300^{\circ}\text{C}$  előmelegítési hőmérséklet, és 4 bar Ar-gáznyomás. Ezeken az értékeken a mintáink közel tökéletesen infiltrálódtak, és a gömbhéjak ebben az esetben nem roppantak össze, és nem telítődtek mátrixanyaggal. Ezért ezt a gyártási folyamatot választottuk a későbbi kísérleteinkhez, mert megfelelő minőségű, és kellően reprodukálható minták gyártását teszi lehetővé.

### **5.3. Az előállított kompozitok elnevezései**

Mivel célunk azt volt, hogy a vas gömbhéj erősítésű fémhabokat részletesen, több mátrixanyagra kiterjedően is vizsgáljuk, sok adat gyűlt össze, aminek rendszerezéséhez megfelelő elnevezéseket kellett találnunk. Az általunk kitalált elnevezési séma a következő: mátrixanyag-erősítőanyag-hőkezelés. Elsőként a mátrixot, aztán az erősítőanyagot nevezzük meg, legvégül a hőkezeltégi állapotot. A kísérleteink során 4 különböző mátrixanyagot használtunk fel, és egy fajta erősítőanyagot, amit a 4-es fejezetben részleteztünk. A két kiválásosan keményíthető ötvözetnél két különböző hőkezelést alkalmaztunk. Az egyik az oldó hőkezelés, jele O, mely során a mintát  $520^{\circ}\text{C}$ -on 1 óráig hőn tartottunk, majd vízben hűtöttük. A másik hőkezelés egy kiválásos keményítés hőkezelés, a jele T6, ami egy ASTM

szerinti szabványos kiválásosan keményíthető Al-ötvözetekre alkalmazott hőkezelés, mely során az oldás után 170°C-on tartottuk a mintát 14 órán át [29]. Az elnevezések jelentését az 5.1. táblázat foglalja össze.

**5.1. táblázat** A mintamejelölések magyarázata

| <b>Mintamejelölés</b> | <b>Mátrixanyag</b> | <b>Erősítőanyag</b> | <b>Hőkezelés</b> |
|-----------------------|--------------------|---------------------|------------------|
| Al99,5-GM             | Al99,5             | Globomet            | -                |
| AlSi12-GM             | AlSi12             | Globomet            | -                |
| AlMgSi1-GM (O)        | AlMgSi1            | Globomet            | O                |
| AlMgSi1-GM (T6)       | AlMgSi1            | Globomet            | T6               |
| AlCu5-GM (O)          | AlCu5              | Globomet            | O                |
| AlCu5-GM (T6)         | AlCu5              | Globomet            | T6               |

## 5.4. A fémhabok vizsgálatai

A munkánk során a fémhabokat részletes vizsgálatoknak vetettük alá. Végeztünk sűrűségmérést, különböző makro- és mikroszerkezeti vizsgálatokat, és mechanikai vizsgálatokat. A vizsgálatok menetét ebben a fejezetben részletezzük.

### 5.4.1. A szintaktikus fémhabok sűrűségének mérése

A fémhabok egyik fontos tulajdonsága, a sűrűségük. Azonban ahhoz, hogy a mért értéket viszonyítani tudjuk más fémhabokéhoz, és értékelhessük az infiltráció minőségét, elméletileg, számítással is meg kell határozni a sűrűség értékét. A sűrűség számításánál, a szakirodalom alapján, a kézi tömörítéssel elérhető 64%-os gömbhéj térkitöltést feltételeztünk. Így a 64% erősítőanyagot és 36% mátrixanyagot feltételezve kapott értéket elneveztük elméleti sűrűségnek. Ezt az értéket, korrigálni kellett, mivel a gömbhéjak sűrűségének mérésekor tapasztalt 16%-nyi törött gömbhéjat a gyártás során már nem szűrtük ki. A gömbhéjak átlagos átmérőjének, és a falvastagságnak az ismeretében, a belső átlagos térfogatot kiszámoltuk, 16%-ot megtöltöttünk mátrixanyaggal, és az így kapott értéket elneveztük korrigált sűrűségnek. Így már a mért sűrűségeket viszonyítani tudtuk az elméleti adatokhoz. A legyártott mintáknak a sűrűségét többször is megmértük annak érdekében, hogy az értékek minél pontosabbak legyenek. A minták legyártása után a súlyukat mérleggel és a térfogatukat vízbe merítéssel mértük meg, így kaptuk meg az első értéket. A használt mérleggel ezred milliméter pontosan tudtunk tömeget mérni, de a térfogatmérésnél csak 5 ml pontossággal tudtuk leolvasni az értéket. A zömítő-vizsgálatokhoz legyártott forgácsolással legyártott próbatesteknek a geometriai méretét 0,1 mm-es pontossággal tudtuk szabályozni,

így a geometriai méretet is kellően pontosan ki tudtuk számolni. A zömítésnél használt próbatesteknek egyenként megmérve a tömegét és a geometriai méreteit, elég adatot kaptunk, hogy az értékek átlagát kiszámítva, megbízhatónak tekinthessük a mért sűrűség értékét.

#### 5.4.2. A szintaktikus fémhabok metallográfiai vizsgálata

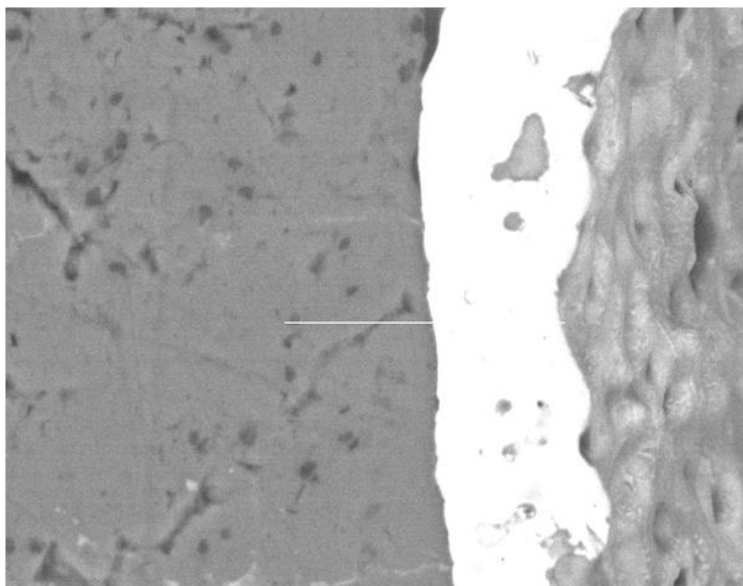
A szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságai az infiltrálás minőségétől függenek. Az infiltráltságot legegyszerűbben metallográfiai vizsgálatokkal ellenőrizhetünk. A vizsgálatokhoz, a legyártott minta egy jellegzetes részéből egy nagyjából 20×20×10 mm-es darabot levágtunk, és Duracryl Plus gyantába ágyasztunk, 15 percig 2 bar nyomáson tartva. A polírozási lépéseket sorrendben, a 5.2. táblázatban láthatják összefoglalva.

