

Fémhabok, porózus fémanyagok előállítása és tulajdonságai*

Németh Árpád¹ – Orbulov Imre Norbert²

Kulcsszavak: porózus fémek, habosított fém, szivacs szerkezet, energia-elnyelés, csillapítás
Keywords: porous metals, foamed metal, porous structure, energy absorbing, damping

Összefoglalás

A fémhabok speciális anyagok cellás szerkezettel, kis sűrűséggel, kedvező fajlagos mechanikai és különleges termikus tulajdonságokkal. Ha a természet könnyű, nagy szilárdságú szerkezetet akar létrehozni, cellás szerkezetű anyagokat használ (például emberi csontszövet, 1. és 2. ábra). Kis sűrűségük lehetővé teszi könnyű alkatrészek gyártását, amelyek egyben gazdaságosabbak is. A fémhabokat energia-elnyelésre és általában ott használják, ahol kis súlyra és nagy merevségre van szükség, pl. a járműgyártásban. Manapság több módszerrel állítanak elő porózus fémeket. A cikk célja, hogy bemutassa az alapvető gyártási módszereket és a fémhabok tulajdonságait, valamint a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék (ATT) Fémes Kompozitok Laboratóriumának ilyen irányú munkáját.

Summary

Production of metal foams, porous metals and their properties. Metal foams are special materials with cellular structure, low density, advantageous specific mechanical- and special thermal properties. If the nature wants to build a high strength structure, it

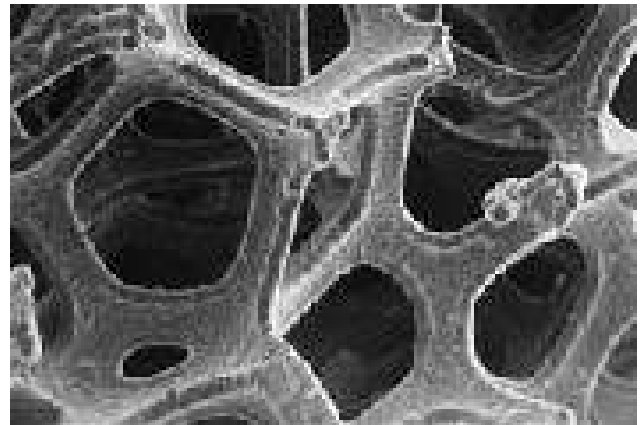
uses cellular materials (for example human bone-tissue, Fig. 1 and 2). Their low density allows to make light components which are more economical. Metal foams are used for energy absorbing applications and, in general, where low weight and high stiffness are required, e.g. in the transport industry. Nowadays many ways are known to produce porous metals. The aim of this article is to present the main methods and the properties of metallic foams, and also to present the research work done on this field by the Metal Matrix Composite Laboratory (Department of Materials Science and Technology at BME).

Bevezetés

A múlt század végén erőteljesen hatott a mérnöki közgondolkodásban az a vélemény, hogy az alkalmazott gépeink tömege túl nagy és ezért működtetésük többletenergia befektetést igényel. A mai energiatakarékosságra törekvő világunkban ez a többletkiadás megengedhetetlen. Ez az egyik fő motiváció, hogy a mérnöktársadalom figyelme egyre inkább a kisebb fajsúlyú szerkezeti anyagok alkalmazásának lehetősége és így a tömegoptimalizált tervezés felé fordult.



1. ábra. Csontszövet – Fig. 1: Bone-tissue



2. ábra. Porózus fém – Fig. 2: Porous metal

* Közlésre elfogadva: 2006. május 8.

¹ Dr., egyetemi adjunktus, arpinem@eik.bme.hu ; ² V. éves, diplomatervező hallgató, orbulov@eik.bme.hu; Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és Technológia Tanszék (BME ATT),

A konvencionális könnyűfémek és különböző ötvözeteik mellett ezen a téren jelennek meg a cikkünk tárgyát képező zárt és nyílt pórusú fémhabok, a jelen és a közeljövő speciális szerkezeti anyagai. Ugyancsak a fémhabok jutnak tágabb szerepkörhöz akkor is, ha energiaelnyelés, szűrés, vagy nagy

fajlagos felületet kívánó katalitikus folyamatok számára keresünk váz anyagokat. Napjainkban a fémhabok egyre elterjedtebben kerülnek alkalmazásra [2].

Gyártási módszerek

A fémhabok előállítására több kísérleti-, fél ipari és ipari módszer terjedt el. Az előállítási technológia befolyással van a kialakuló fémhab szerkezetére, porozítására és ezeken keresztül csaknem minden tulajdonságára. A következő felsorolás tartalmazza a leginkább elterjedt módszereket, a főbb gyártókat és a termékek kereskedelmi neveit [5].

