



Szintaktikus fémhabok nyomóvizsgálata radiális irányban gátolt alakváltozás mellett

Tudományos Diákkör dolgozat

Készítették:

Szöllősi Péter

Varga Márton

Konzulens:

Dr. Orbulov Imre Norbert, egyetemi adjunktus, PhD

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Gépészmérnöki Kar

Anyagtudomány és Technológia Tanszék

Budapest

2013.

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	3
Szakirodalmi áttekintés	4
Célkitűzés	14
Mérési eredmények	15
Felhasznált anyagok	15
A nyomóvizsgálat körülményei.....	16
A szintaktikus fémhabok károsodási módjai.....	18
A nyomógörbe alakulása szintaktikus fémhabok esetén.....	19
Hőkezelés	20
Mikroszkópi vizsgálat	21
Fénymikroszkópi képek	23
Nyomószilárdság.....	27
A szerkezeti merevség.....	29
A zömítő vizsgálat során elnyelt energia nagysága.....	30
A hőkezelés hatása az energiaelnyelő képességre, a nyomószilárdságra, és a szerkezeti merevségre	33
Összegzés	35
Források.....	37

Bevezetés

Napjaink egyik legégetőbb problémáját a meg nem újuló nyersanyag és fosszilis energiahordozó készletek végeessége jelenti. Az ezáltal generált takarékosági törekvések új technológiákat, új anyagokat, anyagcsoportokat eredményeztek, amelyek közül a legtöbb lehetőség a kompozit anyagok alkalmazásában rejlik. A kompozit anyagok olyan többfázisú, összetett anyagok, amelyekben az őket alkotó két, vagy több különböző mátrix- és erősítőanyag előnyös tulajdonságai ötvöződnek, hátrányaik kompenzálása mellett. A kompozit anyag a három fő anyagcsalád elemeinek párosításával jön létre, a befoglaló mátrixanyaghoz egy közbülső átmeneti rétegen keresztül kapcsolódik a terhelést ténylegesen viselő erősítőanyag.

A könnyű szerkezeti anyagok iránti kereslet indukálta az 1940-es években a fémhabok kifejlesztését. Az ipar fejlődésével olyan elvárások ébredtek, amelyeket a hagyományos anyagok már nem tudtak kielégíteni, erre a fémhabok jó alternatívának minősültek. A fémhabok közé tartoznak a szintaktikus fémhabok. Ezen anyagok, porozitásuk miatt kis sűrűség mellett képesek az iparban is elfogadható mechanikai tulajdonságokat produkálni, így szerkezeti anyagként is alkalmazhatóak. Emellett jó rezgés és energiaelnyelő, hőálló, gáz és folyadékzáró tulajdonságokkal rendelkeznek. Ez az anyagtípus kompozitnak tekinthető, hiszen a kívánt porozitást és a mechanikai tulajdonságok javítását a bennük alkalmazott üreges, kerámia gömbhéj részecskeerősítéssel érik el, zárt cellás haboknak tekinthetők.

Mind a mátrix, mind az erősítőanyag fajtája változtatható, az így kapott kombinációkkal különböző, ám jellegre hasonló tulajdonságú társított anyagot kapunk. Ezen anyagok felhasználása főleg a komoly előállítási költségek miatt egyelőre nem széleskörű, ám az elvégzett kutatások során történő egyre mélyebb megismerésük hozzájárul elterjedésükhöz.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszékének dolgozói és diákjai már évek óta foglalkoznak szintaktikus fémhabokkal, ebbe a kutatássorozatba illeszkedett az általunk elvégzett vizsgálatok is. Tudományos Diákköri dolgozatunk a szintaktikus fémhabok egy eddig kevésbé feltérképezett tulajdonságát vizsgálja: a nyomás hatására bekövetkező oldalirányban gátolt alakváltozást. Ez a felhasználás szempontjából igen fontos, hiszen a zártszelvény belsejébe töltött fémhab hasonlóan viselkedik. A szintaktikus fémhabok ilyen módon történő hasznosításával az üreges

gépelemek, alkatrészek, tartószerkezetek mechanikai tulajdonságai javíthatóak, kis tömegnövelés mellett érhető el beroppanás, törés és elhajlás szembeni stabilitásnövekedés.

Szakirodalmi áttekintés

Kompozit anyagról abban az esetben beszélhetünk, hogy ha egy adott mátrix anyagot, valamilyen erősítő anyaggal látunk el, amelyre adhéziós kapcsolat útján adja át a terhelést a mátrix anyag. Ez az erősítés lehet szál, felületi bevonat, lemezes, vagy részecske erősítés.

Az erősítőanyag és a mátrix között, átmeneti réteg keletkezik, amely a kettő anyag adhézióját valósítja meg, így rendkívül fontos, hogy megfelelően kialakuljon, a kompozit gyártása során. Munkánk során a részecske erősítésű kompozitokkal foglalkoztunk, ezen csoporton belül a szintaktikus fémhabokkal. Esetünkben a mátrix anyag alumínium és különböző ötvözetek voltak, az erősítő anyag pedig különböző kerámia gömbhéj volt. A kompozit tulajdonságait nagyban befolyásolja, a gömbhéjak és a mátrix anyag tulajdonságain kívül, a benne lévő gömbhéjak kitöltési aránya is. Hogy ez minél nagyobb értéket tudjon elérni, nyomásos infiltrálással lettek a próbatestek legyártva.

A fémhaboknak alapvetően kettő típusa van, a nyitott és a zárt cellás. Esetünkben zárt cellás fémhabokról beszélhetünk, ezt a csoportot tovább szűkítve, a szintaktikus fémhabokról. Oldalirányban gátolt alakváltozás melletti zömítéssel a szakirodalomban nagyon kevés cikk foglalkozott, mivel számunkra ezen kutatások a relevánsak, ezek eredményeit, megfigyeléseit foglalnám össze a következőkben.

Kiser és kutatótársai cikkükben [1], az általuk előállított szintaktikus fémhabok nyomóvizsgálataival foglalkoznak, különböző összetételű mátrix anyagok és különböző falvastagság(t)-sugár(R) arányú kerámia mikrogömbhéjak esetén. Két különböző mátrix anyagú fémhabot állítottak elő. Az első ~4-5 t% Cu-tartalmú alumíniumötvözetből (A201), a másik szintaktikus fémhab ~9-10 t% Si-tartalmú alumíniumötvözetből volt (A360). Az előállított szintaktikus fémhabokat hőkezelték is, egyik állapotuk a lágyított, a másik a T6 hőkezelt volt. A szintaktikus fémhabokat feszültég mentesítették.

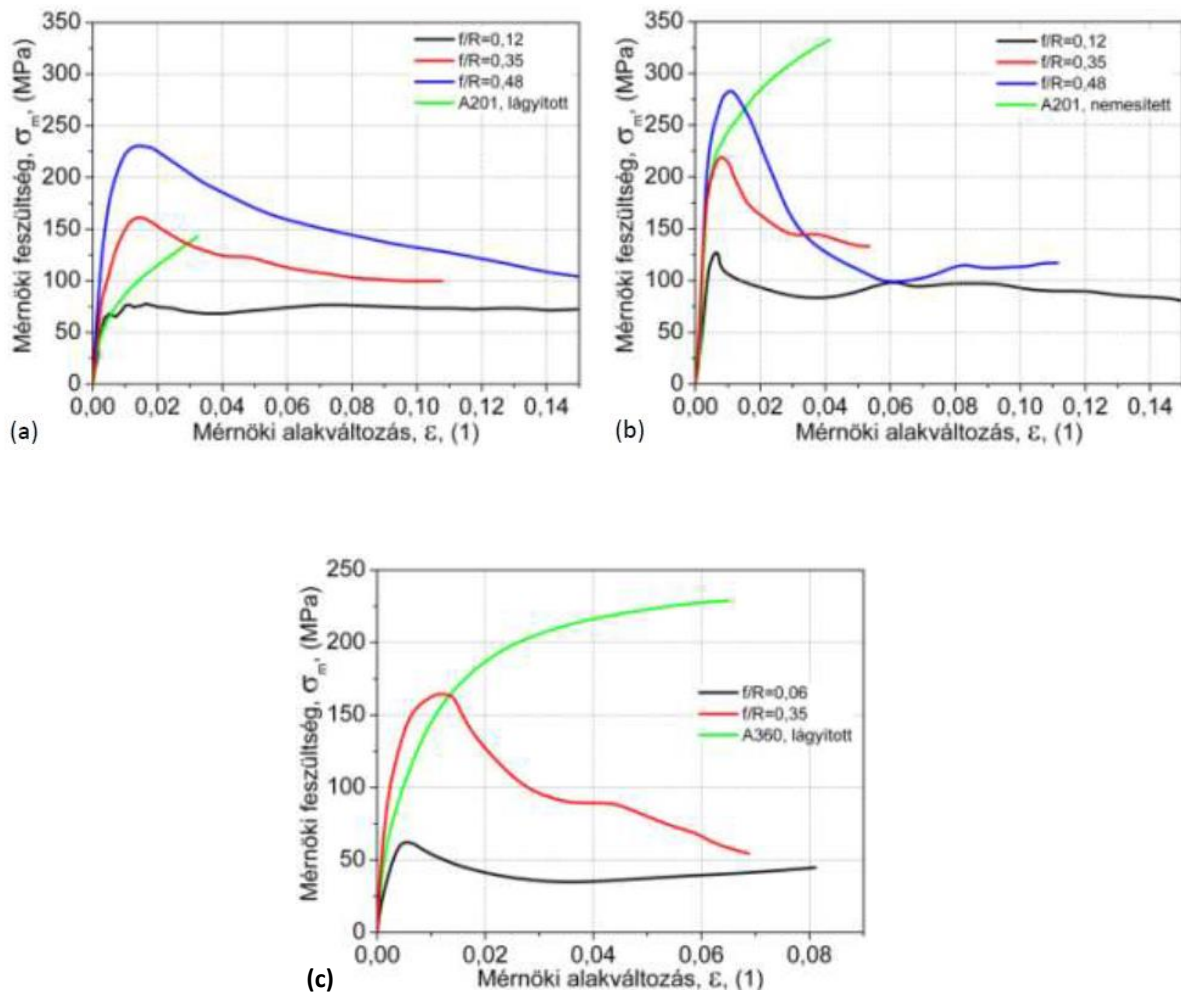
1. táblázat – Kiser és társai által felhasznált alapanyagok [1]

Mátrix anyaga	Gömbhéj anyaga	Kitöltési arány [tf%]	Gömbhéj átmérője [mm]	Gömbhéj relatív falvastagsága (t/R)
A201	Al ₂ O ₃	~55	1	0,12
			1,5	0,35
			2	0,48
A360		~60	1,5	0,06
			3,5	0,35

Próbatesteiken egy- és többtengelyű nyomóvizsgálatokat végeztek el. A többtengelyű feszültségállapotot egy fémgyűrű segítségével hozták létre, amely a nyomóvizsgálat során meggátolta a próbatest sugárirányú alakváltozását.

A nyomóvizsgálatoknál különösen fontos, hogy a próbatest és a nyomó lapok között megfelelő legyen a kenés. Kiser és társai ezt MoS_2 -vel oldották meg. Mivel porózus anyagok esetében a kenőanyag a pórusokba kerülhet, ezáltal megszüntetve a kenőhatást, összetett, réteges kenési módszert alkalmaztak (kenőanyag – vékony fémfólia – kenőanyag). A radiális alakváltozást gátló fémgyűrű belső felületén szintén MoS_2 kenést alkalmaztak.