5.2. táblázat A polírozás paramétereit összefoglaló táblázat

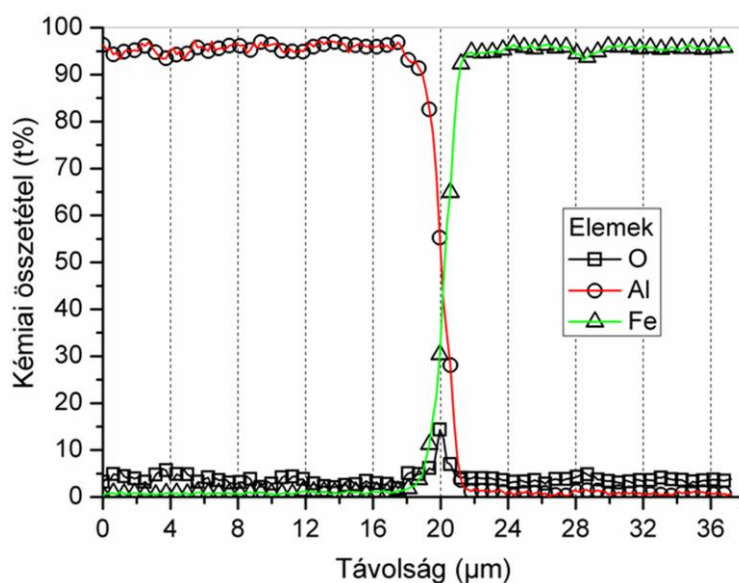
|         | Posztó                       | Időtartam<br>(perc) | Nyomóerő<br>(N) | Forgásirány |
|---------|------------------------------|---------------------|-----------------|-------------|
| 1.lépés | 3 $\mu$ -os gyémánt          | 40                  | 25              | Ellentétes  |
| 2.lépés | 1 $\mu$ -os Master Prep      | 30                  | 25              | Ellentétes  |
| 3.lépés | 0,05 $\mu$ -os Gamma alumina | 20                  | 25              | Ellentétes  |

A zömítés során fellépő folyamatokra, a zömített minták csiszolati képéből lehet következtetéseket levonni, ezért a fent részletezett módszerrel elkészítettük a zömített minták csiszolatát is.

Az ömledék állapotban lévő alumínium rendkívül reakcióképes anyag. Az infiltrálás során a gömbhéj falát is oldatba képes vinni. Ezzel a két anyag között létrejön egy úgynevezett interfész réteg. Ennek a rétegnek a vastagságát pásztázó elektronmikroszkópon, vonalmenti energia-diszperzív röntgen analízissel (line EDS) vizsgáltuk meg. A vizsgálat során a gömbhéj belsejéből kifelé haladva, a falra merőlegesen a gömbhéj falán áthaladva, egy egyenes mentén megmértük az anyagösszetételt és ábrázoltuk a távolság függvényében. Erre mutat be egy példát az 5.8. ábra és az 5.9. ábra.



5.8. ábra Az Al99,5-GM próbatest SEM képe a line EDS-hez használt vonallal



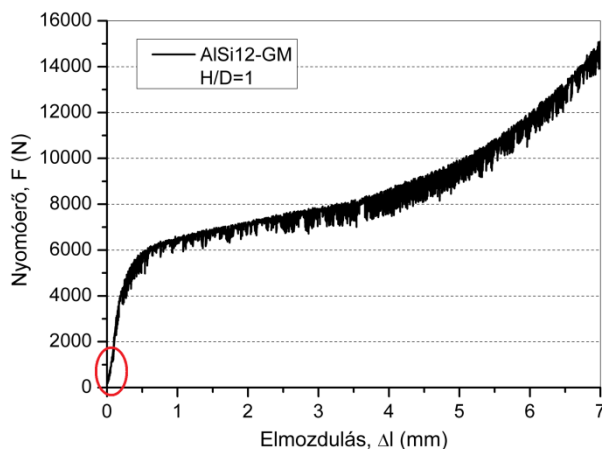
5.9. ábra Az Al99,5-GM próbatest line EDS eredménye

A diagrammon 20  $\mu\text{m}$  környezetében megfigyelhető a határozott átmenet a gömbhéjak falanyagának összetételéből a mátrix anyagának összetételébe, valamint egy határozott oxigén dúsulás. Utóbbi a gömbhéjak előmelegítése során képződött oxidrétegnek tudható be.

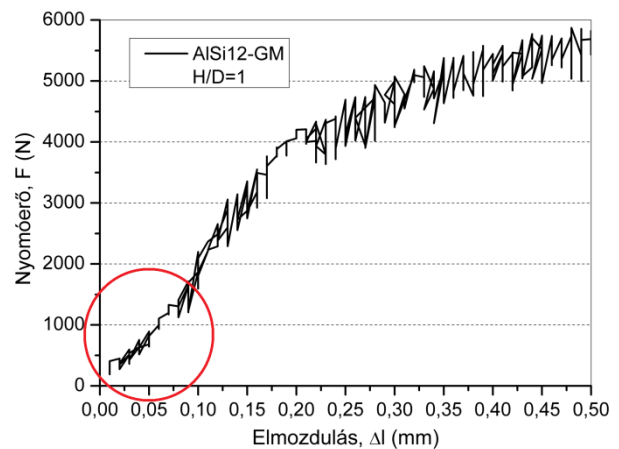
#### 5.4.3. A szintaktikus fémhabok mechanikai vizsgálata

A nyomóvizsgálathoz szükséges próbatesteket úgy gyártottuk le, hogy a mintából kisztergáltunk  $D=14$  mm átmérőjű hengereket és  $H=14$ , 21, valamint 28 mm hosszú darabokra forgácsoltuk őket. Mindegyikből legalább 6-6 darabot készítettünk. Tehát anyagonként minimum 18 darab próbatestet kaptunk és vizsgáltunk meg. A próbatesteket

nyomóvizsgálatnak vetettük alá, amit egy MTS 810 típusú hidraulikus, univerzális anyagvizsgáló gépen végeztünk el. A próbatesten kettős kenést alkalmaztunk, úgy hogy a próbatest aljára és tetejére tettünk egy-egy alufóliadarabot aminek mindkét oldalát bekentük Loctite Anti-size kenőanyaggal, annak érdekében hogy a próbatestnek megfelelő kenése legyen. A próbatesteket állandó sebességgel nyomtuk,  $H/D=1$  próbatesteket  $0,1 \text{ mm/s}$ -al,  $H/D=1,5$  próbatesteket  $0,15 \text{ mm/s}$ -al, valamint  $H/D=2$  próbatesteket  $0,2 \text{ mm/s}$ -al. Ezek az értékek  $0,01 \text{ 1/s}$  integrálközepű alakváltozási sebességnek felelnek meg. Az anyagvizsgáló gép erő – elmozdulás értékeket regisztrált (pl.: 5.10. ábra). A grafikonon látszik a beállási pontatlanságból, és felületi hibákból adódó eltérést.

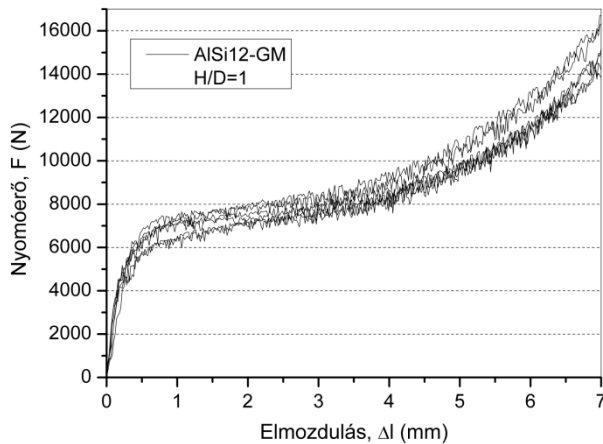


**5.10. ábra** Az AlSi12-GM minta zömítésének erő-elmozdulás diagramja, a beállási szakasz pirossal bekarikázva

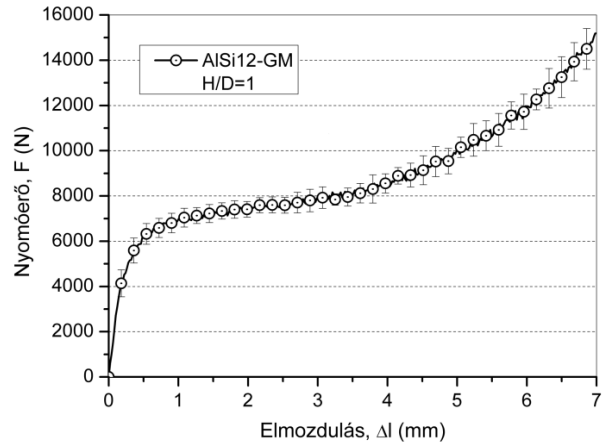


**5.11. ábra** Az AlSi12-GM erő-elmozdulás nyomógörbéjének (5.10. ábra) eleje kinagyítva, a beállási szakasz pirossal bekarikázva