- 1.) *gáz-átbuborékolatás* (Alcan, Cymat, hydro, zárt cellás, 3. ábra; ilyen területen folynak kutatások a Miskolci Egyetemen jelenleg a nanoméretű habstabilizáló részecskék irányában [6])
- 2.) *előállítás habképző anyaggal* (Mepura, Fraunhofer Intézet, zárt cellás, 4. ábra)
- 3.) *ömladék-metallurgiai habosító eljárás* (Alporas, zárt cellás, 5. ábra)
- 4.) *előállítása hő hatására kiolvadó anyaggal* (nyílt cellás)
- 5.) *fémhabok folyamatos előállítása* (zárt cellás, 6. ábra)
- 6.) *előállítása különálló fém gömbhéjából* (zárt cellás) (Fraunhofer Intézet, Németország)

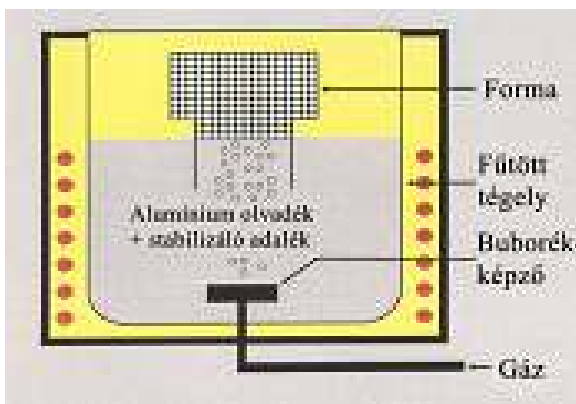
7.) *előállítása kioldódó töltőanyaggal, infiltrációval* (kísérleti célra, nyílt cellás, BME-ATT Fémek Kompozit Laboratórium)

8.) *előállítása üreges kerámia töltőanyaggal.* (zárt cellás, BME-ATT)

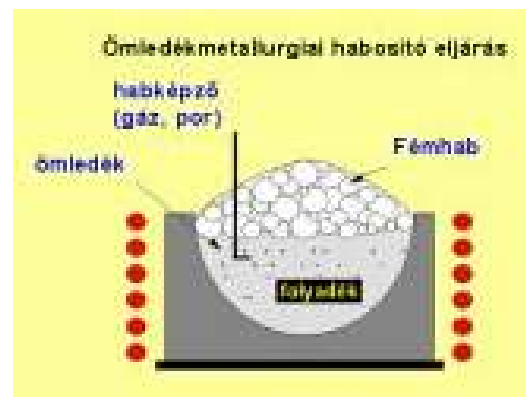
A gáz-átbuborékolatásos eljárásnál olvadt fémfürdőn buborékolatnak keresztül inert gázt. Kulcs feladat: a buborékok stabilitásának biztosítása. Ezt befolyásolja a fémfürdő viszkozitása, így legfőképpen vegyi összetétele és az olvadék hőmérséklete. Szintén erős befolyása van a buborékok méretének is.

A habképző anyagot felhasználó eljárások (2., 3. és 5. technológiák) leginkább TiH_2 -et használnak. Ez az anyag magasabb hőmérsékleten reakcióba lép a fémfürdővel és gázképződéssel habosít. Ezekkel az eljárásokkal könnyen állíthatunk elő adott formát kitöltő, zárt cellás fémhab alkatrészeket.

Szintén a zárt cellás fémhabok előállítására alkalmas a különböző gömbhéjakat felhasználó eljárások (6. és 8. eljárás). A gömbhéjak készülhetnek fémes anyagból, ekkor azokat (akár szabályszerűen) elrendezve, egymáshoz nyomva, majd szinterelve jutnak zárt cellás fémhabhoz. A héjak készülhetnek kémiai ellenálló anyagból (jellemzően kerámiából) is. Ezeket a gömbhéjakat fémbe ágyazva zárt cellás fémhabokat gyártanak. A módszert mi is alkalmaztuk.



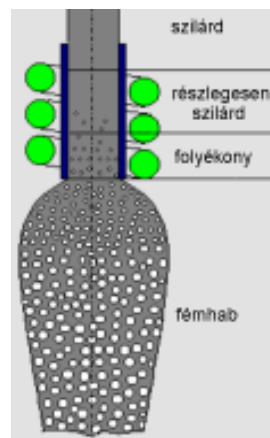
3. ábra. Az átbuborékolatásos módszer
Fig. 3: The bubble aeration method



5. ábra. Ömladék-metallurgiai habosító eljárás
Fig. 5: Melt metallurgical foaming process



4. ábra. Porózus fém előállítása habképző anyaggal
Fig. 4: Making porous metal with foaming agent



6. ábra. Fémhab folyamatos előállítása

Fig. 6: Continuous production of metal foams

A hő hatására kioldódó előformák alkalmazásával nyílt cellás fémhabokat állítanak elő. A töltőanyagból készítene egy előformát (prekurzort), majd erre valamilyen alacsony hőmérsékletű technológiával (általában PVD) fémréteget hordanak fel, végül az alapformát magasabb hőmérsékleten kiolvastják. Ezzel az eljárással állíthatók elő a legnagyobb porozitású (~80 %) fémhabok.

Hasonló technológia a kioldódó töltőanyagot felhasználó technológia is. Ebben az esetben az előformát olyan anyag alkotja, amely az alapfém olvadási hőmérséklete felett káros reakciók nélkül infiltrálható, majd a megszilárdult fémből kémiai úton kioldható [3]. Ezt a módszert a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékén évek óta sikerrel alkalmazzuk.

Felismerve ennek az anyag típusnak a korszerűségét, kezdetben az volt a célunk, hogy a kísérleteinkhez olcsón állítsunk elő fémhabokat, amelyeknek a tulajdonságait széles sűrűség és pórusméret paraméter-tartományban vizsgálni tudjuk. Későbbi célként azt tűztük ki, hogy megismerve ezen anyagok tulajdonságait adatokat szolgáltatassunk konstrukciós felhasználásaikhoz segítve hazai elterjedésüket. Ezzel az eljárással jól szabályozható, egyenletes pórusméret valósítható meg, ez ad lehetőséget az állandó tulajdonságú anyag gyártására. Tapasztalataink alapján ez sem a buborékos, sem a titánhidrides eljárásokkal nem biztosítható.