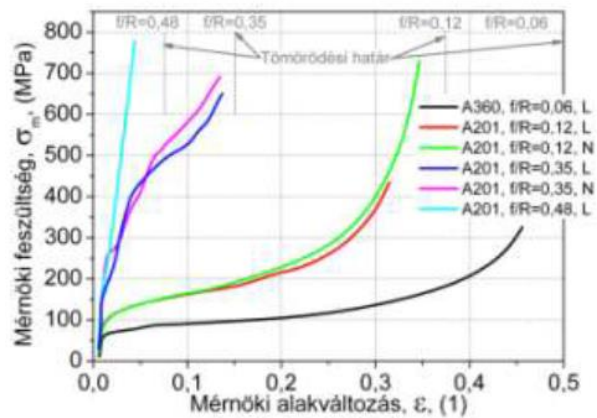
Az egytengelyű feszültségállapotban történő vizsgálatok során, a falvastagság arány (t/R) növekedésével a nyomószilárdság is folyamatosan nőtt, elég jelentős mértékben, akárcsak, a nyomószilárdsághoz tartozó alakváltozás és a rugalmassági modulusz is. A mikrogömbhéjak törése és az alakváltozás lokalizálódása a maximális feszültségű pontban történt meg, a terhelési irányra merőlegesen, vagy azzal $\sim 45^\circ$ -os szöget bezárva. A hőkezelés hatására, a fémhabok nyomószilárdsága csak kis mértékben változott, szemben a tiszta mátrix anyaggal, mely a hőkezelés hatására akár kétszeres tönkremeneteli feszültséget is elért. A szerzők szerint ennek oka az lehetett, hogy a Si oldódása ötvözőként módosíthatta T6-os hőkezelés paramétereit.



1. ábra - Lágított (a) és nemesített (b) állapotú A201 mátrix anyagú és lágított állapotú A360 mátrixanyagú (c) szintaktikus fémhabok és mátrixanyaguk mérnöki feszültsége a mérnöki alakváltozás függvényében [1]

A radiális irányban gátolt alakváltozás során nem történt meg a tönkremenetelhez tartozó képlékeny zóna lokalizálódása, a mikrogömbhéjak teljes térfogaton történő törése volt látható a vizsgálat után készített keresztmetszeti csiszolatokon.

A mérnöki feszültség-alakváltozás diagramok egészen más formát öltöttek. A t/R arány nem befolyásolta a görbe alakját, az alakváltozás növekedésével a feszültség monoton nőtt. A görbéknek nem volt lokális maximuma és a képlékeny alakváltozás kezdeténél sem történt feszültségesés. A radiális alakváltozás blokkolása nagyban hozzájárult, az alakváltozás stabilizáláshoz és az elnyelt energia növeléséhez. A próbatestek a tömörödési határhoz közelítve nagyjából ugyan akkora $\sim 65 \text{ Jcm}^{-3}$ energiát voltak képesek elnyelni. Ez az érték, közönséges alumínium fémhabokhoz hasonlítva közel ötszörös növekedést jelent. A hőkezelés hatása ebben az esetben is csekély volt.



2. ábra, Radiális irányban gátolt alakváltozású próbatestek mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás diagramjai (L=lágyított, N=nemesített) [1]

Az alakváltozás stabilitás és az energiaelnyelő képesség tehát nagyban függ a terhelés módjától. Ezen terhelés során tehát hasonló módon a közönséges fémhabokhoz, az alakváltozással együtt nőtt a feszültség, azonban az energia elnyelő képesség jelentősen nagyobb volt. A hagyományos, egytengelyű zömítés esetén az alakváltozás szűkebb térfogatra történő lokalizáltsága miatt, kisebb volt az energia elnyelő képesség. Ahogy elkezdett lokalizálódni az alakváltozás, lecsökkent a feszültség és emiatt a próbatest más részein nem deformálódott képlékenyen a továbbiakban. Ez okozta az energiaelnyelő képesség csökkenését. A gömbhéjak hiába növelték az alakváltozáshoz szükséges feszültséget, az alakváltozási képességet csökkentették.

Tao és Zhao is foglalkozott tanulmányukban [2] a szintaktikus fémhabok szabad és radiális irányban gátolt zömítő vizsgálataival. Mátrix anyagnak, az Al 6082 ötvözetét választották, míg mikrogömbhéjnak, tömegszázalék szerint ~60% SiO₂, ~40% Al₂O₃ and 0,4–0,5% Fe₂O₃ összetételűt választották. Szerkezetük szerint két különböző típusú gömbhéjat alkalmaztak. Az egyik üreges volt belül, a másik porózus szerkezetű. Az üreges gömbhéjak közel tökéletes gömbformát alkottak, üreges belsővel és szilárd külső héjjal. A porózus belső szerkezetű gömbhéjak belseje inkább szivacszerű struktúrát alkotott, néhány nagyobb póruossal és sok apróval. Az üreges és a porózus gömbhéjak porozitása egyaránt ~80% volt. Sűrűségük is közelítőleg egyezőnek tekinthető, 0,6 g/cm³.

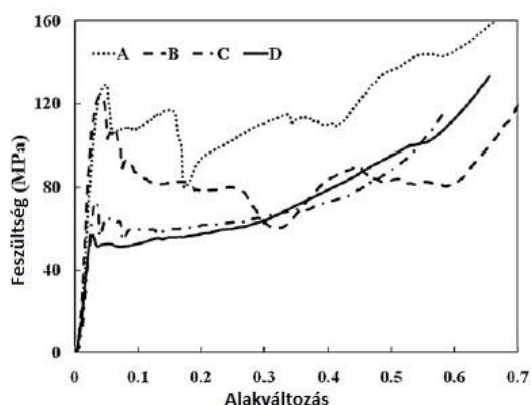
A gömbhéjakat négy mérettartományba sorolták be, melyek 20–75(I), 75–125(II), 125–250(III) and 250–500(IV) μm méretet fedtek le. 1000 minta alapján meghatározták a mérettartományokba eső üreges gömbhéjak százalékos értékét, melyek I, II, III és IV 98,2%, 90,5%, 32,2% és 2,0%.

2. táblázat – Tao és társa által felhasznált anyagok [2]

Fémhab jelölése	Mátrix anyag	Gömbháj típus
A	Al 6082	I
B		II
C		III
D		IV

A szintaktikus fémhabjaik tf % szerint 40 tf% mátrix anyag és 60tf% mikrogömbháj összetételűek voltak. Sűrűségük 1.40-1.45 g/cm³ közötti szűk tartományon belül helyezkedett el. A kész próbatesteken T6 hőkezelést hajtottak végre, amely 540°C-on 100 percen át tartó homogenizálásból és 180°C-on 10 órán át tartó öregítésből állt.

Zömítő vizsgálataikat egy Instron 4505 gépen hajtották végre, 1mm/perces keresztfej sebességgel. A vizsgálatokat hengeres alakú, 24mm hosszú, 19mm átmérőjű próbatesteken végezték. A radiális alakváltozást egy acélgyűrűvel oldották meg, melynek belső átmérője egyezett a próbatestek átmérőjével.

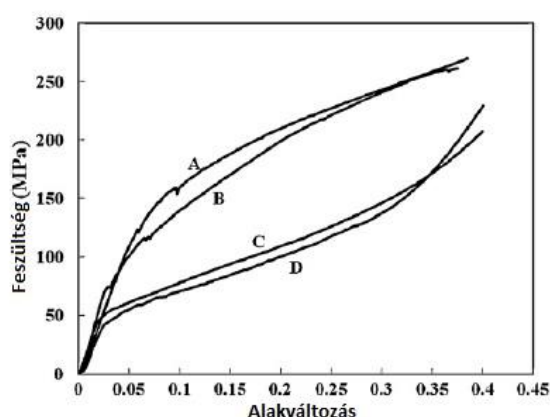


3. ábra – Mérnöki feszültség-alakváltozás diagram, szabad zömítés esetén [2]

A 3. ábrán látható, hogy mind a négy görbének van egy lineáris szakasza, melyet feszültségesés követ. A négy szintaktikus fémhab különböző karakterisztikát mutat, a plasztikus deformáció során. A és B anyagoknál jó néhány nagy és éles feszültség esés látható, melyek véletlenszerűen jelennek meg. A C jelű anyagnak néhány kisebb feszültség esése van a tönkremenetel kezdeti szakaszán, mialatt D viszonylag sima és egyenes tönkremenetelt mutat.

A próbatestek 0,2-es alakváltozásig lettek összenyomva.

A és B jelű szintaktikus fémhabban két pár nagyobb törés volt látható a vizsgálat után készült csiszolatokon. Az egyik pár a felső sarkoknál alakult ki, a másik az alsóknál, a nyomási kúpok alakjának megfelelően. A terhelés irányához képest 30°-os irányban álltak és a próbatest tetejétől a teljes hossz egy harmadánál találkoztak. C és D anyagoknál az alakváltozás többnyire plasztikus volt, a törött gömbhéjak egy határ régiót alkottak. Ennek ellenére a C jelű anyagban sok apró repedés volt, amivel radiális méretnövekedés is társult, a próbatest felső kétharmadában. A D esetében a középső részben volt megfigyelhető radiális méretnövekedés. Ezek a megfigyelések azt mutatják, hogy a feszültségesések egyértelműen a repedések megjelenése miatt történtek.



4. ábra – Mérnöki feszültség-alakváltozás diagram, radiális irányban gátolt zömítés esetén [2]

A 4. ábrán látható mérnöki feszültség-alakváltozási diagramon megfigyelhető, hogy az összes anyagnál van egy lineáris szakasz, ahol meredeken nő a feszültség, alacsony alakváltozás mellett. Ezt a szakaszt követi egy vízszintesebb szakasz, ahol az alakváltozás nő nagymértékben, kisebb feszültség növekedés mellett. A lineáris szakaszban rugalmas deformációt figyelhetünk meg, kismértékű plasztikus deformáció mellett, amit a mátrixban lévő pórusok kitöltődése okoz. A kevésbé meredek szakaszon a kerámia mikrogömbhéjak progresszíven beroskadnak, vagy eltörnek, ahogy nő a feszültség, ezzel utat adva a képlékeny alakváltozásnak. C és D anyagoknál egyértelmű határ van a rugalmas alakváltozási szakasz és a tönkremeneteli szakasz között, ezzel mutatva, hogy ezeknél az anyagoknál a gömbhéjak egy adott feszültségnél kezdenek el összeroskadni. A és B jelű haboknál a feszültség monoton nő, az alakváltozással együtt és a lineáris és a tönkremeneteli szakasz között fokozatos az átmenet. Néhány feszültségesés jelen van az átmenetkor, repedések keletkezését mutatva, bár ezek az esések kismértékűek. Ennek oka, hogy radiális irányban gátolva van az alakváltozás.

A próbatestek csak axiális irányban tudnak deformálódni. A két különböző típusú nyomóvizsgálat eredményeit az alábbi táblázat mutatja:

3. táblázat – A szabad és radiális irányban blokkolt nyomóvizsgálat eredményei [2]

Típus	A	B	C	D
<i>Gömbhéj mennyiség[%]</i>	60			
<i>Üreges gömbhéj mennyiség[%]</i>	98,2	90,5	32,2	2
<i>Gömbhéj méret[μm]</i>	20-75	75-125	125-250	250-500
<i>Nyomószilárdság[MPa]</i>				
<i>Szabad</i>	128,8	98	46	54
<i>Gátolt</i>	146	123,7	73	43

Összehasonlítva a két féle nyomóvizsgálat eredményeit, látható, hogy míg a szabad nyomó vizsgálatoknál, az A és B jelű anyagban nagy törések jelentek meg, a terhelési iránnyal 30°-ot bezáró szögben, addig gátolt nyomóvizsgálat esetén mindegyik progresszíven ment tönkre. A C és D jelű anyag esetében a tönkremenetel módja azért nem volt túlságosan eltérő a két féle nyomóvizsgálat esetén, mert gyengébb mikrogömbhéjakat tartalmaztak. Elmondható az is, hogy gátolt vizsgálatnál a tönkremenetelhez tartozó maximális feszültség minden esetben nagyobb volt, mint a nyomószilárdság, ellenben szabad zömítésnél, az A és B esetben a tönkremenetelhez tartozó maximális feszültség jóval alacsonyabb volt, mint a nyomószilárdság. Ez ismételtén annak tudható be, hogy az A és B anyagokban az erősebb mikrogömbhéjakat alkalmazták.