Az 5.11. ábra pedig az 5.10. ábra kinagyítása annak érdekében, hogy bemutassuk, hogy a beállási és a felülethibából milyen eltérés adódik. Jól látható hogy a görbe nem a zérusból indul, valamint az is hogy van egy kihajlása. A kihajláshoz tartozó értékek a gép beállításából származnak, ezek hibás értékek, törölni kell őket. Az is szembejövő, hogy ha meghosszabbítjuk az egyenes részét, akkor nem a zérusban metszené a tengelyeket, így az egész görbét el kell tolni. Ez úgy történik, hogy egyenest illesztünk arra a szakaszra a görbe elején, ami közel egyenesen halad (szerkezeti merevség,  $S$ ), majd megnézzük, hogy ez az egyenes hol metszené az  $x$ -tengelyt. A kapott értéket kivonjuk a kezdeti adatok  $x$  értékéből. Ahhoz hogy átlagolni tudjuk az egyes  $H/D$  viszonyhoz tartozó görbéket Origin programmal interpoláltuk őket, vagyis egyenlő  $x$  távolságokra osztotta fel a program a görbét, esetünkben 350 pontra. Egy összegző diagramot mutat be az 5.12. ábra, amin mind a 6 interpolált görbe rajta van.



**5.12. ábra** Az AlSi12-GM minták zömítésének hat interpolált görbéje



**5.13. ábra** Az AlSi12-GM minták nyomógörbéinek átlaggörbéje

Ezután a görbéket az Origin programmal átlagoljuk. Az 5.13. ábra már az átlagolás utáni formáját mutatja be. Ezután az erőt minden pontban elosztjuk a kezdeti keresztmetszettel,

$$A = \frac{D^2 \cdot \pi}{4}, \quad (2)$$

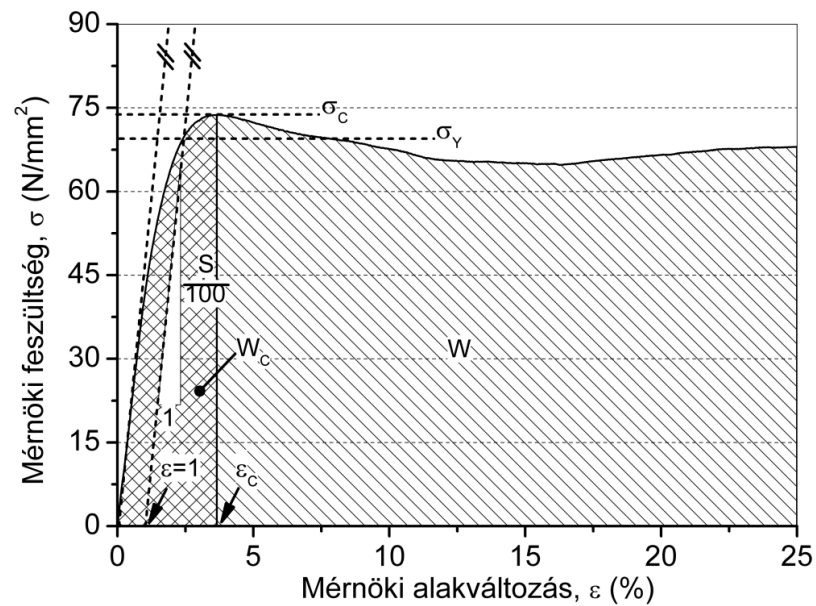
így kapjuk meg a mérnöki feszültséget.

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (3)$$

A mérnöki alakváltozást úgy kapjuk, ha az elmozdulást minden pontban elosztjuk a kezdeti magassággal majd megszorozzuk 100-al.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100, \quad (4)$$

A görbék kiértékelését a DIN 50134 szabvány szerint végeztük. Az 5.14. ábra szemlélteti azokat a mennyiségeket, amelyeket vizsgáltunk és figyelemmel kísértünk.



5.14. ábra Az általunk vizsgált szabványos mérőszámok értelmezése

Az általunk meghatározott szabványos mérőszámok a következők voltak: a kezdeti meredekség, vagyis a szerkezeti merevség –  $S$  – az első érték, amit először meghatároztunk, ehhez egyenest illesztettünk a kezdeti szakaszra, majd a kapott egyenes meredekségét elosztottuk 100-al. A következő lépésben ezzel az egyenessel párhuzamost húztunk az  $\varepsilon=1$  %-nál, annak érdekében, hogy meghatározzuk az 1%-os maradó alakváltozáshoz tartozó munkát. Ezt a munkát –  $W_{1\%}$  – úgy kaptuk meg, hogy megkerestük a  $\sigma_y$ -hoz tartozó  $\varepsilon$  értéket, majd a görbét eddig az értékig numerikusan integráltunk. A következő érték, amit meghatároztunk a platófeszültség –  $\sigma_{plt}$  – ami a közel vízszintes részhez tartozna. A mi görbéinken látszik, hogy nincs vízszintes rész, hanem folyamatosan emelkedik, ezért a platófeszültséget úgy számoltuk, hogy szabvány szerint átlagoltuk a feszültséget az  $\varepsilon=20-40\%$ -ig terjedő szakaszon. Az utolsó érték, amit ki kell számolni a teljes alakításhoz tartozó munka –  $W_{50\%}$  - ezt pedig úgy kapjuk, hogy numerikusan integráljuk a teljes görbe alatti területet. Az  $\varepsilon_c$  törési alakváltozást, a  $\sigma_c$  törési feszültséget valamint a  $W_c$  törési munkát nem tudjuk meghatározni, mert a mi görbéink folyamatosan emelkednek, nincsen rajtuk törési csúcspont.

## 6. Eredmények

Ebben a fejezetben részletesen ismertetjük az elvégzett mérésekből kapott eredményeket.

### 6.1. Sűrűségmérés eredményei

A számolt és mért sűrűség értékeket a 6.1. táblázatban foglaljuk össze.

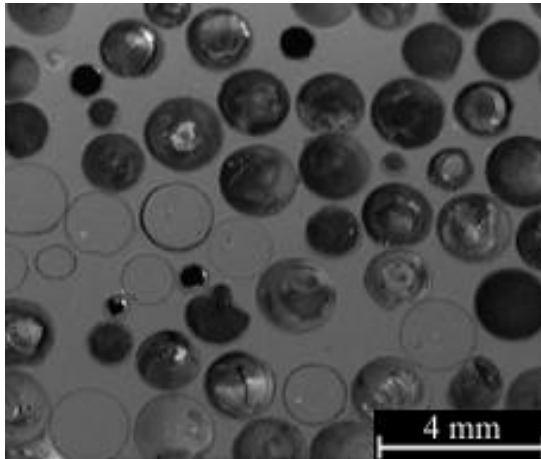
6.1. táblázat A próbatestek sűrűségvizsgálatának eredményei

|                                        | Al99,5-GM | AlSi12-GM | AlMgSi1-GM | AlCu5-GM |
|----------------------------------------|-----------|-----------|------------|----------|
| Mátrix sűrűsége (g/cm <sup>3</sup> )   | 2,70      | 2,65      | 2,70       | 3,01     |
| Ideális sűrűség (g/cm <sup>3</sup> )   | 1,37      | 1,35      | 1,37       | 1,48     |
| Korrigált sűrűség (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,62      | 1,60      | 1,62       | 1,76     |
| Mért sűrűség (g/cm <sup>3</sup> )      | 1,41      | 1,42      | 1,60       | 1,72     |