Mivel a gépészeti felhasználást tekintettük fő iránynak, elsősorban olyan sűrűségű gyártmányokra koncentráltunk, amelyeknek megfelelő a szilárdsága. Így nem volt célunk az igen kis sűrűségű, igazán habszerű anyagok előállítása és kutatása (annál is inkább, hiszen ebben az irányban a Miskolci Egyetemen a Bécsi Műszaki Egyetemen és az ausztriai LKR céggel együttműködve széles körű vizsgálatok folynak [7]).

A vizsgált anyag típusok

A munkánk során nyílt cellás fémhabot, kioldódó töltőanyagot, illetve zárt cellás fémhabot infiltrált kerámia gömbhéjakat alkalmazva állítottunk elő. Az alapfém minden esetben eutektikus alumínium ötvözet (AlSi12Mg volt.) Alkalmazását indokolják jó öntési tulajdonságai, amely az infiltráló technológiák alkalmazásánál nagy előnyt jelent. További kísérletek folynak jelenleg 99,5 % tisztaságú alumínium alapanyaggal.


A nyílt cellás fémhabok porozitását a kioldódó töltőanyag szemcseméretének változtatásával lehetőségünk van befolyásolni. Előállítottunk 0,5 – 1; 1 – 2; 2 – 3 és 4 – 5 (mm) pórus méretű fémhabokat. A zárt cellás fémhabok az adott kerámia gömbhéjak mérete által meghatározott módon egyféle porozitás

mérettel készültek (az $\varnothing 150 \mu\text{m}$ -es gömbhéjak falvastagsága $5 \mu\text{m}$).

A fémhabok egyik legfontosabb fizikai jellemzője a sűrűség, amely közvetlenül meghatározza az alkatrészek tömegét. Az 1. táblázat az általunk előállított nyílt és zárt cellás fémhabok sűrűség értékeit tartalmazza. Látható, hogy több esetben is a vízénél kisebb sűrűségű anyagot állítottunk elő (7. ábra).

A következő fejezetben a felsorolt anyagoknak a mechanikai tulajdonságait tekintjük át.

1. táblázat. Table 1

Cella- méret, mm	Cella típus	Sűrű- ség, g/cm ³	Rel. sűrű- ség %	
alapfém	–	2,7	–	
0,5 – 1	nyílt	1,132	41,93	
1 – 2	nyílt	0,821	30,41	
2 – 3	nyílt	0,964	35,70	
4 – 5	nyílt	0,962	35,63	
0,15	zárt	1,315	48,7	7. ábra. Vízben lebegő fémhab Fig. 7: Afloating metal foam

A fémhabok mechanikai tulajdonságai

A fémhabok mechanikai viselkedésének megismeréséhez három, hagyományosnak számító mechanikai vizsgálatot hajtottunk végre, mégpedig szakító-, zömítő- és hárompontos hajlítóvizsgálatot.

Szakítóvizsgálat

A legelterjedtebb módszer a mechanikai szilárdság meghatározására a szakítóvizsgálat, amely közvetlenül összehasonlítható számeredményt ad. Ezért a 0,5 – 1 és a 2 – 3 mm pórusméretű fémhabokon elvégeztük ezt a vizsgálatot. A mérnöki gyakorlatban szokásos tömör anyagok mérésének körülményeiről, a próbatestek geometriájáról és az egyes mérőszámokról az MSZ EN 10002-1:2001 szabvány ad felvilágosítást, ezeket az ajánlásokat követtük a fémhabok esetében is. A keresztfej sebessége $0,1 \text{ mm/s}$ volt. Az anyag porózus szerkezete miatt a próbatestek kimunkálása viszonylag körülményes volt. Emellett felmerült a roncsolásmentes befogás és a töretfelület megfigyelésének problémája is. Az előbbi epoxigyantába ágyazással az utóbbit a szakítás előtti felületfestéssel valósítottunk meg (8. és 9. ábra). A 2. táblázat a vizsgálataink eredményeit rögzíti.

A táblázatban a maximális erő (F_m), a próbatestek kiinduló átmérője, (d_0), az eredeti hosszuk (L), a megnyúlásuk (ΔL) és a szakítószilárdságuk (R_m)

szerepel. Az alakváltozási jellemzőket nem tüntettük fel, mert értékük elhanyagolhatóan kicsi.

2. táblázat Table 2

Cellaméret, mm	Jel -	F_m N	d_0 mm	L mm	ΔL mm	R_m MPa
0,5 – 1	NA1	620	6,14	öntvény jellegű próbatest		20,9
	NA2	460	6,02			16,2
	NA3	650	6,15			21,9
2 – 3	ND1	835	14,00	56,3	1,50	5,4
	ND2	1321	14,05	56,0	2,59	8,5
0,15	ZA-ZB	1080	6,07	öntvény		37,5