Orbulov értekezésében [3] foglalkozik szintaktikus fémhabokkal. Az ő eredményei azért is fontosak a mi munkánk szempontjából, mert az általa a tanszéken előállított, és vizsgált összetételű szintaktikus fémhabokkal foglalkoztunk mi is. Csak a szobahőmérsékleten mért, szabad zömítés során kapott eredményeit említem meg, így összevethetővé válik az általunk elvégzett radiális irányban gátolt és az ő szabad nyomóvizsgálatainak eredménye. Értekezésében, eltérően a többi szakirodalomban fellelhető tanulmánytól, a karcsúságot is alkalmazta mint geometriai paramétert, mivel befolyásolja a zömítő vizsgálatok eredményét. Kvázistatikus zömítő vizsgálatait egy Zwick 50 univerzális, számítógép-vezérelt, elektromechanikus anyagvizsgáló gépen végezte. A vizsgálat során állandó keresztfej-

sebességet tartott úgy, hogy a zömítés során a próbatest magasságának csökkenéséből adódóan változó alakváltozási sebesség integrálközepe 0,01 1/s legyen. A zömítéseket 50%-os mérnöki alakváltozásig végezte, hogy vizsgálható legyen a tönkremenetel módja, a károsodások és az elnyelt energia. Különböző karcsúságú próbatesteken végzett vizsgálatokat. A próbatestek átmérője 14 mm volt, és így az 1, 1,5 és 2 karcsúságnak megfelelő magasság értékek 14, 21 és 28 mm-re adódtak. Vizsgálatait végül más a szakirodalomból vett értékekkel vetette össze. [4-6].

4. táblázat - Nyomószilárdságok összevetése [3]

Szerzők	Mátrixanyag	Gömbhég átmérő[μm]/típus	Karcsúság	σ _{1max} [MPa]
<i>Rohatgi</i>	A356 (7% Si)	75-106 106-150	2	15 24
<i>Wu</i>	Al	92-150	1,5	70-44,8
<i>Dou</i>	Al	90-150		74,72-44,8
<i>Orbulov</i>	AlSi12	SL150		158
	Al99,5			177
		Al99,5	SL300	174

A vizsgált anyagokra, a feszültség-alakváltozás diagram, három jól elkülöníthető szakaszra volt felosztható. [3] Az I. szakaszban (A-tól B pontig) lineárisnak tekinthető a diagram, mely rugalmas alakváltozásra enged következtetni. Ezen szakasz meredeksége megfeleltethető a próbatest celluláris felépítéséből eredő szerkezeti merevségének. Mivel ezen a szakaszon csak rugalmas alakváltozás fordult elő a mikrogömbhajak sértetlenek maradtak.

A Ib. szakaszon (B-től C pontig) megindul a mátrixanyag képlékeny alakváltozása, erre a szintaktikus fémhabok nem kívánt porozítása mellett az ad lehetőséget, hogy a mikrogömbhajak nem a teljes térkitöltéssel vannak jelen a szintaktikus fémhabban (64 tf% az elméletileg lehetséges 74 tf% helyett).

A szakasz a lineáristól némileg elhajlik és a σ_{1max} és $\epsilon_{\sigma max}$ értékekkel rendelkező (az esetek többségében globális) maximummal ér véget. Az ezen a szakaszon történő maradó alakváltozás a néhány tizedmilliméteres nagyságrendbe esik.

A következő, II. szakasz ismét két részre osztható. A IIa szakaszon (C-től D pontig) a feszültség hirtelen, jellemzően mintegy 20-30%-kal visszaesik. Ekkor jelenik meg a próbatestben az első repedés, vagy törési sáv, amely rendszerint $\sim 45^\circ$ -os szöget zár be a

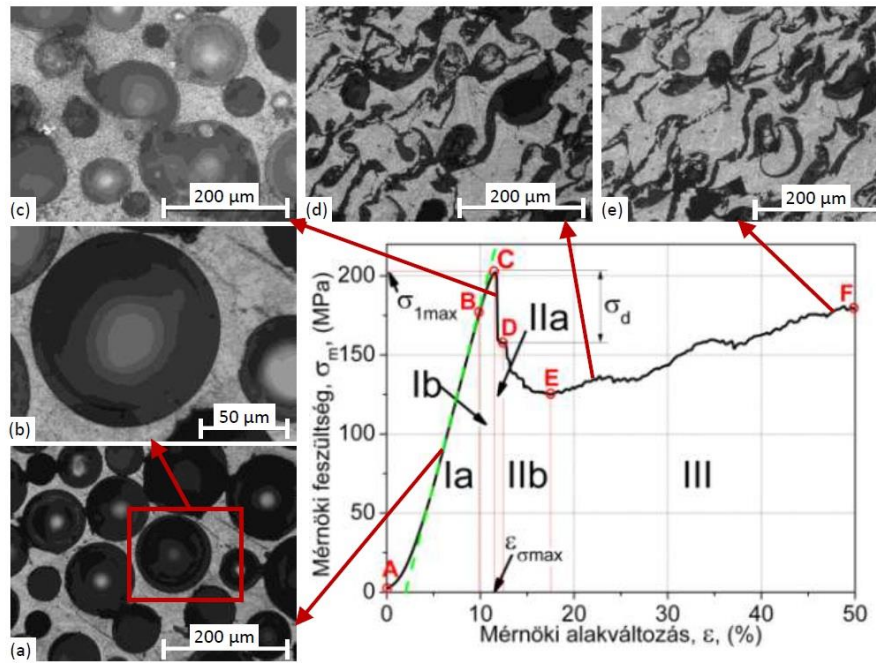
próbatest képzeletbeli tengelyével, vagyis a maximális csúsztatófeszültség síkjába esik, vagy függőleges a fellépő járulékos erők hatására. Előfordul a mikrogömbhéjak vízszintes síkban történő törése és tömörödése is. Az első törési zóna csupán néhány mikrogömbhéj vastag.

A IIb. szakaszon (D-től E pontig), a törési sáv (legyen az akár nyírásos, akár tömörödéses) vastagodni kezdett és egyre inkább kiterjedt. Megkezdődik a mikrogömbhéjak ellapulása, a próbatestek teljes porozitása csökken.

A III. szakasz mind közül a legváltozatosabb. Habár a próbatest már „tönkrement”, mivel egy jól definiálható repedéssel, vagy egy erősen összenyomódott sávval (esetleg mindkettővel) rendelkezik, ez a platós szakasz mégis fontos szerepet játszik, mert a szintaktikus fémhabok képesek a sérüléseket lokalizálni és a terheléseket más részeikkel felvéve további mechanikai energiát elnyelni, mivel a repedéstől eltekintve az összes többi rész megtartotta porózusságát és tovább terhelhető maradt. A III. szakaszra ez a viselkedés, vagyis a nagymértékű energiaelnyelés jellemző. A szakaszt elérve annak megfelelően, hogy a próbatesten hol jelent meg az első repedés, milyen volt az iránya stb. további repedések jelenhetnek meg. Az első repedés során keletkezett két próbatestfél egymáson elcsúszik, vagy megkezdődik a repedés mentén az egyik, vagy mindkét próbatest-fél „morzsolódása”. Az is előfordul, hogy az első törésből kiindulva újabb repedés keletkezik, második csúcsként jelentkezve a nyomóvizsgálati diagramban. A számos lehetőségnek megfelelően a III. szakaszban a felvett terhelés nőhet, stagnálhat, csökkenhet, vagy más módon változhat (a mérések alapján az esetek többségében nőtt vagy stagnált).

Ebben a szakaszban a tömörödött részekben végbemegy a mikrogömbhéjak teljes tömörödése és a mátrix alakváltozásával a mikrogömbhéjak közötti részek kitöltődnek a mátrixanyaggal.

A szintaktikus habok további jellemzője a teljes nyomóvizsgálatuk során elnyelt mechanikai energia mennyisége, ami arányos a nyomóvizsgálati görbe alatti területtel. [3]



5. ábra – Szintaktikus fémhabok tipikus nyomódiagramja (Al-SLG) [3]

Saját TDK dolgozatunk megírásához az itt részletezett kutatások adták az elsődleges támpontot.

Célkitűzés

Ahogy a bevezetőben leírtuk, dolgozatunk témája egy egészen újszerű megközelítése a szintaktikus fémhaboknak, ennek megfelelően kevés publikáció említ hasonló kutatást. Ezért az elsődleges cél a gátolt és szabad zömítés során tapasztalt eltérések feltárása.

- Első lépésként a gátolt nyomóvizsgálatok elvégzése volt a feladat, egy ezt lehetővé tévő szerszám összeállítás megkonstruálása mellett.
- Vizsgálataim során többféle összetételű próbatestet használtunk, a kapott eredményekből következtettünk:
 - a mechanikai tulajdonságok mátrix és erősítőanyag függésére,
 - valamint a nyomóvizsgálat során kapott diagramokat vizsgálva karakterisztikus jellemzőkre.
- Kétféle összetétel esetén a hőkezelés hatását is vizsgáltuk.
- A kapott adatokat összehasonlítottuk a korábbi kutatások, illetve az azonos anyagú szabad nyomóvizsgálatok eredményeivel.
- A zömített próbatestekről csiszolatokat készítettünk metallográfiai képek készítéséhez. E mikroszkópi képek alapján:
 - tönkremeneteli mechanizmusokat kerestünk,
 - a gömbhéjak sérülésállóságát vizsgáltuk.

Mérési eredmények

Ebben a fejezetben mutatjuk be a mérések és vizsgálatok eredményeit, azok magyarázatait, a jellemző képekkel és görbékkel alátámasztva.

Felhasznált anyagok

A szintaktikus fémhabok, mint minden társított anyag két elemből állnak: mátrix és erősítőanyagból, ezek mellett azonban nem elhanyagolható a köztük lévő átmeneti réteg sem. Mátrixanyagnak a tömegcsökkentés miatt leggyakrabban könnyűfémeket, jellemzően alumínium ötvözetet választanak, mert kis sűrűségük, jó mechanikai tulajdonságaik kis olvadásponttal és jó önthetőséggel párosul, megkönnyítve a gyártást. A Tanszéken előzőleg előállított és a mi vizsgálatainkhoz felhasznált próbatestek mátrixanyagai is alumínium és annak ötvözetek voltak (Al99,5, AlSi12, AlCu5, AlMgSi1).

A részecskeerősítésként alkalmazott kerámia gömbhéjakat több méretben és összetétellel, eltérő technológiával gyártják, azonban mindentől függetlenül elvárás a jó hőállóság és a kémiai stabilitás, hiszen a fémhab előállítás során használt olvadék reakcióképes. Munkánk során két gyártó termékeivel találkoztunk, az Envirospheres Pty. Ltd. E-spheres márkanévű SL150 és SL300, és a Hollomet GmbH cég Globocer típusú gömbhéjaival. [7.] [8.]