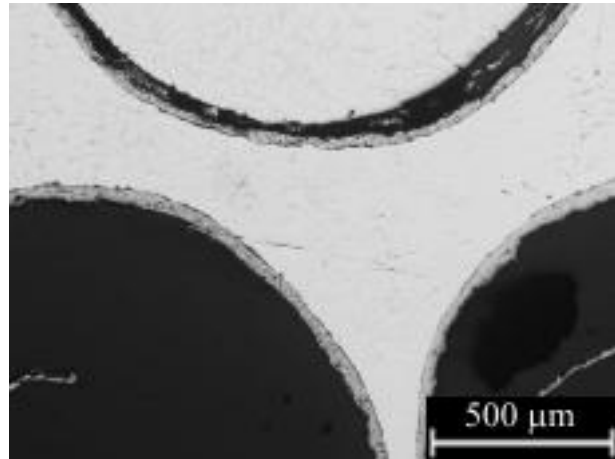
A mért értékek minden esetben a korrigált és az ideális sűrűség közé estek, ami azzal magyarázható, hogy az infiltrálás nem volt tökéletes, nem kívánt porozitás lépett fel a gömbhéjak között, mert a mátrixanyag nem volt képes mindenhova befolyjni.

### 6.2. A metallográfiai vizsgálatok eredményei

A makrofotón (6.1. ábra) és a fénymikroszkópi csiszolaton (6.2. ábra) látszik, hogy az infiltrálás jó hatásfokkal ment végbe, de kismértékű porozitás fellépett a gömbhéjak között. A 6.2. ábrán látható példa a sérült fal miatt infiltrálódott gömbhéjra is. Az összes anyagra kiterjedő csiszolati képeket a mellékletben a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**tól a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**ig közöljük.

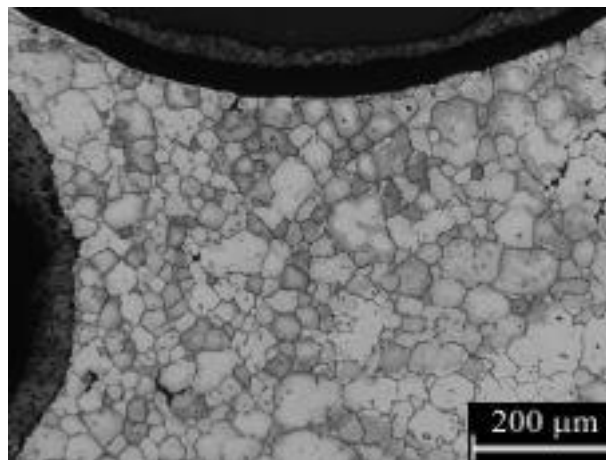


**6.1. ábra** Az AlCu5-GM polírozott próbatest makrofotója



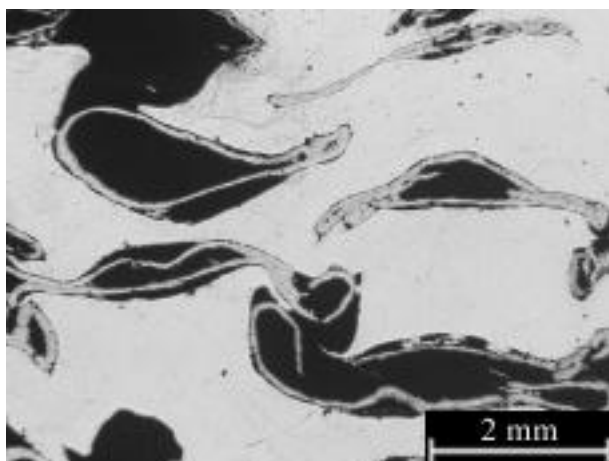
**6.2. ábra** Az AlCu5-GM próbatest polírozott mintájának fénymikroszkópos képe

A mintákat a polírozást követően megmarattuk, hogy megvizsgáljuk, hogy a szemcseszerkezet változik-e a gömbhéjak közelében, és a zömítés hogyan befolyásolja a szemcseszerkezet képét. A maratott felvételeken az látható, hogy a gömbhéjak nem változtatták meg jelentős mértékben a szemcseszerkezetet. A mátrixanyag polygonális szemcsékből áll, de a gömbhéjak falának közelében a kiválások mértéke megnőtt (6.3. ábra).

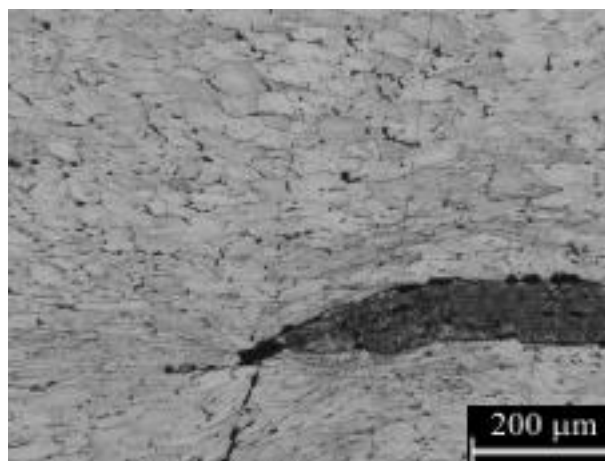


**6.3. ábra** Az AlCu5-GM próbatest maratott mintájának fénymikroszkópos képe

A zömített minták csiszolati képeiből (6.4. ábra) arra lehet következtetni, hogy a próbatestben a zömítés során képlékeny stabilitásvesztés lépett fel, a gömbhéjak a nyomás hatására összeroppantak, a mátrixanyag pedig megfolyt, és képlékenyen alakulva próbálta követni a gömbhéjak alakváltozását. A zömített minták maratása azt tette láthatóvá, hogy a szemcsék hogyan deformálódtak a zömítés során. Erre példa a 6.5. ábra.

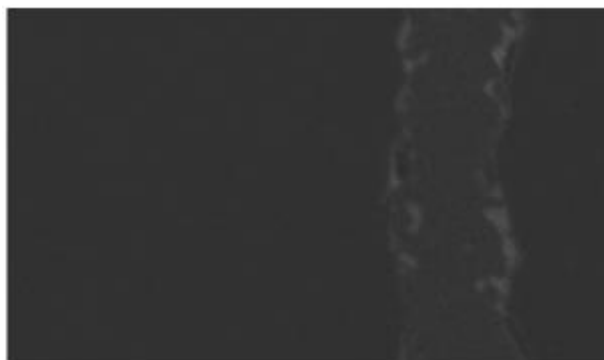


**6.4. ábra** Az AlCu5-GM zömített próbatest polírozott mintájának fénymikroszkópos képe



**6.5. ábra** Az AlCu5-GM zömített próbatest maratott mintájának fénymikroszkópos képe

A line EDS vizsgálatok során kapott eredmények alapján elmondható, hogy a gömbhéjakban a kemencében töltött idő alatt egy oxidációs folyamat ment végbe, ezt jelzi a fal felszínénél megnövekvő oxigén mennyisége (6.6. ábra).



**6.6. ábra** Az AlCu5-GM próbatest SEM felvétele az oxigén eloszlásáról  
A képen egy gömbhéj fala látható, minél világosabb, annál több oxigén van jelen.

Emellett a line EDS mérés során kapott görbékről meghatároztuk mind a négy anyagra az átmeneti réteg vastagságát. Az értékeket a 6.2. táblázat foglalja össze.