8. ábra. Nyílt cellás próbatest a szakítás után

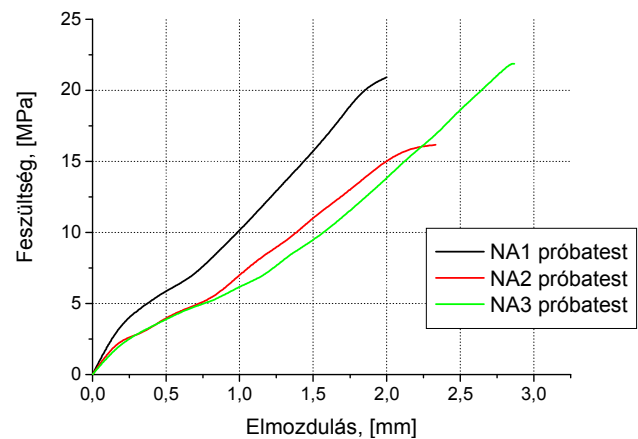
Fig. 8: Open cell tensile specimen after the test



9. ábra. Nyílt cellás szakító próbatest töretfelülete

Fig. 9: Surface of broken open cell tensile specimen

A nyílt cellás fémhabok mérési eredményeiből megállapíthatjuk, hogy a szakítószilárdság mértéke még a vártnál is nagyobb mértékben csökkent. A rideg (szilumin) alapanyag miatt a fémhab szakadási nyúlása a vártnak megfelelően kicsi, ezért a legkisebb cellaméretű darabokból már öntvény jellegű próbatesteket munkáltattunk ki. Azt is megállapíthatjuk, hogy a kisebb cellaméretű NA1, NA2 és NA3 próbatestek szakítószilárdsága jóval meghaladja a 2 – 3 mm cellaméretű fémhabokét. Ezt azzal magyarázhatjuk, hogy a kisebb cellaméret esetén valószínűsíthetően nagyobb a maradó teherviselő keresztmetszet. A törési mechanizmus jelentősen eltér a tömör anyagétól, a fémes cellafalak mérete nem azonos, a cellafalakban jelentős hajlítófeszültség is keletkezik. Húzásra csak abban az esetben lenne optimális az anyagunk, ha a cellák gyakorlatilag teljes próbatest hosszúságú, vékonyfalú csövek lennének. Megfigyelhető, hogy az NA1-es darab diagramjának meredeksége nagyobb, ami jobb merevségi jellemzőre utal. Ugyanakkor az NA2-es darab szakítószilárdsága elmarad a másik két darabétól (10. ábra)..

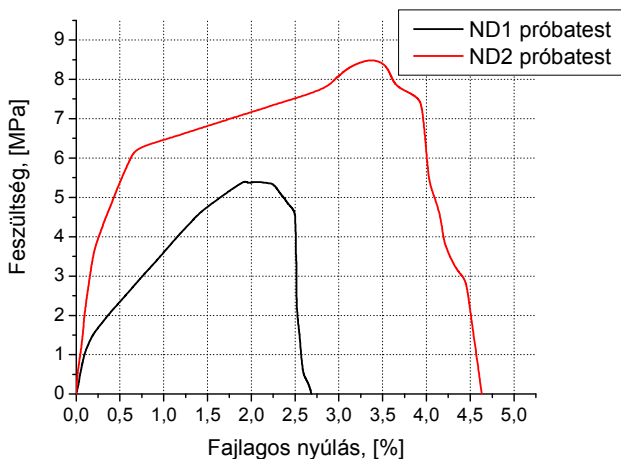


10. ábra. A 0,5 – 1 mm pórusméretű, nyílt cellás fémhabok szakítódigramjai

Fig. 10: Tensile test diagrams of open cell metal foams with 0,5–1 mm pore size

Ezek a különbségek a cellák véletlenszerű elhelyezkedésével magyarázhatók. A 11. ábrán két, 2 – 3 mm cellaméretű fémhab szakítódigramja látható az erő–elmozdulás koordináta-rendszerben ábrázolva. Jól látható az ND1 jelű próbadarab „gyengesége” az ND2 jelűhöz képest, amely egy más szemcse-eloszlásra, esetleg öntési hibára utal

Összességében a nyílt cellás fémhabok szakítóvizsgálatai a várt értékeknek megfelelő eredményeket nyújtották. Az erős gyengítés és a töltőanyag éles felületi átmenetei mint bemetszések eredményeként drasztikusan csökkent a szakítószilárdság, az energiaelnyelés nem számottevő.



11. ábra. A 2 – 3 mm pórusméretű, nyílt cellás fémhabok szakítódiagramjai

Fig. 11: Tensile test diagrams of open cell metal foams with 2–3 mm pore size

A zárt cellás fémhabok megmunkálása igen körülményes a nagy kerámiatartalom miatt. A szerszámok élettartama kicsi, a hagyományos anyagú és élgeometriájú szerszámok csak kísérleti célra megfelelők. Ezért technológiai és gazdasági megfontolások alapján az öntvények vizsgálatánál megszületett alakú próbatesteket munkáltunk ki (lásd 12. ábra).