5. táblázat, a felhasznált kompozitok összetétele

Sorszám	Mátrixanyag	Erősítés	Hőkezelt
1	AlCu5	Globocer	
2	AlCu5	Globocer	igen
3	Al99,5	Globocer	
4	Al99,5	SL150	
5	Al99,5	SL300	
6	AlMgSi1	Globocer	
7	AlMgSi1	Globocer	igen
8	AlSi12	Globocer	
9	AlSi12	SL150	
10	AlSi12	SL300	

A gömbhéjak összetétele (fázis%-ban kifejezve):

6. táblázat, A gömbhéjak összetétele

Gömbhéj	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
<i>Globocer</i>	40	50	4	-
<i>SL150</i>	36-40	55-60	1,4-1,6	0,4-0,5
<i>SL300</i>	36-40	55-60	1,4-1,6	0,4-0,5

A nyomóvizsgálat körülményei

Mivel a szintaktikus fémhabok kimagasló energiae nyelő képességekkel bírnak, fő terhelésük a nyomás, mi is nyomó igénybevétel alá vetettük a vizsgált próbatesteket. A vizsgálatokat állandó keresztfej-sebesség mellett, a Tanszék anyagvizsgáló laboratóriumában felállított Tiratest 2300 típusú, 10 tonnáig terhelhető univerzális anyagvizsgáló gépen végeztük. A keresztfej állandó sebessége 2 mm/perc, a zömítések maximumterhelése 80 kN volt. A zömítéshez egy, a Tanszéken tervezett szerszámot használtunk (6. ábra).



6. ábra, A használt szerszám összeállítás



7. ábra, A zömítetlen próbatest

A szerszám egy 10 mm átmérőjű nyomórúd, egy furatot tartalmazó acélhenger és az ennek rögzítésére szolgáló egyszerű lezorító szerkezet volt. A hengerbe helyeztük bele a próbatesteket és rá a nyomórudat. A szerszám rögzítéséről gondoskodni kellett, hiszen meg kellett akadályozni, hogy a próbatest a szerszámot megemelve „kifolyjon” az alatt, hamis eredményt adva. A lezorításnak köszönhetően a szerszám a vizsgálat végéig a felfeküdt a sík lapra, így a próbatest alakváltozása valóban kizárólag oldalirányban gátolt módon ment végbe. A zömítés során gondoskodtunk az érintkező felületek megfelelő kenéséről, MoS_2 tartalmú anyagot használtam, mind a próbatest és a szerszám, mind a szerszám és a gép felfekvő felületeinél, így minimálisra csökkentve a súrlódás hatását. A vizsgálatokat szobahőmérsékleten végeztem. A próbatest kezdeti magassága 15 mm, átmérője 10 mm volt. (1,5-es karcsúság)

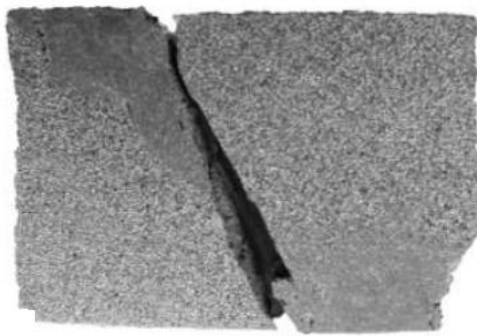
Az eredmények kiértékelésének első lépéseként a kapott erő- alakváltozás adatokat átváltottuk feszültség-mérnöki alakváltozás párokká, majd ezeket ábrázolva a nyomódiagramokból szereztük meg a legfontosabb információkat.

A nyomódiagramok anyagtípustól függetlenül rendelkeznek jellegzetes tulajdonságokkal. A nyomódiagram három részre osztható, egy kezdeti rugalmas alakváltozást mutató részből, egy folyáshatár elérését követő, maradó és rugalmas alakváltozást szenvedő közel lineáris, és egy exponenciális jelleget mutató befejező részből. A fémhabokat jellemzi a nyomószilárdságuk, szerkezeti merevségük, a rugalmas és teljes szakaszon elnyelt energia, utóbbi kettő a kapott görbék alatti területtel megegyező mennyiség.

A szintaktikus fémhabok károsodási módjai

Ahhoz, hogy lássuk, miben különböznek a gátolt zömítés eredményei, vázolom az egyszerű zömítés során tapasztalt tönkremeneteli módokat. Ha a fémhabot működő alkatrészként használjuk, már a geometriai torzulás is tekinthető tönkremenetelnek, amennyiben képtelen ellenállni az alkalmazás során őt érő terhelésnek. Ebben az esetben a nyomószilárdságra méreteznek. Mászt tekintünk tönkremenetelnek, ha energiaelnyelő szerepű fémhab alkatrészeket vizsgálunk. Az energiaelnyelés szempontjából mindaddig működőnek tekinthető az anyag, ameddig van ép gömbhéj, ami felvegye a helyi feszültségnövekedést.

A szintaktikus fémhabok zömítése során a gömbhéjak sérülése lokalizált, nem a teljes keresztmetszet mentén jelentkező folyamat. Az összeroppanások, elcsúszások nyomási kúp mentén jelentkeznek, a sérült részekről eltekintve az anyag ép marad, tehát az anyag képes a sérüléseket lokalizálni.



8. ábra, Fémhab tönkremenetele(AlSiSL300)[3]

A szintaktikus fémhabok tönkremenetelének három módja ismert. Az első során a próbatesten nyomási kúpok jelennek meg, amik mentén kialakuló törési sávon kívül épen maradnak a gömbhéjak.

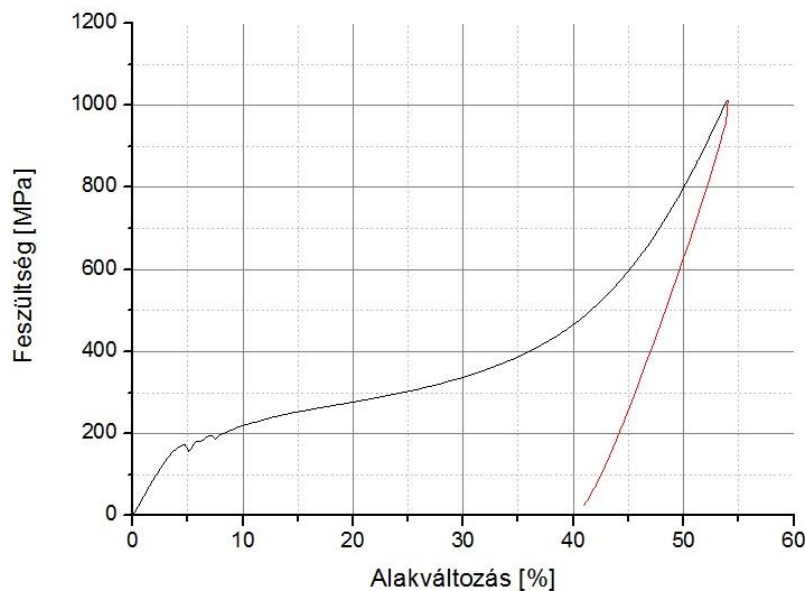
A második típus esetén a nyomás hatására a teljes keresztmetszet hosszában megjelenő törési sáv mentén a próbatest két fele elmozdul, ekkor nyírásos tönkremenetelről beszélünk.

A harmadik lehetséges mód a nyomási kúpok növekedése következtében hosszanti irányban a test több darabba hasadása.

Saját méréseink során, a használt szerszám gátolta az oldalirányú alakváltozást, így az esetleges nyírási síkok mentén bekövetkező elcsúszást is. Ennek köszönhetően a zömített próbatestek egy darabban maradtak, a komoly mértékű, minimálisan 34%, maximálisan 56%-os mértékű alakváltozás ellenére.

A nyomógörbe alakulása szintaktikus fémhabok esetén

Az ábrán egy általunk vizsgált AlSi12 mátrixú, SL300 gömbhéj erősítésű fémhab mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozás diagramján a felterhelés és a leterhelés látható, oldalirányban gátolt alakváltozás mellett.



9. ábra, AlSi12SL300

A felterhelés első szakasza lineáris képet mutat, mely során az anyag még nem szenved el maradó alakváltozást. Meredeksége utal az anyag szerkezeti merevségére, ami a felhasználás szempontjából mindenképp fontos jellemző. Az első szakasz elején látható nem lineáris részt figyelmen kívül kell hagyni, hisz ez csupán a szerszám és a gép beállása következtében jelent meg az ábrán.

A második szakasz elején bekövetkező hirtelen leeső feszültségnek a magyarázata az első repedések, törések, nyírási síkok megjelenése. Első lépésként a kisebb szilárdságú mátrixanyag szenved képlékeny alakváltozást, majd a gömbhéjak is betörnek. A fémhab porozitása csökken.

A harmadik, exponenciális jelleget mutató szakasz során a gömbhéjak összetöredezése, tönkremenetele tovább folytatódik, energiaelnyelés szempontjából a legjelentősebb. A korábban már jól kivehető törési sávokon kívüli, ép erősítésű részek felveszik a terhelést, további repedések képződnek. Legvégül a nyírási kúp oldala mentén elcsúsznak egymáson a

próbatest darabok. A szintaktikus fémhabok tönkremenetele során elnyelt energia mennyisége megegyezik a feszültség-alakváltozás görbe alatti területtel.

Természetesen a saját méréseim során a fémhab tönkremenetele más módon ment végbe, ezt a Fénymikroszkópi képek című fejezetben részletezni fogom.

Hőkezelés

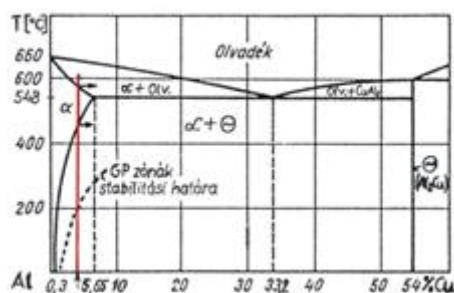
A képlékeny alakítás alapja az anyagon belüli vonalszerű rácshibák, a diszlokációk jelenléte, számuk minél nagyobb, annál jobban deformálható az anyag. Szilárdságnövelés során a diszlokációk mozgását gátolják.

Ha egy adott anyag szilárdságát kívánjuk növelni, többféleképpen járhatunk el, képlékeny alakítással, ötvözéssel és hőkezeléssel is elérhetjük a célt. Az alumínium szilárdsági tulajdonságait ötvözéssel és hőkezeléssel lehet megváltoztatni. A hőkezelés olyan eljárás, mely során szabályozott hőfokra történő hevítéssel, szabályozott idejű hőn tartással és előírt sebességű hűtéssel megváltoztatjuk a kristályszerkezetet, emiatt a szilárd halmazállapotú fém tulajdonságai változnak.

A hevítés során lassan kell a hőmérsékletet emelni, cél az anyag egyenletes áthevülése, el kell kerülni a nagy belső feszültségek ébredését, a repedések kialakulását. A hőn tartásnak az a célja, hogy a test teljes térfogatában elérje a kívánt hőmérsékletet, bekövetkezzen a várt szövetszerkezet változás. Hűtésnél szem előtt kell tartani a hőkezelt tárgy geometriáját, alakváltozásait, egyenletes hűlési sebességet kell biztosítani a test minden pontján, ellenkező esetben a szövetszerkezet is egyenetlen lesz.

Vizsgálatainkkal a T6-os hőkezelés hatását vizsgáltuk kiválasztott keményíthető mátrixanyagú fémhabok esetén (AlCu5, AlMgSi1). A kiválasztott keményedés során a szilárd oldatban, kristalliton belüli kemény vegyülettájak jelennek meg apró kiválások formájában, melyek akadályozzák a diszlokációk mozgását, így növelve az ötvözet szilárdságát. Ez a hőkezelés nemesítő hőkezelésnek minősül, ami edzés és megeresztés kombinációját jelenti. Az alumínium ötvözet homogenizálása során az ötvözet kiválásai eloszlanak, létrejön a homogén szilárd oldat. A gyors hűtés hatására nem keletkeznek

kiválások, a létrejövő ötvözőben túltelített szilárd oldatból megfelelő hőkezelés után létrejön egy erősen ötvözött fázis kiválása.