**6.2. táblázat** A gömbhéj és a mátrixanyag közötti átmeneti réteg vastagsága mátrixanyagoként

|                                | Al99,5-GM | AlSi12-GM | AlMgSi1-GM | AlCu5-GM |
|--------------------------------|-----------|-----------|------------|----------|
| Átmeneti réteg vastagsága (μm) | 6-8       | 7-9       | 8-10       | 9-12     |

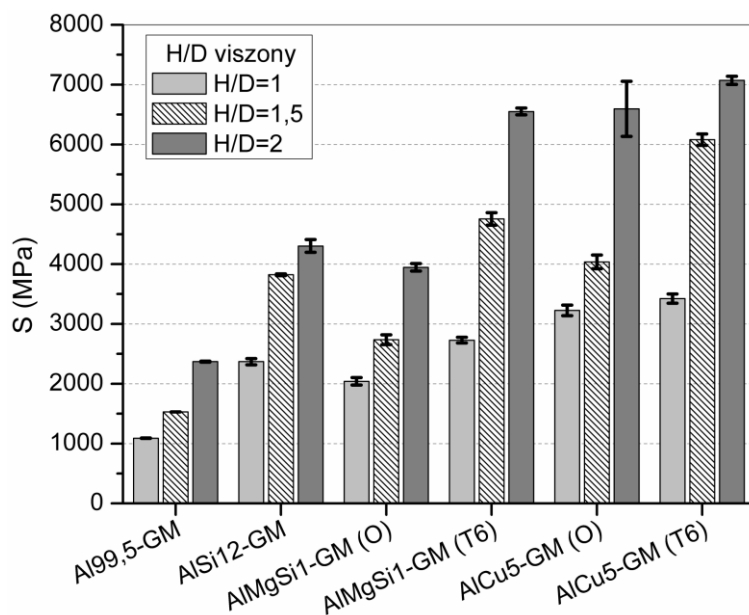
### 6.3. Mechanikai vizsgálatok eredményei

A nyomóvizsgálatokból kapott görbéket, amikből minden szabványos mérőszámot meghatároztunk a mellékletben közöljük (Hiba! A hivatkozási forrás nem található.tól a Hiba! A hivatkozási forrás nem található.ig). A mérőszámok átlagos eredményeit a jellemző szórással együtt a 6.3. táblázatban összesítjük.

6.3. táblázat A nyomóvizsgálatból kapott eredmények

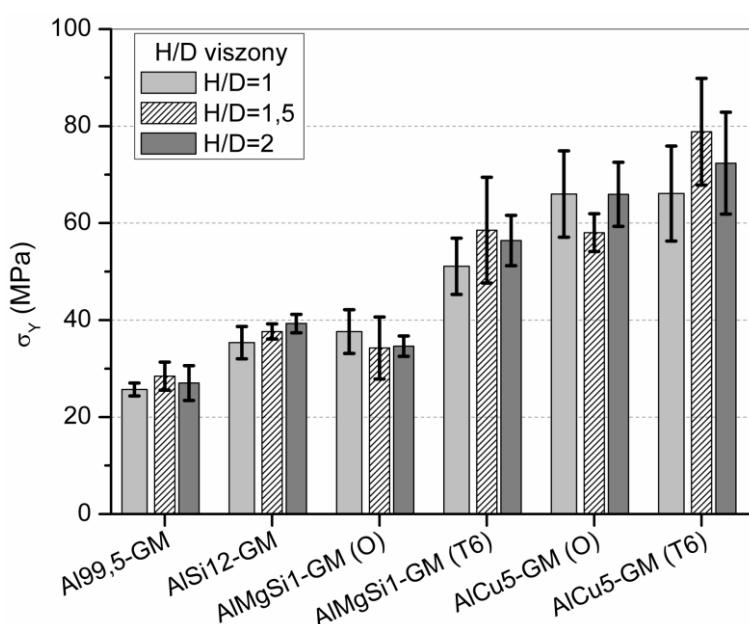
| Minta           | H/D viszony | S (MPa)    | $\sigma_Y$ (MPa) | $\sigma_{pl}$ (MPa) | $W_{1\%}$ (MJ/m <sup>3</sup> ) | $W_{50\%}$ (MJ/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------|-------------|------------|------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Al99,5-GM       | 1           | 1090 ± 3   | 26 ± 1           | 37 ± 2              | 52 ± 5                         | 1772 ± 108                      |
|                 | 1,5         | 1529 ± 1   | 28 ± 3           | 38 ± 4              | 53 ± 5                         | 1851 ± 179                      |
|                 | 2           | 2371 ± 9   | 27 ± 4           | 38 ± 4              | 40 ± 5                         | 1867 ± 218                      |
| AlSi12-GM       | 1           | 2369 ± 52  | 35 ± 3           | 58 ± 3              | 57 ± 7                         | 2870 ± 169                      |
|                 | 1,5         | 3822 ± 14  | 38 ± 2           | 63 ± 4              | 51 ± 3                         | 3095 ± 188                      |
|                 | 2           | 4304 ± 108 | 39 ± 2           | 65 ± 1              | 55 ± 6                         | 3123 ± 118                      |
| AlMgSi1-GM (O)  | 1           | 2041 ± 61  | 38 ± 5           | 63 ± 7              | 71 ± 7                         | 3066 ± 370                      |
|                 | 1,5         | 2737 ± 80  | 34 ± 6           | 52 ± 7              | 55 ± 9                         | 2507 ± 405                      |
|                 | 2           | 3947 ± 62  | 35 ± 2           | 51 ± 4              | 48 ± 5                         | 2492 ± 254                      |
| AlMgSi1-GM (T6) | 1           | 2730 ± 47  | 51 ± 6           | 83 ± 8              | 95 ± 9                         | 4038 ± 373                      |
|                 | 1,5         | 4756 ± 105 | 59 ± 11          | 89 ± 18             | 94 ± 17                        | 4374 ± 896                      |
|                 | 2           | 6553 ± 56  | 56 ± 5           | 91 ± 15             | 76 ± 8                         | 4404 ± 731                      |
| AlCu5-GM (O)    | 1           | 3227 ± 88  | 66 ± 9           | 74 ± 27             | 102 ± 17                       | 3662 ± 1244                     |
|                 | 1,5         | 4038 ± 115 | 58 ± 4           | 111 ± 24            | 94 ± 12                        | 5339 ± 562                      |
|                 | 2           | 6597 ± 460 | 66 ± 7           | 130 ± 9             | 95 ± 16                        | 6073 ± 436                      |
| AlCu5-GM (T6)   | 1           | 3424 ± 75  | 66 ± 10          | 111 ± 31            | 124 ± 20                       | 5356 ± 1451                     |
|                 | 1,5         | 6080 ± 94  | 79 ± 11          | 115 ± 24            | 126 ± 18                       | 5561 ± 1111                     |
|                 | 2           | 7072 ± 67  | 72 ± 11          | 117 ± 12            | 103 ± 14                       | 5563 ± 771                      |

Az eredményeket a jobb áttekinthetőség érdekében a 6.7. ábrától a 6.11. ábraig oszlopdiagramokban szemléltetjük.