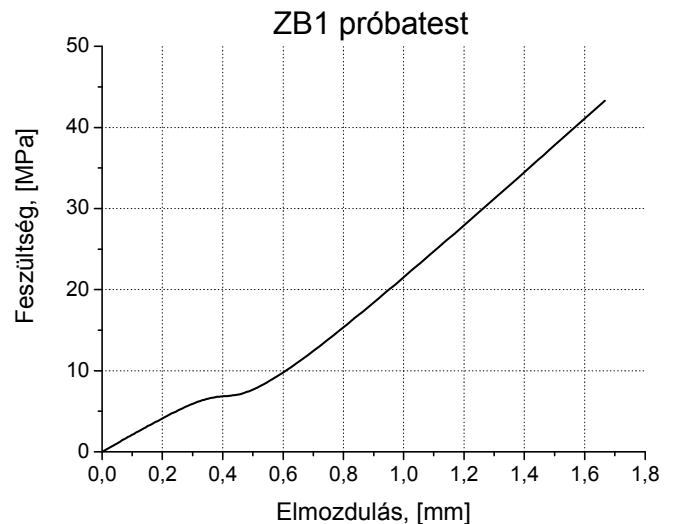


12. ábra. Zárt cellás szakító próbatest a vizsgálat után

Fig. 12: Closed cell tensile specimen after the test

Az öntvény alakú próbatestek mellett szól az is, hogy a minták viselkedését (az öntészeti Al-ötvözet tulajdonsága miatt) ridegnek várjuk és így a szakítószilárdság meghatározásához a kisebb méretű öntvény jellegű próbatestek is megfelelnek. Ezzel egyben anyagot is takarítunk meg, több vizsgálatot hajthatunk végre. A szakítószilárdság értékeken megfigyelhető a nyílt cellás fémhaboknál tapasztalt tendencia, miszerint a pórusméret csökkentésével közelebb kerülünk az alapanyag szakítószilárdságához, holott a térkitöltés (vagyis a gyengítés) alig

marad el (~7 % az eltérés) a nyílt cellás fémhabokétól. (A törési mechanizmus mikromechanikai elemzése valószínűleg rá fog mutatni, hogy jelentős járulékos nyomatermek keletkeznek a pórusszerkezetben, hajlító- és csavarófeszültségek keltésével.) Mint azt a 13. ábrán látható szakítódiagram is mutatja, a minták valóban ridegen viselkedtek. Akárcsak a lemezgrafitos öntöttvasnál, itt sem számíthatunk mérhető alakváltozási jellemzőkre. A maximális erőnél kontrakció nélküli törés lép fel.



13. ábra. Zárt cellás fémhabok szakítódiagramja

Fig. 13: Tensile test diagram of a closed cell metal foam

Zömítővizsgálat

Elvégzése azért lényeges, mert a hab jellegű anyagoknak a mechanikai energiaelnyelő képességét ezzel a módszerrel tudjuk vizsgálni. A felhasználási területeken is ez a leggyakrabban fellépő igénybevételi mód fémhabok esetén, ilyen terhelésnél használható ki legjobban az üreges szerkezet előnye. Ezzel a vizsgálattal ki tudjuk mutatni az anyag alakváltozás által elnyelt, térfogatra vonatkoztatott munkáját. A mérésre előkészített próbatesteket láthatunk a 14. ábrán. A keresztfej sebességét 0,1 mm/s értékre állítottuk.

A számításoknál felételeztük a térfogat állandóságát, bár ez a fémhabok esetében nem teljesül, hiszen a cellák összenyomódásával a térfogat csökken. Ezért az így kiszámított adatok csupán látszólagosak, de összehasonlításra alkalmasak. A próbatest által elnyelt munka meghatározásához numerikusan integráltuk a zömítődiagram alatti területet. Az így kapott munkát a kiinduló térfogatra és tömegré vonatkoztattuk.

A nyílt cellás fémhabok vizsgálataiban során a fémhabokra jellemzően platós diagram alakult ki, a teljes diagram alatti terület az elnyelt energiával

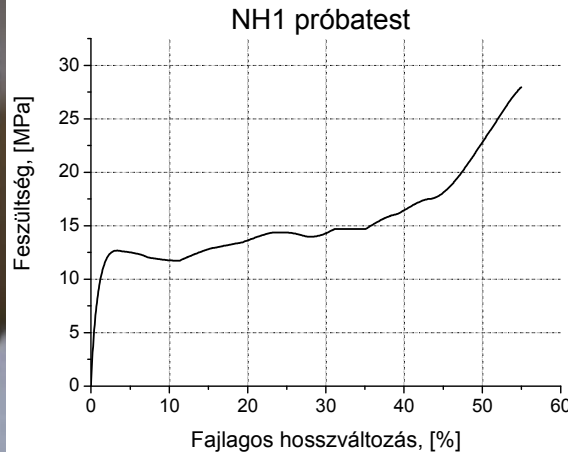
arányos (15. ábra). Jól megfigyelhető a viszonylag hosszú, állandósult (platós), valamint a felfelé ívelő progresszív szakasz a görbe végén. Mivel a platós

rész relative hosszú, az elnyelt energia is nagy (kis erő melletti nagy energiaelnyelés ütközéskor kedvező lassulási viszonyokat biztosít). Az erőplató azért alakul



14. ábra. Nyílt cellás zömítő próbatetest

Fig. 14: Open cell upsetting test specimen



15. ábra. Nyílt cellás próbatetest zömítő diagramja

Fig. 15: Upsetting diagram of open cell specimen

ki, mert ahogy nő a darabban a feszültség egy-egy cella össze-roppan, ekkor az erő visszaesik, majd újra nőni kezd, míg egy újabb cella össze nem roppan. A diagram meredeken emelkedő, progresszív szakaszban fejeződik be, ennek praktikus jelentése az, hogy nem maradt ép cella, ami a továbbiakban összeroppanhatna, így a tiszta alapanyag sajtolódik tovább (biztonságot jelent a katasztrofális tönkremenetellel szemben).

Az eredményeket a 3. táblázat foglalja magába. A táblázatban feltüntettük a próbatestek kiinduló geometriai méreteit (H magasság és D átmérő) valamint a belőlük számított térfogatot (V).