10. Alumínium-réz egyensúlyi ábra[9]

7. táblázat, A hőkezelés paraméterei

	Homogenizálás hőmérséklete (°C)	Homogenizálás időtartama (óra)	Megeresztés hőmérséklete (°C)	Megeresztés időtartama (óra)
<i>AlCu5</i>	520	1	170	14
<i>AlMgSi1</i>	520	1	170	14

Mikroszkópi vizsgálat

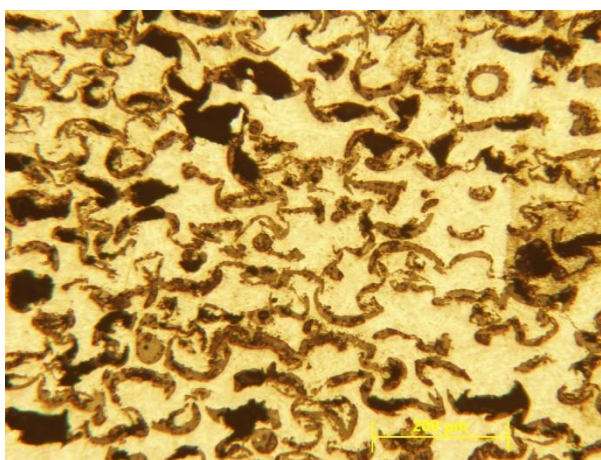
A zömített próbatesteket először elő kellett készíteni a mikroszkópi vizsgálatához. Ennek első lépése az Duracryl műgyantába történő beágyazás volt. A beágyazott mintákat ezt követően egy Buehler Beta típusú automatikus csiszoló-polírozó gépen, több lépésben készítettük elő. A lépések paramétereit a táblázatban foglaltuk össze.

8. táblázat, A csiszolás lépései

Abrazív anyag	Időtartam [perc]	Leszorító erő [N]	Forgási sebesség [1/min]	Forgásirány
<i>P320 SiC</i>	2	22	220	ellen
<i>6 μm gyémánt</i>	20	27	150	ellen
<i>3 μm gyémánt</i>	6	27	150	ellen
<i>0,05 μm SiO</i>	8	27	125	ellen

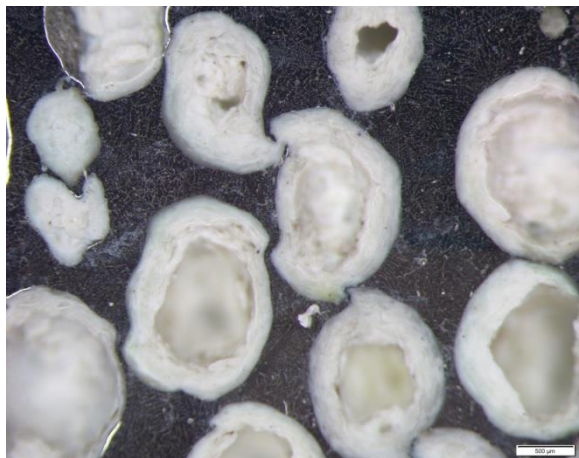
A SiC- tartalmú csiszolópapírral történő csiszolás közben a súrlódás következtében keletkező hő csökkentése miatt folyóvizes, a többi lépés alatt desztillált vizes csöpögtetést alkalmaztunk. A kapott felület minőségét minden fázis után ellenőriztük, csak akkor mentünk tovább a következő, finomabb szemcsés csiszolási lépésre, ha a csiszolat az aktuális csiszolóanyagtól elvárható állapotú volt. A minták felületét minden lépés között vízzel és alkoholos öblítéssel tisztítottuk, ultrahangos tisztítóberendezést használva óvtuk a kisebb szemcséjű polírozó posztókat az előző lépés durvább szemcséitől.

A vizsgálatokat két különböző mikroszkópon végeztük, a tanszék Olympus PMG3 típusú mikroszkópja a csiszolatok ellenőrzésénél, és elsősorban a kisebb méretű SL150 és SL300 típusú gömbhéjakkal társított anyagok esetén a tönkremenetel módjának vizsgálatánál használtuk.



11. ábra, SL150 részecskeerősítésű fémhab

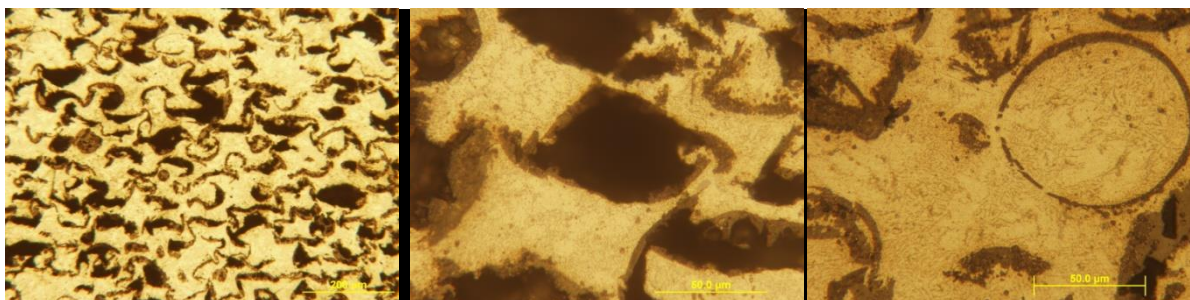
Az Olympus DP26 mikroszkóppal a csiszolatok teljes felületének vizsgálatát végeztük, és a nagyobb méretű gömbhéjas erősítést tartalmazó fémhabok szerkezeti változását vizsgáltuk.



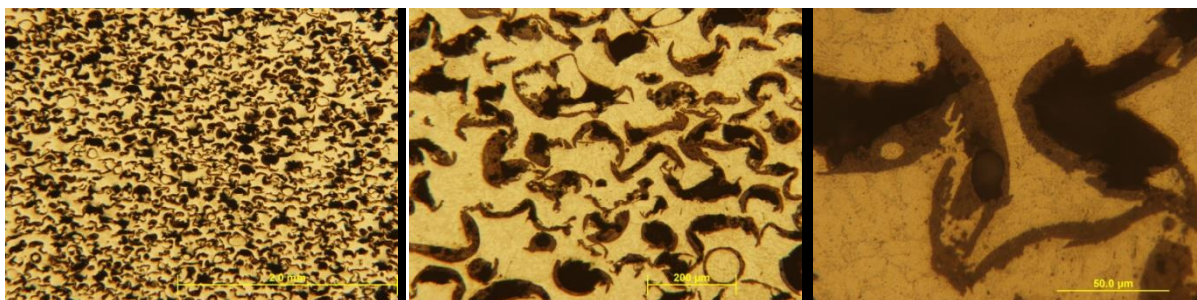
12. ábra, Globocer gömbhéj, AlCu5 mátrixban

Fénymikroszkópi képek

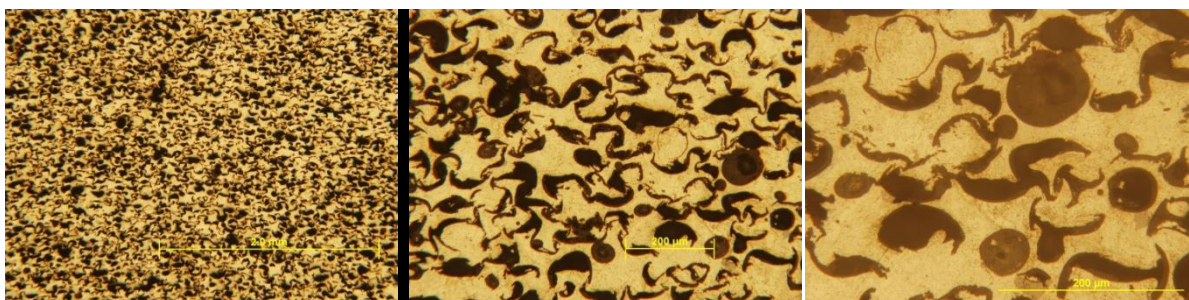
A már korábban említett módon előkészített mintákról készített képeken láthatjuk a különböző összetételű szintaktikus fémhabok zömítés utáni szerkezetváltozásait. A képeken jól látszik, hogy a kompozit előállítása során a nyomásos infiltrálás paraméterei megfelelőek voltak, zárványképződés nem jellemző, a gömbhéjak mátrixanyaggal való telítődése elhanyagolható mennyiségben, de jelen van. Ez csökkenti a kívánt porozitás mértékét, növeli a sűrűséget, ám a selejt gömbhéjak, kis számuk miatt nem befolyásolják érdemben az anyag viselkedését. Először a kis gömbhéjas erősítésű anyagokról készült képek:



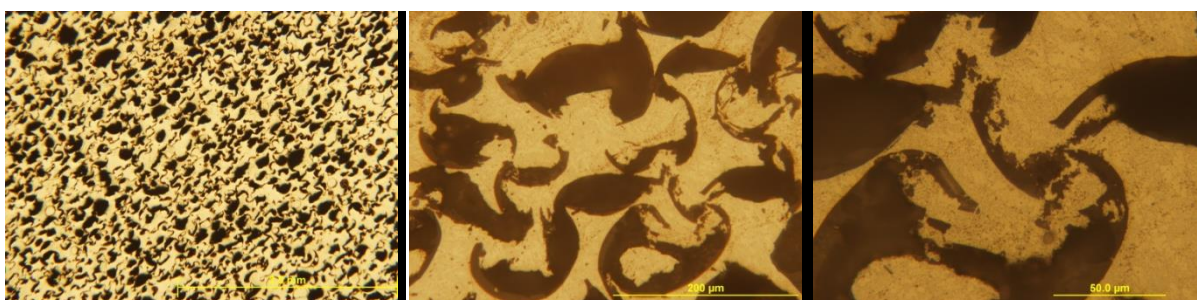
13. ábra, Al99,5-SL150 összetételű fémhab jellegzetes képei



14. ábra, Al99,5-SL300 összetételű fémhab jellegzetes képei



15. ábra, AlSi12-SL150 összetételű fémhab jellegzetes képei



16. ábra, AlSi12-SL300 összetételű fémhab jellegzetes képei

Ahogy a képeken látható, a teljes keresztmetszetben összetörték a gömbhéjak, a károsodás nem lokalizálódott. A gömbhéjak tönkremenetele nem mutat rendezettséget, nem utal nyomási kúpok, nyírási síkok megjelenésére. Az 13 és 15 ábrákon infiltrálás során mátrixanyaggal telítődött gömbhéjakat látunk, az SL150 gömbhéjaknál nagyobb számban fordul elő sérült darab. A szövetszerkezet is megfigyelhető a nagyobb nagyítású képeken, szilícium tartalmú ötvözeteknél láthatóak a kiválások. Kijelenthető, hogy SL150 és SL300 típusú gömbhéjakkal erősített fémhabok szerkezete között nem mutatkozik különbség.

A nagyméretű Globocer gömbhéjerősítésű fémhabok tönkremeneteli mechanizmusait kisebb nagyítás mellett célszerű vizsgálni, mivel e típus tagjainak tönkremenetele komoly mértékű hasonlóságot mutat, egy tetszőlegesen kiválasztott próbatesten mutatjuk be a jellegzetes változásokat.



17. ábra, AlCu5-T6 próbatest károsodása

A kis nagyítás mellett láthatóvá válik a teljes felület, ennek köszönhetően képet kapunk a próbatest zömülése során megjelenő tönkremeneteli módokról.