6.7. ábra A szerkezeti merevség H/D viszonyonként

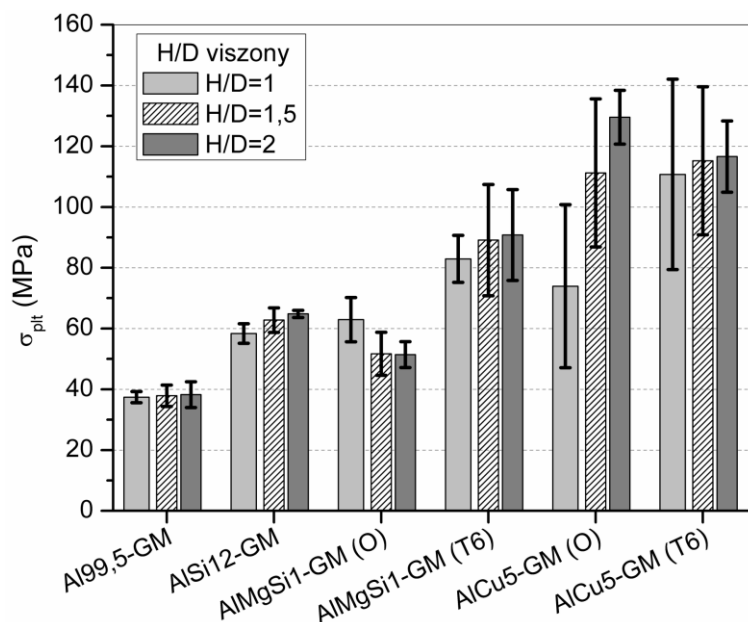
A 6.7. ábrán jól látszik, hogy a szerkezeti merevség, ( $S$ ) a  $H/D$  viszony növelésével jelentősen növekszik, minden egyes mátrixanyag esetében. Ennek oka a különböző karcsúságú próbatestek különböző károsodási folyamataiban keresendő. A kiválasztott keményíthető ötvözeteknél, az oldott mintáknak kisebb volt a merevsége, mint az öregített mintáknak, ahogyan az várható volt. A nagyobb szilárdságú mátrixanyag hatása is látható a diagramon. Az erősebben ötvözött  $AlSi12$  és  $AlCu5$  jelű mintákban oldott állapotban is merevebbnek bizonyultak az  $Al99,5$  és  $AlMgSi1$  mátrixanyagú mintáknál. A  $H/D$  viszony növekedésével általában a szórás nagysága is növekedett. Ennek oka az, hogy a szintaktikus fémhabokban is vannak különböző (elsősorban infiltrálásból adódó) hibák. Minél nagyobb a próbatest (minél nagyobb a karcsúság) annál nagyobb a valószínűsége annak, hogy egy adott próbatesten lényegi hiba forduljon elő. Ezek a próbatestek kisebb szerkezeti merevséget mutatnak (de még nem akkora mértékben, hogy mérési hibáknak lehetne őket titulálni) és ezért az eredmények szórását nagymértékben befolyásolják.



**6.8. ábra** Az 1% maradó alakváltozáshoz tartozó nyomófeszültség  $H/D$  viszonyonként

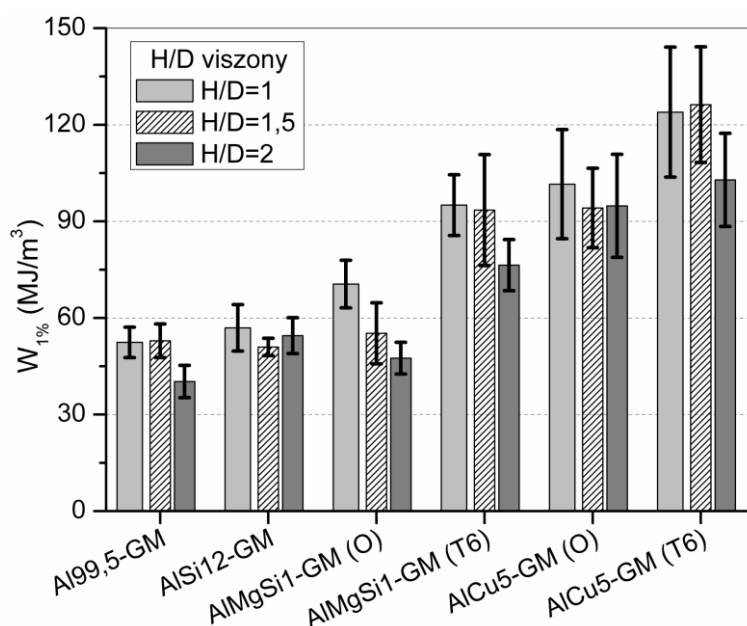
Az 1% maradó alakváltozáshoz tartozó nyomófeszültség, ( $\sigma_Y$ ) értékeit a 6.8. ábra mutatja be. Az értékeknek ebben az esetben nem lehet kimutatni a  $H/D$  viszonytól való kifejezett függését, a szilárdságok minden esetben szóráson belüli változtak. A kiválasztott keményített minták ebben az esetben is magasabb értékeket adtak, mint az oldott minták. A kiválasztott keményített minták hozzávetőlegesen 30%-kal mutattak nagyobb átlagos szilárdságértékeket az oldott mintáknál. Ez jelentős szilárdságnövekedésnek mondható, de megjegyezzük, hogy korántsem akkorának, mint a tömbi anyagoknál elvárt lenne. A várt

mértékű szilárdságnövekedés oka kettős lehet. Egyrészt a mátrixanyagban a gömbhéj falából oldódó Fe megváltoztatja a mátrix kémiai összetételét, és ezáltal elmozdítja az ideális hőkezelés paramétereit is, másrészt feltételezhető, hogy a darabok rosszabb hővezetése is befolyással volt a hőkezelés során végbemenő kiválási folyamatokra.



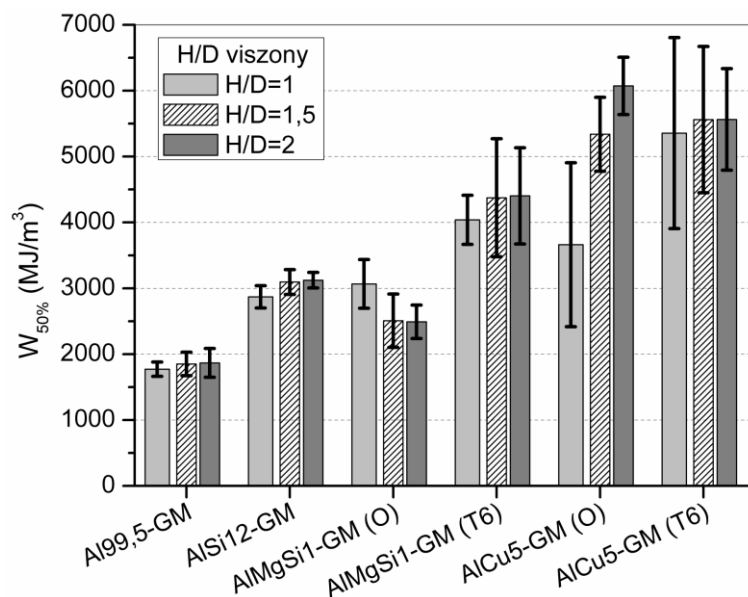
6.9. ábra A platófeszültség H/D viszonyonként

A platófeszültség, ( $\sigma_{pl}$ ) (6.9. ábra) hasonlóan az  $\sigma_Y$ -hez függetlennek bizonyult a H/D viszonytól, nem mutatható ki egyértelmű tendencia a karcsúság függvényében. A mátrixanyag szilárdsága a  $\sigma_{pl}$ , és a  $\sigma_Y$ -ra is hatással van, a nagyobb szilárdságú mátrixanyag esetében nagyobb értékeket kaptunk. Az öregített minták értékei a vártnak megfelelően ebben az esetben is magasabbak voltak az oldottakénál. A „hagyományos” egyfázisú (nem gömbhéjakkal erősített, illetve előállított) fémhabokhoz képest nagy platófeszültségeket mértünk. A nagy és egyenletes platófeszültség előnyös a különböző energiaelnyelő alkalmazások esetén, hiszen a viszonylag nagy feszültség szinten, hosszantartó képlékeny alakváltozás nagy mennyiségű elnyelt mechanikai munkát/energiát garantál.