3. táblázat. Table 3

Cellaméret mm	Jel -	H mm	D mm	ΔH mm	V cm^3	W J	ϵ %	W/V J/cm^3	W/m J/g
0,5 – 1	NA	25	13,6	16,3	3,64	156,1	65,2	42,88	37,68
1 – 2	NB-NC	30,7	20	19	9,61	134,5	61,9	14,99	17,12
2 – 3	NE-NI	31,7	21,1	16,7	11,17	58,2	52,7	5,21	6,59
4 – 5	NJ-NK	29,5	19,9	17,7	9,19	91,8	60	9,99	10,41
~0,15	ZA-ZB	25,1	14	9,7	3,87	175,8	38,5	45,48	34,58

A táblázatból kitűnik, hogy a legjobb térfogategységre vonatkoztatott energiaelnyelő képessége a 0,5 – 1 mm cellaméretű fémhaboknak van. A térfogatra vonatkoztatott elnyelt energia a nyílt cellás fémhabok csoportján belül kimagaslóan jó, a nagyobb cellaméretű próbatestek kisebb teljesítményre képesek. A tönkrement munkadarabokon jól megfigyelhető hordósodás, az ilyen kis cellaméretű darabokra nem volt jellemző a törési sík makroszkopikus megjelenése (16. ábra).

A mért és számított értékek alapján megállapíthatjuk, hogy az 1-2 mm cellaméretű, nyílt cellás fémhab több energiát képes elnyelni, mint a közel azonos képességű, 2-3 és 4-5 mm cellaméretű fémszivacs. Viszont nem jellemző rá tipikusan a platós rész megjelenése, tehát az alakváltozás növekedéséhez növekvő erő tartozik. A cellák kisebb mérete miatt a platón belüli ingadozás nem mutatkozik, ami pedig a nagyobb szemcsékkel gyártott daraboknál, jellemzően 3 mm-es cellaméret felett, már

erősen jelentkezik a diagramokban. És ugyancsak a nagyobb cellaméretű darabok tönkremenetele során a hordósodás mellett makroszkopikus csúszási sík jelent meg.

Összességében elmondhatjuk, hogy ha az energia minél gyorsabb (rövidebb úton) elnyelése a cél, akkor célszerűbb a kisebb pórusú, nyílt cellás fémhabot alkalmazni. Egyébként a nagyobb cellás fémhab mutat jobb tulajdonságokat a kisebb energia-

Feltüntettük, továbbá a darabok magasságváltozását (ΔH) és mérnöki alakváltozását ($\epsilon = \Delta H/H$) és a zömítés során elnyelt munkát (W). A táblázat tartalmazza még a zömítés során elnyelt munka térfogatra és a tömegrre vonatkoztatott értékét is (W/V és W/m).



16. ábra. Zömített nyílt cellás próbatetest

Fig. 16: Compressed open cell specimen

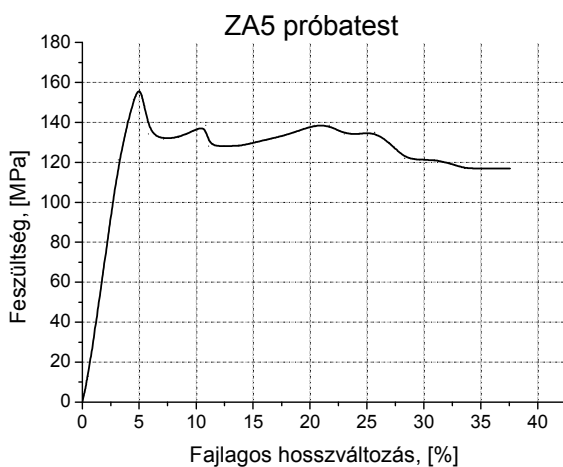
elnyelő képessége ellenére, mert itt az alakváltozás során a platós szakaszon nem nő az erő, így például egy ütközés esetén kisebb reakcióerő keletkezik, azaz hosszabb úton kisebb lassulás megy végbe. A túl nagy méretű cellás fémhabok veszítenek az állandó erő nyújtotta előnyös tulajdonságukból a platón belüli nagy erőingadozások miatt.

A 3. táblázat utolsó oszlopát tanulmányozva megfigyelhetjük, hogy a zárt cellás fémhabok nagyságrendileg ugyanannyi mechanikai energiát képesek elnyelni, mint a 0,5 – 1 mm cellaméretű, nyílt cellás fémhabok. A fajlagos munkák szórása azonban kisebb, mint a nyílt cellás fémhaboké. A hasonlóság a közeleső cellaméreteknek, a kisebb szórás pedig valószínűleg a parányi gömbhéjak nagyobb fokú rendezettségének és a közel azonos méretű gömbök kisebb (szemben a sókristályok éles és különböző) bemetsző hatásának tudható be. A 17. ábra a jellegzetes tönkremeneteli formát, a 18. ábra pedig a jellemző diagramot mutatja [4].