A nyomóvizsgálat során a próbatestekben nyomási kúpok alakultak ki, közel 45° -ot bezárva a nyomás irányával, amelyek palástja mentén törési sáv jelent meg, a csiszolatokon jól látható, az egy egyenes mentén összetört, elnyíródott gömbhéjak képe és a tömörödött struktúra.

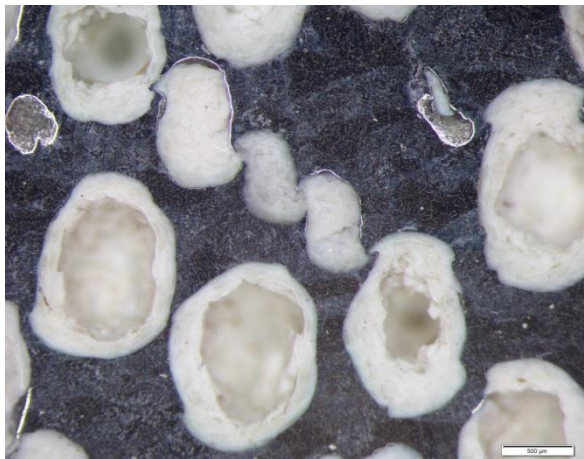
A nyírási kúpok között nem maradtak épek a gömbhéjak, a sérülés nem lokalizálódott, szemben a szabad zömítés során észlelt jelenséggel. Észrevehető, hogy a gömbhéjak nem kizárólag a kúpok mentén károsodtak, hanem a nyomott felületek közelében, szintén egy egyenes mentén, de a nyomás irányára merőlegesen jelent meg törési sáv. Egy próbatest sem szenvedett el hosszirányú nyírást, minden próbatest egyben maradt. Az energiaelnyelésben a gömbhéjak nagy százaléka részt vett, a csiszolat felületén látható gömbhéjak csupán 1-12%-a maradt ép. Meg kell jegyezni, hogy az SL gömbhéjas fémhabokkal szemben, ennél az erősítőanyagnál a fémhabok eltörésével nem telítődtek a gömbhéjak. Leggyakrabban két félbe törtek, egymáson elmozdultak, de a két fél megtartotta formáját, ennél az energiaelnyeléshez kisebb részben járult hozzá a mátrixanyag megfolyása, hiszen nem töltötte ki a rendelkezésre álló teret, és nem telítette a keletkező üregeket.

A következő jelenségek mátrixanyagtól függetlenül jellemzőek voltak a próbatestekre.

A 18. és 19. ábrán látható, hogy a gömbhéjak a nyírási sáv mentén nagyon látványosan törtek, valamint egyszerre látható épen maradt, éppen megrepedt, kis mértékben és teljesen deformálódott gömbhéj. A 20. ábrán látható, ahogy a feszültség hatására a mátrixanyagban elinduló repedés egészen a következő gömbhéjig terjedt, ahol a gömbhéj átvette a terhelést, majd beroppanásával elnyelte az energiáját, a repedés megállt. Ez a kompozit anyag három elemének jó működését mutatja, ahol a közvetlenül a mátrixanyagot érő terhelést az elvezeti a felületről, az erősítés átveszi, amit az átmeneti rész lehetővé tesz.

Elvétve, de ennél a gömbhéjnál is előfordult infiltrálás során sérült és telítődött gömbhéj, erre látunk példát a 21. ábrán. A telítődött gömbhéj belső oldalán megjelenő repedés a

mátrixanyag képlékeny alakváltozását is mutatja. Nagyobb nagyításon láthatóvá válik az ötvözet szövetszerkezete. (22. és 23. ábra)



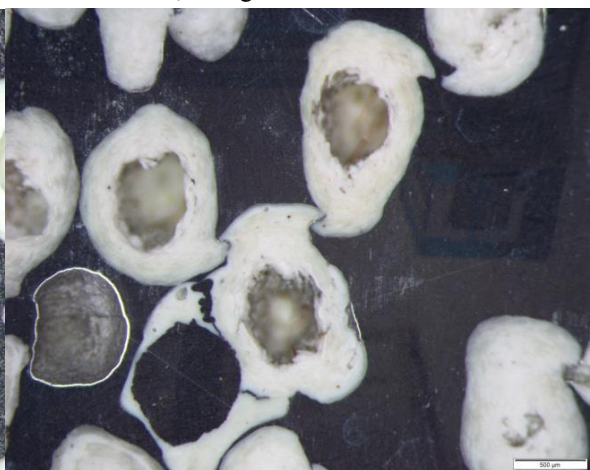
18. ábra. AlCu5 mátrixú fémhab



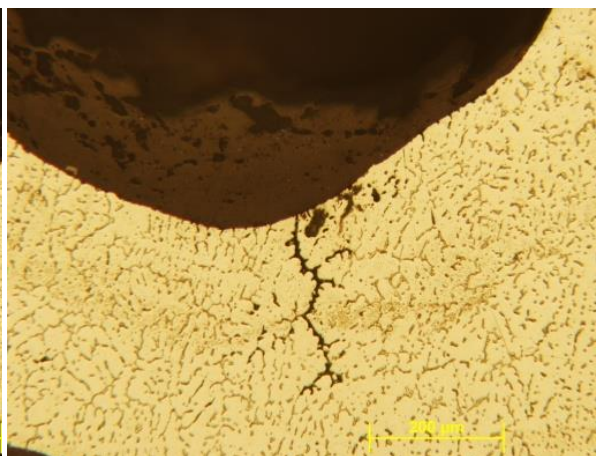
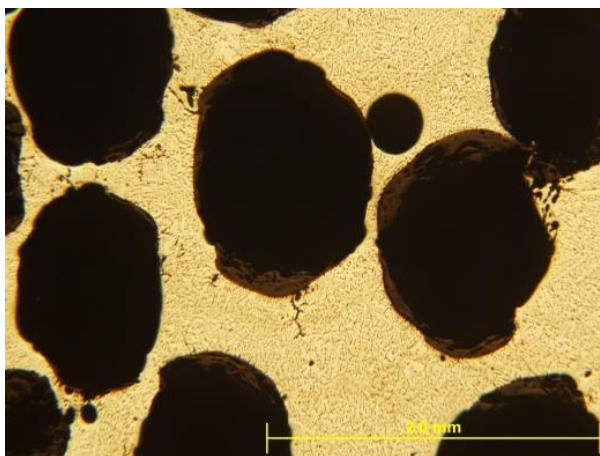
19. ábra, AlMgSi12 mátrixú fémhab



20. ábra, AlMgSi-T6 mátrixú fémhab



21. ábra, AlSi mátrixú fémhab



22. és 23. ábra, AlCu5 mátrixú fémhab

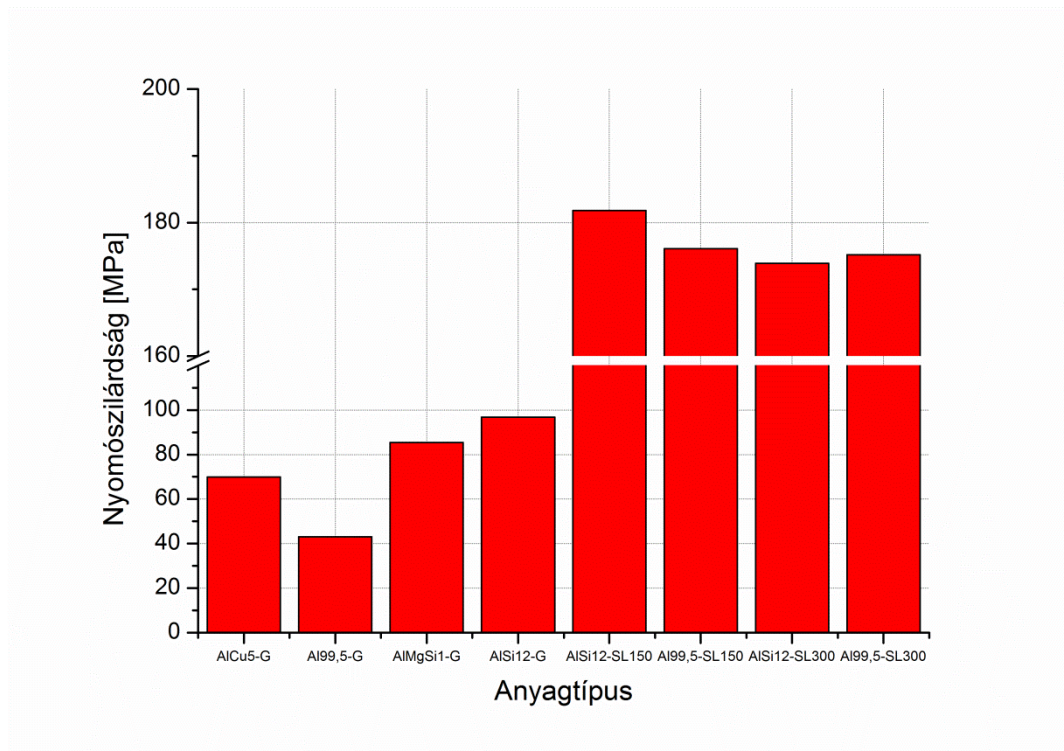
Nyomószilárdság

A nyomószilárdság az a feszültségérték, amely mellett még nem következik be maradó alakváltozás. Ez a feszültség-alakváltozás diagramról leolvasható, annak első csúcsa. Az ezen feszültséghez tartozó alakváltozás a törési alakváltozás.

9. táblázat, A nyomószilárdság anyagfüggése

Anyagtípus	Nyomószilárdság[MPa]	Törési alakváltozás[%]
<i>AlCu5-G</i>	69,86	2,45
<i>AlMgSi1-G</i>	85,38	3,12
<i>Al99,5-G</i>	43,09	3,49
<i>AlSi12-G</i>	96,81	3,47
<i>Al99,5-SL300</i>	175,17	4,49
<i>AlSi12-SL300</i>	173,88	4,73
<i>Al99,5-SL150</i>	176,11	4,52
<i>AlSi12-SL150</i>	181,8	4,92

A nyomószilárdság nagyságát befolyásolja az erősítő gömbhéj mérete, és a mátrixanyag szilárdsága. Kisebb gömbhéj esetén adott térfogatra több darab jut, mint nagyobb méretűből, ez azt eredményezi, hogy az ébredő feszültség többfelé oszlik, így a gömbhéjnak fajlagosan kisebb terhelést kell elviselni, emiatt később, nagyobb feszültség hatására következik be a törés. Ez a szignifikáns különbség jól látszik a diagramon.



24.ábra, A nyomószilárdság anyagfüggése

Az eltérő mátrixanyagok vizsgálata során kapott eredmények oka a képlékeny alakváltozás hamarabb történő bekövetkezése, amely miatt a mátrix már nem támasztja meg megfelelően a gömbhéjakat, így ebben a tekintetben a kisebb szilárdságú mátrixanyag hátrányosan befolyásolja az eredményeket. Legkisebb értékkel az Al99,5 mátrixú anyagok rendelkeznek, míg a szilícium tartalmú ötvözetek gömbhéjfajtától függetlenül a legjobb tulajdonságúak.