**6.10. ábra** Az 1% maradó alakváltozáshoz tartozó munka H/D viszonyonként

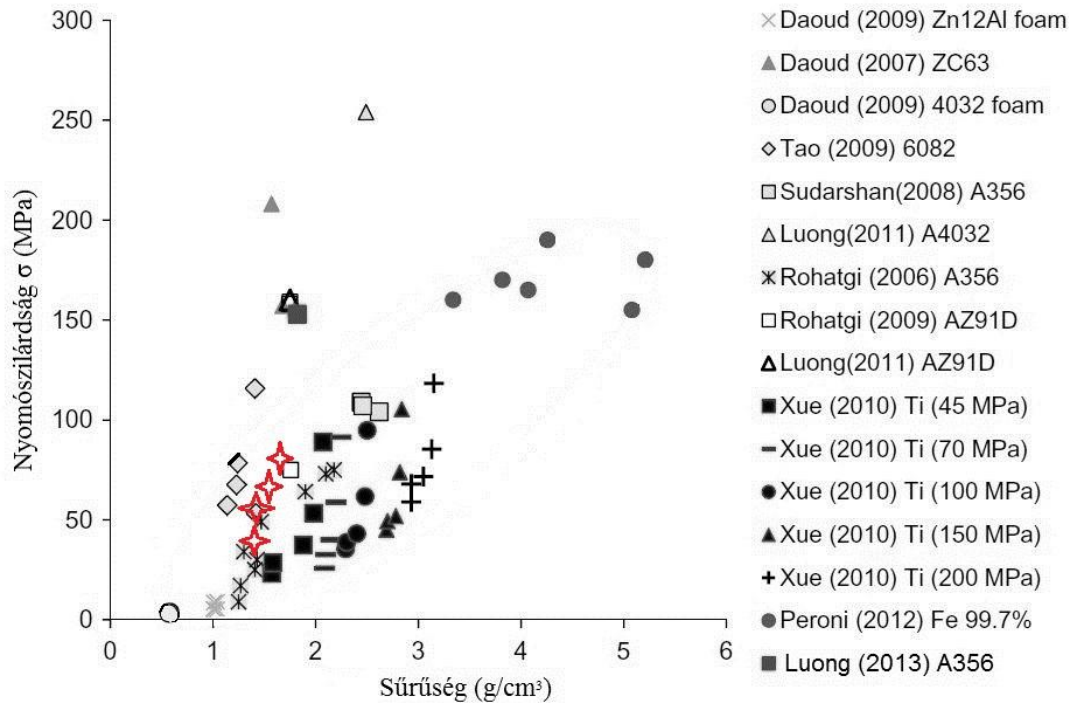
Az 1% maradó alakváltozásig elnyelt energia, ( $W_{1\%}$ ) a H/D viszsonnyal fordítottan arányos lefutást mutattak, az értékek enyhén csökkenő tendenciát követtek (6.10. ábra). Ennek oka a már említett nagyobb térfogat – nagyobb hibalehetőség gondolatmenettel magyarázható, bár megjegyezzük, hogy az energia értékek lényegében a szórási sávokon belül maradtak. Az 1% maradó alakváltozásig elnyelt energiaértékek lényegében azt mutatják meg, hogy mekkora mechanikai energiát kell adott térfogatba befektetni ahhoz, hogy jelentős képlékeny deformáció lépjen fel. Megfordítva, ez egyben egy határérték arra vonatkozólag is, hogy olyan energiaelnyelő alkalmazásokban, amelyek során mechanikai terhelés éri a darabot, de a képlékeny alakváltozás nem megengedett (például különböző rezgéscsillapítók), mekkora az a maximális megengedett energiamennyiség, amelyet még törések nélkül tud elviselni az anyag. Az 50% maradó alakváltozásig elnyelt energia, ( $W_{50\%}$ ), ezzel ellentétesen, növekvő értékeket adott, a H/D viszony növelésével (6.11. ábra), és a különböző mátrixanyagok között akár 2-2,5-szeres különbség is megjelent.



**6.11. ábra** Az 50% maradó alakváltozáshoz tartozó munka H/D viszonyonként

Általánosan a görbékről elmondható, hogy a kerámia gömbhéjas fémhabok nyomóvizsgálati görbéihez képest eltérő alakúak, a görbéken nem látható kezdeti feszültségcsúcs, vagyis nincsen kifejezett nyomószilárdságuk, a görbe folyamatosan, törés nélkül lép át a platós szakaszba. Ez a fém gömbhéjak magasabb alakváltozási képessége miatt van, a kerámia gömbhéjak rideg viselkedésével szemben. Ez abban is megmutatkozott, hogy a zömítés során a kerámia gömbhéj erősítésű fémhabokra jellemző hasadásos jelleget mutató tönkremenetelei módok, a fém gömbhéjjal erősített szintaktikus fémhaboknál, nem jelentkeztek, azok minden esetben képlékeny alakváltozás és hordós zömülés nyomati mutatták.

Végül a 2.7-es fejezetben bemutatott, a szakirodalmi adatokat összegző ábrába piros csillaggal megjelöltük az általunk gyártott fémhabok mért értékeit, annak érdekében, hogy az eredményeink a nemzetközi szakirodalom elérhető adataival is összevethetőek legyenek.



**6.12. ábra** Az általunk gyártott fémhabok nyomószilárdságának a szakirodalomból vett értékekkel való összehasonlítása, a saját gyártású fémhabjainkat piros csillaggal jelöltük.

## 7. Összefoglalás

A szakirodalom elemzése nyomán tett célkitűzéseinkből kiindulva és az előzőekben bemutatott kísérletek eredményeire alapozva az alábbi összefoglaló megállapításokat tehetjük:

1. Kísérletekkel igazoltuk, hogy a kisnyomású infiltráció alkalmas jó minőségű, alumínium és különböző alumíniumötvözet (Al99,5, AlSi12, AlMgSi1, AlCu5) mátrixú, vas gömbhéjakkal erősített szintaktikus fémhabok előállítására, kis mátrixporozitás mellett.

2. Ezt igazolja, hogy az átlagos mért sűrűségek a korrigált sűrűségekhez minden esetben közel estek, és hogy reprodukálható módon tudunk szintaktikus fémhab tömböket előállítani, a mért sűrűségek anyagonként kis szórást mutattak.

3. Az elvégzett mérések alapján kijelenthető, hogy a mátrixanyag és a gömbhéj közötti kapcsolat megfelelő, ezt biztosítja az anyagonként eltérő 4-11  $\mu\text{m}$ -es átmeneti réteg.

4. A kvázistatikus nyomóvizsgálatokból kapott értékek igazolták, hogy a szerkezeti merevség egyenesen arányos a karcsúsággal, a platófeszültség és az 1%-os maradó alakváltozáshoz tartozó nyomószilárdság független a H/D (magasság/átmérő) viszonytól. Az 1%-os maradó alakváltozásig elnyelt energia fordítottnak, az 50%-os maradó alakváltozásig elnyelt energia egyenesen arányos a karcsúsággal. A kísérletekkel igazoltuk azt a feltételezést, hogy a kiválasztott keményített minták nagyobb szilárdságúak, mint az oldottak.

Az általunk előállított szintaktikus fémhabok szerkezeti merevsége  $\sim 1000$ -  $\sim 7000$  (MPa) közé esett. Az 1%-os maradó alakváltozáshoz tartozó nyomófeszültségi értékek  $\sim 25$ - $\sim 80$  (MPa) között változtak. A platófeszültség  $\sim 35$ - $\sim 130$  (MPa) közötti értékeket vett fel. A fémhabjaink 1%-os maradó alakváltozásig  $\sim 40$ - $\sim 125$  (MJ/m<sup>3</sup>) energiát nyeltek el, míg 50%-os maradó alakváltozásig  $\sim 1750$ - $\sim 6050$  (MJ/m<sup>3</sup>)-t. A fémhabjaink nyomószilárdsági értékei  $\sim 30$ - $\sim 80$  (MPa) közé estek. A szakirodalomban található fémhabokkal összevetve (6.12. ábra) az általunk gyártott fémhabokról elmondható, hogy tulajdonságaikat és minőségüket tekintve jól illeszkednek a más kutatócsoportok által előállított szintaktikus fémhabok csoportjába.