17. ábra. Zömített, zárt cellás próbatest

Fig. 17: Broken closed cell specimen by upsetting



18. ábra. Zárt cellás fémhab zömítő diagramja

Fig. 18: Upsetting diagram of closed cell specimen

A tönkremeneteli mód nagyon jellegzetes, az összes próbatestre azonosan jellemző. A terhelő erő növekedése kezdetben lineáris, egészen a maximális terhelésig. A maximális erő elérésekor hirtelen megjelenik egy, a teljes próbatesten végigfutó, az alapsíkkal közel 45°-ot bezáró repedés. A repedés minden esetben az alaplap, vagy a felső síklap széléről indul (ezt indokolhatják a súrlódási és a geometriai viszonyok). Ekkor a feszültség visszaesik, jellemzően 120 – 140 MPa értékre, majd megkezdődik az alakváltozás és folyamatos, akár 10 mm-es magasságcsökkenés mellett a feszültség közel állandó, ~140 MPa, értéken marad [10]. A nagy terhelőerőből eredő nagy felületi nyomás hatására a törési síkon a két próbatest fél elcsúszik, de csúszás közben a nagy nyomásnak hatására folyamatosan erős kapcsolatban maradnak. Ez teszi lehetővé a nagy erő folyamatos fennmaradását, ami biztosítja a további csúszást és a platós diagram szakasz kialakulását.

A zárt cellás fémhabok ugyanolyan nagy mértékben képesek az energiaelnyelésre, mint a kis cellaméretű, nyílt cellás fémhabok. Alapvető különbség a két rendszer között a platós szakasz erőértéke, amely a zárt cellás fémhaboknál nagyobb. A zárt cellás fémhabok rugalmas alakváltozással és nagyobb maximális terhelő erőnél ridegen megrepednek, majd a terhelő erő állandósága mellett alakváltozásuk folyamatos, azaz létrejön az energiaelnyelést biztosító platós szakasz a zömítő diagramban.

Hárompontos hajlítóvizsgálat

A próbatestek kimunkálása valamivel egyszerűbb volt, hiszen nem forgástestekről, hanem hasábokról van szó, így az esztergáló megmunkáláskor szükséges megtámasztásra nem volt szükség. A hajlítási támaszköz: 80 mm, a támaszok és a nyomófej sugara: 10 mm, a keresztfej sebessége 0,1 mm/s volt.

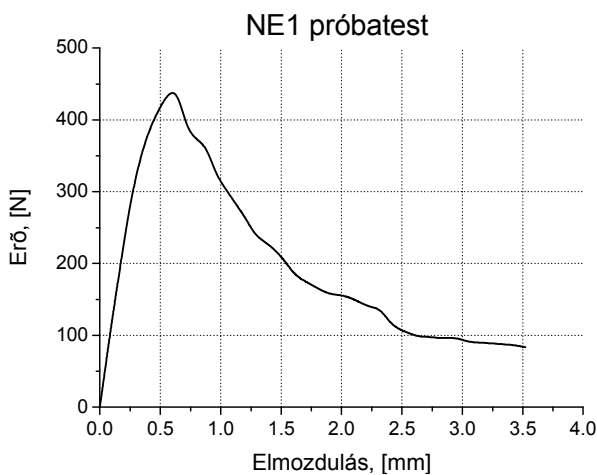
A próbatestet minden esetben a keresztmetszet hosszabb oldalára merőlegesen (a nagyobb másodrendű nyomaték ellenében) hajlítottuk. Vizsgálat közben regisztráltuk a lehajlás-erő diagramot, és meghatároztuk a hajlítómerevséget és a fajlagos hajlítómerevséget, amely alkalmas a különböző anyagok összehasonlítására. A mérések eredményeit a 4. táblázat rögzíti. Azonban a szemcsék méretének és eloszlásának a hatása az inercianyomatékokra még kérdéses. A rugalmassági modulus keverési törvényét alkalmazva az inercianyomaték becsülhető, de a szerkezeti viszonyok miatt ez a módszer sem kellően megbízható.

A táblázat tartalmaz egy erő–elmozdulás adatpárt (F és f), valamint az ezekből az adatokból mechanikai járulékképlettel számított hajlítómerevség (D) és fajlagos hajlítómerevség (D/ρ) értéket.

4. táblázat Table 4

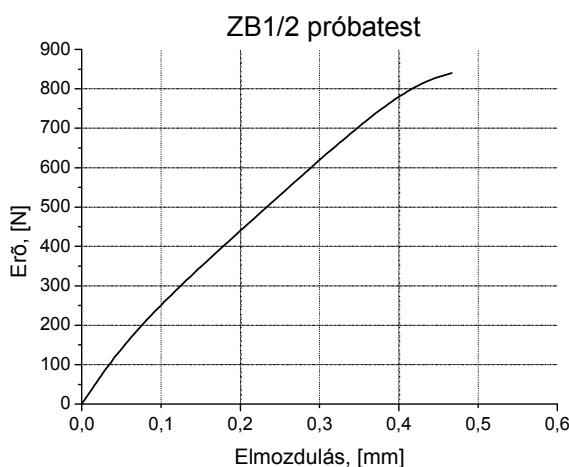
Cellaméret mm	Jel -	F N	f mm	D Nm ²	D/ρ ·10 ⁻³ m ⁶ /s ²
0,5 – 1	NA	410	1,59	2,78	7,12
1 – 2	NB-NC	471	0,84	6,42	22,79
2 – 3	NE-NI	392	0,66	7,28	12,68
4 – 5	NJ-NK	410	0,69	6,47	17,24
~0,15	ZA-ZB	809	0,88	9,80	15,06

A 19. ábra a nyílt cellás anyagra jellemző hajlító-diagramot mutat. A hajlítóvizsgálatokat elvégeztük a zárt cellás fémhabokon is. Amint a jellemző hajlító-diagramból (20. ábra) látható a próbatést a folyamatos terhelés hatására előbb rugalmas alakváltozást szenved, majd a maximális terhelő erő elérésekor ridegen elpattan.