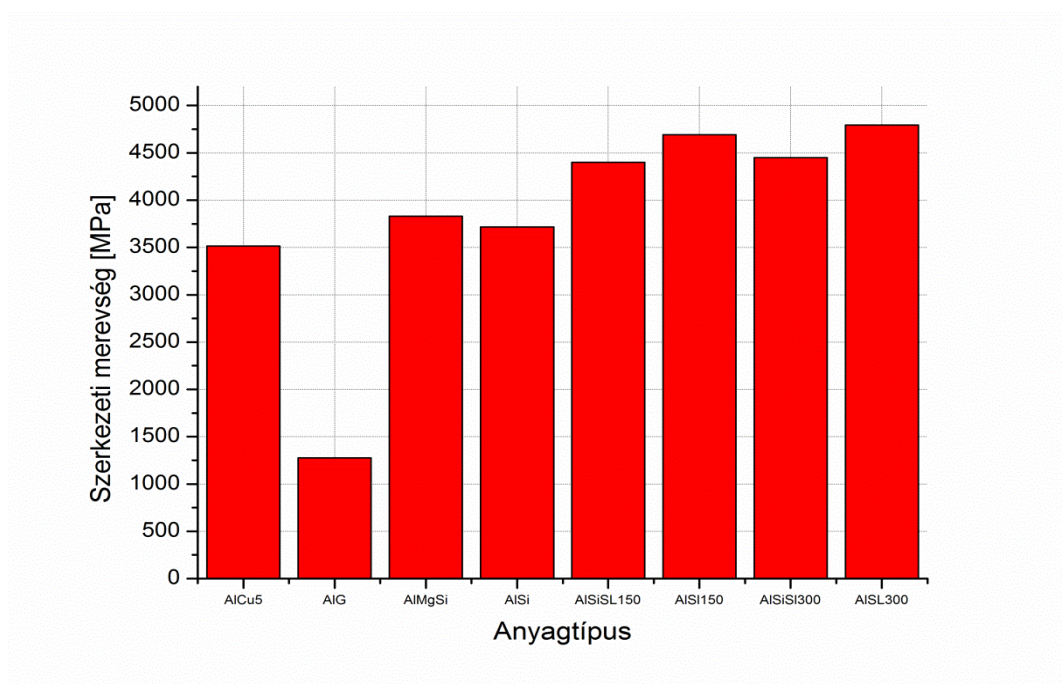
A törési alakváltozás értéke SL150 és 300 típusú gömbhéjak alkalmazása mellett volt nagyobb, ezek esetén elhanyagolható szórású adatokat kaptunk, ami azt mutatja, hogy erre a tulajdonságra az erősítésnek van döntő befolyása.

A szerkezeti merevség

	Szerkezeti merevség [MPa]
<i>AlCu5-G</i>	3515,413
<i>Al99,5-G</i>	1275,889
<i>AlMgSi1-G</i>	3831,761
<i>AlSi12-G</i>	3717,566
<i>AlSi12-SL150</i>	4399,296
<i>Al99,5-SL150</i>	4693,382
<i>AlSi12-SL300</i>	4449,142
<i>Al99,5-SL300</i>	4792,817

10. táblázat, A szerkezeti merevség értékei

Ezen mechanikai tulajdonság terén is erősebbnek bizonyosodnak az SL150 és SL300 gömbhéj erősítésű fémhabok a nagyobb méretű gömbhéjaknál. Leggyengébb a tiszta alumínium mátrix, Globocer részecskeerősítés kombináció, szerkezeti merevség értéke kiugróan alacsony. Meglepő, a legnagyobb értékeket ugyanezen mátrixba ágyazott SL300-as és SL150-es részecskeerősítésű fémhabok produkálták. Az általunk vizsgált próbatetek egységesen 1,5 H/D viszonytal rendelkeznek. Mivel ugyanaz a mátrix volt más erősítőanyaggal kombinálva, kijelenthető, hogy a szerkezeti merevség mértéke elsősorban a gömbhéjakon múlik.



25.ábra, A szerkezeti merevség anyagfüggése

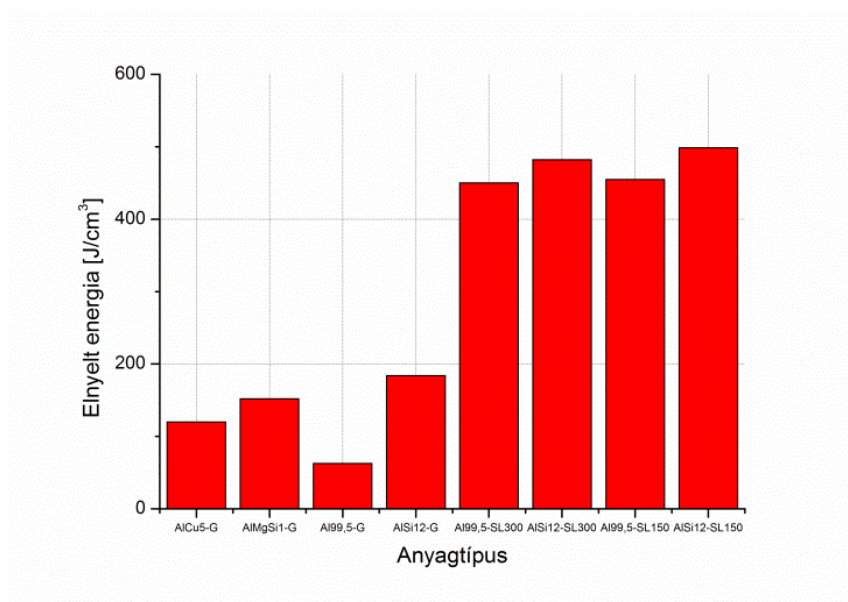
A zömítő vizsgálat során elnyelt energia nagysága

A következő vizsgált tulajdonság az elnyelt energia alakulása volt. Először a rugalmas alakváltozás során elnyelt energia változását vizsgáltam, ami lényeges, a felhasználhatóságot érintő tulajdonság. Csillapító berendezések esetén, ismétlődő igénybevételnél ez az érték megadja, mi az a feszültség, ami még nem okoz maradó alakváltozást az alkatrészben, megtartva így a kezdeti tulajdonságait.

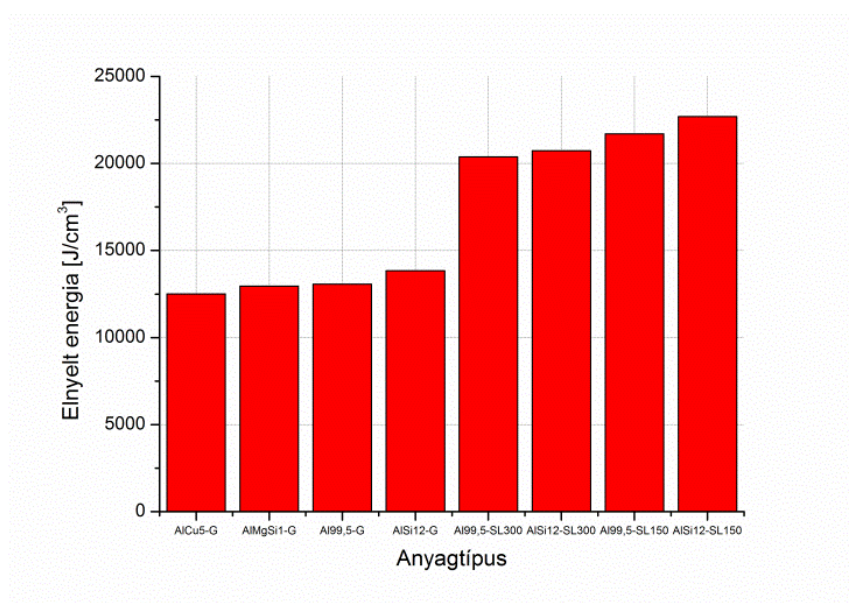
11. táblázat, Az elnyelt energia értékei

	Anyagösszetétel	Rugalmasan elnyelt energia[J/cm³]	Elnyelt energia[J/cm³]	Alakváltozás (%)	Maradó alakváltozás (%)
1	<i>AlCu5-G</i>	119,99	12509,129	34,97	19,23
2	<i>AlMgSi1-G</i>	151,81	12958,621	35,12	19,08
3	<i>Al99,5-G</i>	62,63	13066,202	37,94	20,25
4	<i>AlSi12-G</i>	183,93	13841,956	35,64	19,53
5	<i>Al99,5-SL300</i>	450,25	20386,022	53,28	45,82
6	<i>AlSi12-SL300</i>	481,93	20728,332	54,04	47,57
7	<i>Al99,5-SL150</i>	454,9	21696,075	56,6	50,1
8	<i>AlSi12-SL150</i>	498,45	22694,994	56,5	49,33

A kapott eredmények alapján a próbatestek két csoportba oszthatóak, kisebb(5-8), és nagyobb gömbhéjú(1-4) kompozitokra. Kijelenthető, hogy a második csoportba tartozó (kisebb gömbhéj méretű(SL150,SL300) erősítést tartalmazó) habok rugalmas alakváltozásuk során 4-7-szer több energiát nyelnek el, mint társaik. A mátrixanyag befolyását vizsgálva látszik, hogy a technikai tisztaságú alumínium képes a legkevesbé növelni az elnyelt energia mennyiségét, a leggyengébb eredményt a technikai tisztaságú alumínium-Globocer társítású fémhab ért el, a többi, azonos erősítésű anyaghoz képest is fele annyi energiát nyelt el a kezdeti szakaszon. Az ötvözetek közül gömbhéj mérettől függetlenül az AlSi12 mátrixú anyagok rendelkezett a legjobb tulajdonságokkal,

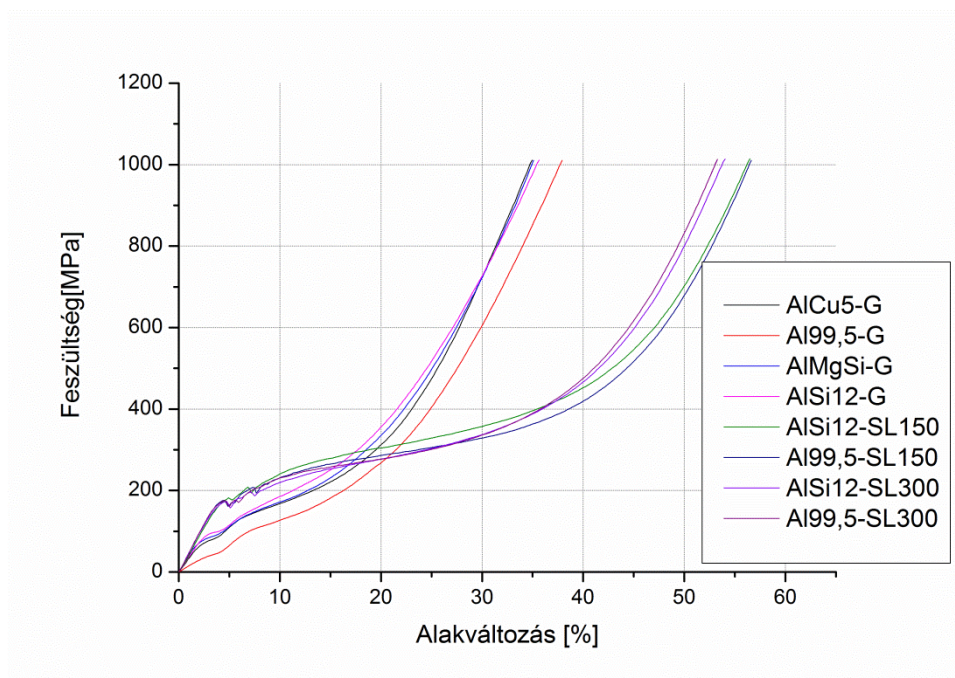


26.ábra, A rugalmas alakváltozás során elnyelt energia



27.ábra, A teljes elnyelt energia

A rugalmas alakváltozás után megnéztük a teljes alakváltozás során elnyelt energia nagyságát. A teljes görbe kiintegrálása során is megjegyezhető a kis gömbháj méretű erősítés előnye, az ezzel erősített próbatestek a vizsgálat során közel kétszer annyi energiát nyeltek el. Az Al99,5-G kompozit teljes energiaelnyelése nem üt el a többi Globocer gömbháj erősítésű anyagtól.