## 8. Summary in English

Starting from our aims based on the analyses of the professional literature and confirmed by the above detailed experiments the following conclusions can be drawn:

1. With numerous experiments the low pressure infiltration method proved to be a convenient and effective method for the production of metal hollow sphere reinforced aluminium matrix (Al99.5, AlSi12, AlMgSi1, AlCu5) syntactic foams.

2. The produced aluminium matrix syntactic foams have low unwanted void content, their densities are close to the theoretical ones, with small scatter and the whole procedure is well repeatable.

3. The microstructural investigations showed good cohesion between the matrix material and the hollow spheres, that is also confirmed by the presence of a 4-11  $\mu\text{m}$  thick interface layer.

4. The results of the quasi-static compressive tests confirmed outstanding mechanical properties among the metal matrix syntactic foams. The structural stiffness and the whole absorbed energy values (up to 50% deformation) were in linear relationship with the aspect ratio, while the plateau and yield strength were independent from it. The mechanical energies absorbed up to 1% deformation was inversely proportional to the aspect ratio.

The aluminium matrix syntactic foams produced by our research group have structural stiffness of 1000-7000 MPa, yield strength of 25-80 MPa, plateau strength of 35-130 MPa and compressive strength of 30-80 MPa. The mechanical energies absorbed up to 1% and 50% were about 40-125 MJ/m<sup>3</sup> and 1750-6050 MJ/m<sup>3</sup> respectively. Compared to the data available in the professional literature the aluminium matrix syntactic foams produced by our research group fits well in the row of the published results.

## 9. Irodalomjegyzék

1. Kallas DH, Chatten CK, Buoyancy materials for deep submergence Ocean Engineering 4 (1969:1) 421-424
2. Orbulov Imre Norbert, Szintaktikus fémhabok PhD-értekezés, 2009.
3. Czvikovszky Tibor, Lehet-e „zöld” a műanyag, *Mindentudás Egyeteme előadás, VII. szemeszter, 4. előadás, 2005. október 3.*
4. David B. Dittenber, Hota V.S. GangaRao, Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure, *Composites: Part A* 43 (2012) 1419-1429
5. M. Aureli, M. Porfiri, N. Gupta, Effect of polydispersivity and porosity on the elastic properties of hollow particle filled composites, *Mechanics of Materials* 42 (2010) 726–739
6. Dung D. Luong, Oliver M. Strbik III, Vincent H. Hammond, Nikhil Gupta, Kyu Cho, Development of high performance lightweight aluminium alloy/SiC hollow sphere syntactic foams and compressive characterization at quasi-static and high strain rates, *Journal of Alloys and Compounds* 550 (2013) 412-422
7. Xue Xiao-bing, Wang Li-qiang, Wang Min-min, Lü Wei-jie, Zhang Di, Manufacturing, compressive behaviour and elastic modulus of Ti matrix syntactic foam fabricated by powder metallurgy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22 (2012) s188-s192
8. Cochran JK, Ceramic hollow spheres and their applications, *Current opinion in Solid State and Materials Science* 5 (1998) 474-479
9. Fraunhofer Gesellschaft, [http://www.ifamdd.fraunhofer.de/fhg/ifam\\_dd/EN/ifam-projekte/hohlkugeln/index.jsp](http://www.ifamdd.fraunhofer.de/fhg/ifam_dd/EN/ifam-projekte/hohlkugeln/index.jsp) 2009.06.04.
10. Khor KA, Yu LG, Anderson O, Stephani G, Effect of spark plasma sintering (SPS) on the microstructure and mechanical properties of randomly packed hollow sphere (RHS)
11. Tao XF, Zhang LP, Zhao YY Al matrix syntactic foam fabricated with bimodal ceramic microspheres *Materials and Design* 30 (2009) 2732-2736
12. J.A. Santa Maria, B.F. Schultz, J.B. Ferguson, P.K. Rohatgi, Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> syntactic foams – Part I.: Effect of matrix strength and hollow sphere size on the quasi-static properties of Al-A206/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> syntactic foams, *Materials Science and Engineering A* 582 (2013) 415-422

13. Gupta N, Ricci W, Comparison of compressive properties of layered syntactic foams having gradient in microballoon volume fraction and wall thickness, *Materials Science and Engineering A* 427 (2006) 331-342
14. P. Lhuissier, A. Fallet, L. Salvo, Y. Brechet, Quasistatic mechanical behaviour of stainless steel hollow sphere foam: Macroscopic properties and damage mechanisms followed by X-ray tomography, *Materials Letters* 63 (2009) 1113-1116
15. P. Kun, I.N. Orbulov, AlCu5 és AlMgSi1 mátrixú szintaktikus fémhabok előállítása és vizsgálata, *Bányászati Kohászati Lapok*, 144:(3) (2011) 51-55
16. Rabiei, A.T. O'Neill, A study on processing of a composite metal foam via casting, *Materials Science and Engineering A* 404 (2005) 159–164
17. P.K. Rohatgi, J.K. Kim, N. Gupta, Simon Alaraj, A. Daoud, Compressive characteristics of A356/fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration technique, *Composites: Part A* 37 (2006) 430–437
18. P.Yu, M. Qian, Metal injection moulding of in-situ formed AlN hollow sphere reinforced Al matrix syntactic foam parts, *Materials Chemistry and Physics* 137 (2012) 435-438
19. Daoud, Synthesis and characterization of novel ZnAl22 syntactic foam composites via casting, *Materials Science and Engineering A* 488 (2008) 281-295
20. R.A. Palmer, K. Gao, T.M. Doan, L. Green, G. Cavallaro, Pressure infiltrated syntactic foams – Process development and mechanical properties, *Materials Science and Engineering A* 464 (2007) 85-92
21. G. Castro, S.R. Nutt, Synthesis of syntactic steel foam using mechanical pressure infiltration, *Materials Science and Engineering A* 535 (2012) 274-280
22. Rabiei A, O'Neill AT, A study on processing of a composite metal foam via casting, *Materials Science and Engineering A* 404 (2005) 159-164
23. O. Rahmani, S.M.R. Khalili, K. Malekzadeh, H. Hadavinia, Free vibration analysis of sandwich structures with a flexible functionally graded syntactic core, *Composite Structures* 91 (2009) 229-235
24. X.F. Tao, Y.Y. Zhao, Compressive failure of Al alloy matrix syntactic foams manufactured by melt infiltration, *Materials Science and Engineering A* 549 (2012) 228– 232
25. M. Jayaraman, V. Balasubramanian, Effect of process parameters on tensile strength of friction stir welded cast A356 aluminium alloy joints, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 23(2013) 605–615

26. *J. Lamonn*, Properties and Characteristics of SiC and SiC/SiC Composites, *Comprehensive Nuclear Materials* 2012, pages 323-338
27. *D. Ruan, G. Lu, F.L. Chen, E. Siores*, *Compos Struct*, 57. (1-4) (2002) 331-336
28. *P.K. Rohatgi, J.K. Kim, N. Gupta, Simon Alaraj, A. Daoud*, Compressive characteristics of A356/fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration technique, *Composites: Part A* 37 (2006) 430-4437
29. *ASM International*, ASM Handbook Volume 4: Heat Treating

## **10. Köszönetnyilvánítás**

Köszönjük Kranauer Tamásnak és Mohos Lászlónak a számtalan öntőforma legyártását, a szakmai tanácsaikat és oktatásukat.

Köszönetet szeretnénk mondani még Hrotkó Istvánnénak és Dr. Fábián Enikő Rékának az útmutatásukért a csiszolatok elkészítéséhez.