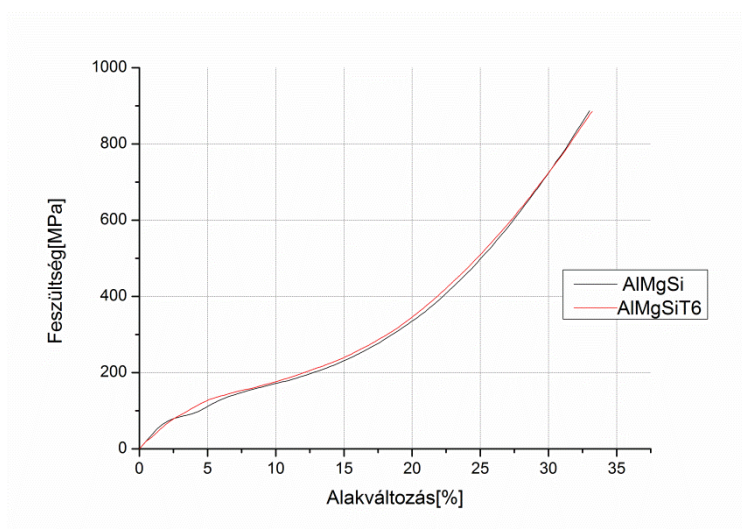


28. ábra, Az összes vizsgált kompozit jellemző nyomódiagramja

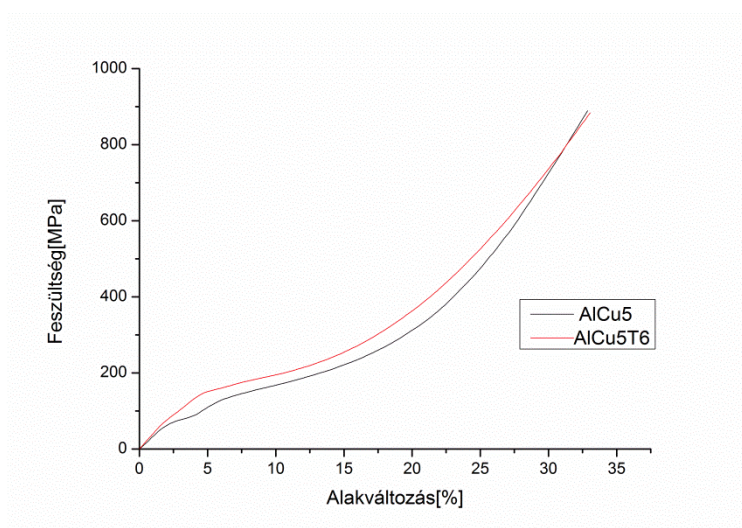
Érdekes, hogy a próbatestek magassága a nyomóvizsgálat végén, a terhelés megszűnte után eltérő mértékben változott. Az első csoportba tartozó próbatestek alakváltozásuk közel 50%-t, míg a második csoport elemei csupán 8-9%-át kompenzálták. Ezt magyarázza a gömbhéjak tönkremenetele. A Globocer erősítésű kompozit anyagok mikroszkópi képein jól látható, hogy ha a gömbhéj meg is repedt, nem roppant össze teljesen, ellentétben a kis gömbhéj erősítésű darabokkal, amelyek képtelenek további feszültség elnyelésére.

A hőkezelés hatása az energiaelnyelő képességre, a nyomószilárdságra, és a szerkezeti merevségre

A két kiválósan keményedő mátrixanyagú próbatest esetén a hőkezelés hatása az alakváltozás mértékét nem, de az alakváltozás közben elnyelt energia mértékét befolyásolta. A hőkezelt AlMgSi1 mátrixú próbatest zömítése során 3%-kal több energiát nyelt el, ami nem jelentős különbség, így kijelenthető, hogy ennél a mátrixanyagnál a hőkezelés hatása nem jelentős radiálisan gátolt zömítés során az elnyelt energia mennyiségére.



29.ábra, AlMgSi nyomógörbe változása

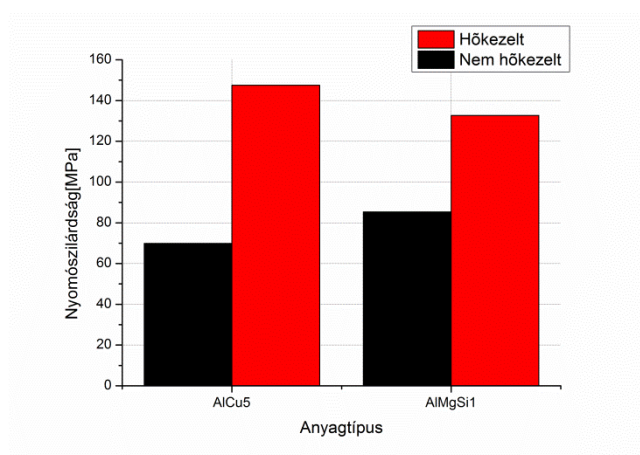


30.ábra, AlCu5 nyomógörbe változása

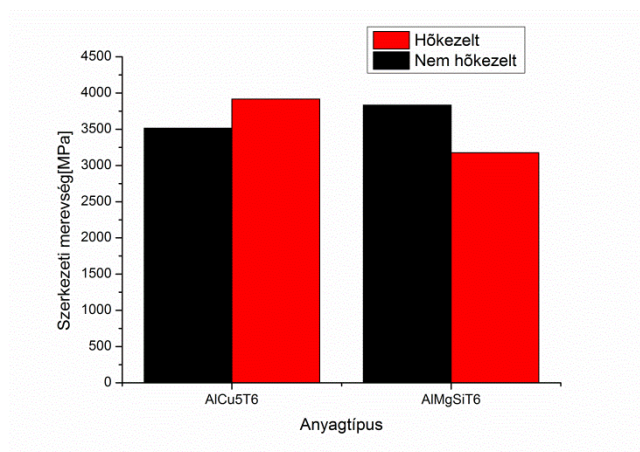
A másik vizsgált kiválósan keményített ötvözet esetében is javul az energiaelnyelő képessége hőkezelt állapotában, azonban az AlCu5 mátrixú fémhab 12%-kal nyelt el több energiát, ami már jelentős különbség.

12. táblázat, A hőkezelés hatása

	Elnyelt energia		Nyomószilárdság	
	Hőkezeletlen eset [J/cm ³]	Hőkezelt eset [J/cm ³]	Hőkezeletlen eset [MPa]	Hőkezelt eset [MPa]
<i>AlCu5</i>	10515,14	11737,66	69,86	147,48
<i>AlMgSi1</i>	10970,43	11366,21	85,38	132,68



31. ábra, a hőkezelés hatása a nyomószilárdságra



32. ábra, A hőkezelés hatása a szerkezeti merevségre

A nyomószilárdság értékeit a hőkezelés jelentős mértékben megnövelte. AlCu5 esetében a növekedés több mint kétszeres, az AlMgSi1 ötvözet hőkezelés utáni nyomószilárdsága több, mint az eredeti másfélszerese volt. A hőkezelés számottevően befolyásolta ezt a tulajdonságot.

A hőkezelés hatása a szerkezeti merevség esetén nem egyértelmű. Míg az AlCu5 ötvözetnél javította, AlMgSi1 esetén jelentős mértékben csökkentette azt.

Összegzés

Kijelenthető, hogy a radiális alakváltozásában gátolt módon zömített próbatestek tulajdonságai különböznek az egyszerű nyomóvizsgálatnál tapasztaltakkal.

A saját méréseink nyomószilárdság értékeit összevetve a korábbi kutatások során azonos kompozit anyagok használatával kapott értékekkel, az látható, hogy a nyomószilárdságra nincs hatással az oldalirányú alakváltozás gátlása. Ennek oka, hogy a nyomószilárdság a legkisebb maradó alakváltozást okozó feszültség értéke. Ennél a feszültségnél még nem jelentkeznek a nyírási síkok, nincs nagymértékű deformáció, amit megakadályoznánk, tehát ilyen szempontból a gátolt és nem gátolt zömítés ekvivalens.

A szerkezeti merevség értékekre már hatással van az alakváltozás gátlása, a hasonló anyagok szabad nyomóvizsgálatához képest jelentősen, másfélszer nagyobbak a saját értékeink. Ennek oka a hordósodás megakadályozása, ami miatt a feszültség értékek gyorsabban nőnek, kisebb alakváltozás mellett.

A legfontosabb tulajdonság, az energiaeinyelés szempontjából igazán szembetűnő a gátolt alakváltozás mellett zömített próbatestek előnye. A mért értékek többszörösei voltak a szakirodalomban leírt azonos összetételű és karcsúságú próbatestek szabad nyomóvizsgálatai során kapott energiamennyiségnek. Ezt magyarázza, hogy a gömbhéjak túlnyomó többsége részt vett az energiaeinyelésben, nem lokalizálódott a sérülés, így közel azonos alakváltozás mellett volt képes az energia 7-8-szorosát elnyelni.

Az energiaeinyelés magyarázata a tönkremeneteli módokban keresendő. A szakirodalomban leírt tönkremeneteli mód közül annak csak az első stádiuma, a nyomási kúpok mentén bekövetkező gömbhéj összeroppanás volt megfigyelhető saját próbatesteimen, azonban innentől egy új módon ment végbe a tönkremenetel. A sérülés nem lokalizálódott, nem csak a nyomási kúp palástján törtek a gömbhéjak, hanem azon belül is, és egy új törési sáv is megjelent, a nyomott felületek közelében, merőlegesen a nyomás irányára. Minden próbatest egyben maradt, alakváltozás során a szerkezet veszített porozitásából, tömörödött.

Összességében kijelenthető, hogy az energiaeinyelő tulajdonság kiugró javulása miatt indokolt a fémhabok üreges alkatrészekben történő használata. A szerkezet merevsége ezzel kis tömegnövekedés mellett javítható.

További kutatások témája lehet a radiális alakváltozásában gátolt próbatestek nyomóvizsgálata a hőmérséklet változásának függvényében. A kutatás megmutatná, hogy szobahőmérsékletet meghaladó hőmérsékleten üzemelő gépelemekként is rendelkezik-e az anyag az előbbieken leírt tulajdonsággal, ezzel tovább bővíthető a fémhabok felhasználási köre.

Források

1. M. Kiser, M.Y. He, F. W. Zok, The mechanical response of ceramic microballon reinforced aluminium matrix composites under compressive loading, Materials Department, *University of California*, 1999
2. X.F. Tao, Y.Y. Zhao, Compressive failure of Al alloy matrix syntactic foams manufactured by melt infiltration, *School of Engineering, University of Liverpool*
3. Dr. Orbulov Imre, Szintaktikus fémhabok, *PhD értekezés*, 2009
4. Wu GH, Dou ZY, Sun DL, Jiang LT, Ding BS, He BF Compression behaviors of cenosphere-pure aluminum syntactic foams *Scripta Materialia* 56 (2007)
5. Rohatgi PK, Kim JK, Gupta N, Alaraj S, Daoud A, Compressive characteristics of A356/fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration technique *Composites Part A: Applied science and manufacturing* (2006)
6. Dou ZY, Jiang LT, Wu GH, Zhang Q, Xiu ZY, Chen GQ High strain rate compression of cenosphere-pure aluminum syntactic foams *Scripta Materialia* 57 (2007)
7. EnviroSpheres Pty. Ltd. <http://www.envirospheres.com/espheres.htm>
8. Hollomet GmbH <http://www.hollomet.com>
9. http://www.att.bme.hu/oktatas/BMEGEMTAGM3/letoltes/20131008_Szilardsagnovelesi_%20eljarasok.pdf (2013.10.10.)