19. ábra. Nyílt cellás próbatést hajlító diagramja

Fig. 19: Bending diagram of open cell specimen



20. ábra. Zárt cellás próbatést hajlító diagramja

Fig. 20: Bending diagram of closed cell specimen

A hajlítómerevség szórásának tartománya a nyílt cellás fémhabokéhoz képest jóval kisebb, amiből arra következtethetünk, hogy a kisebb cellaméret esetében kisebb szerep jut a cellák véletlenszerű eloszlásának. A határozottabb hajlítómerevség segítségével magabiztosabban tervezhetünk és kevesebb plusz mérésre lehet szükség. A gömbhéj erősítésű kompozitok jóval kisebb energiát képesek elnyelni és azt is maradó alakváltozás nélkül teszik, ami azt jelenti, hogy ez az anyag típus jóval ridegebb a nyílt cellás fémhaboknál.

Osszefoglalás

A cikkünk első részében összefoglaltuk a fémhabok előállítási módszereit, majd ismertettük az általunk előállított fémhabokat. A második részben képekkel és diagramokkal illusztrálva ismertettük az elvégzett méréseinket és eredményeinket. Ezzel közelebb kerültünk a fémhabok mechanikai viselkedésének megértéséhez.

Egyik legfontosabb célunknak tartjuk a szilumin és az erősítő anyagok (több kerámia típusból készült gömbhéj, kiolvadó töltőanyag) közötti átmeneti réteg mibenlétének megismerését, kialakulási feltételeik tisztázását. A tulajdonságok teljes körű ismeretében szeretnénk minél több alkalmazási lehetőséget felderíteni, mindhárom vizsgált anyagcsoport számára.

A leghasznosabb alkalmazási törekvések, az energia- és hangelnyelés speciális területei mellett, szendvicsszerkezetek létrehozására, a vékonyfalú cső és a zártszelvények horpadás elleni biztonságának növelésére, különleges áramlástani és hőtani feladatok elvégzésére irányulnak. Olcsó adalékanyagoktól a kiváló minőségű kerámiáig több anyagtypust felhasználhatunk létrehozásukhoz. Ahogy a kohászatban is minőségi változást jelent a kerámiaszűrők alkalmazása, úgy a nyílt cellás fémhabok szűrőként való alkalmazása is áttörést hozhat. A magas hőmérsékletű alkalmazások, a kiegészítő tisztítás lehetősége, mind, mind jelentős potenciális alkalmazási lehetőség a szűrőtechnika terén.

Mindemellett meg kell jegyeznünk, hogy a tulajdonságok szórása nagy, a fémhabok nagyon szerkezetérzékenyek és ezek a hatások növelik a tervezés bizonytalanságait.

Vizsgálati és gyártási körülményeink javulásában ugrásszerű változást jelent az Anyagtudomány és Technológia Tanszéken üzembe helyezett Fémek Kompozit Laboratórium és a körötte szerveződő munkacsoport. Ezeket és a tanszék anyagvizsgálati és technológiai lehetőségeit maximálisan kihasználva reális lehetőséget látunk a vázolt célok elérésére. A munkacsoport további kutatási területe a nagy térkitöltésű (legalább 60 %) szénszál-erősítésű, alumínium ötvözet mátrixú tömbi

kompozitok vizsgálata, valamint a szintén nagy térkitöltésű, alumínium ötvözet mátrixú kompozithuzalok előállítása és vizsgálata. Az ezekhez a területekhez kapcsolódó eredményeinkről a legközelebbi cikkünkben számolunk be.

Forrásjegyzék

[1] *H. P. Degischer*: Innovative light metals: metal matrix composites and foamed aluminium, *Materials & Design*, vol. 18, 4-6, (1997) pp. 221-226

[2] *P. Grant, J. Lord*: Review of industrial survey on metallic foams, National Physical Laboratory, Egyesült Királyság, 2000

[3] *Bartolf József, Keébe György, Kötél Antal, Dr. Stefániay Vilmos, Török Éva, Vajda Imre*: Porózus (nyitott pórusú) és energia-elnyelő (zárt pórusú) alumínium testek előállítása öntéssel, Know-how leírás, Budapest, 1996

[4] *P. K. Rohatgi, J. K. Kim, N. Gupta, S. Alaraj, A Daoud*: Compressive characteristics of A356/fly ash chemosphere composites synthesized by pressure infiltration technique, *Composites Part A* 37, (2006), pp. 430-437

[5] *M. F. Ashby, A. G. Evans, J. W. Hutchinson, N. A. Fleck*: Metal foams: a design guide, Cambridge Centre for Micromechanics, 1998

[6] *N. Babcsán, D. Leitmeier, J. Banhart*: Metal foams – high temperature colloids: Part I. Ex situ analysis of metal foams, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 261, pp 123-130, 2005

[7] *N. Babcsán, D. Leitmeier, H.P. Degischer*: Foamability of particle reinforced aluminium melt, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 34. pp 22-29, 2003

[8] *Détári P., Németh Á.*: Könnyített alumínium alapú anyagok vizsgálata, Országos Anyagtudományi, Anyagvizsgálati és Anyaginformatikai Konferencia és Kiállítás, Balatonfüred, 2001. október 14-17.

[9] *P. Détári, Á. Németh*: Test analysis of enhanced lightweight aluminium materials, *Materials Science Forum* vols. 414-415, pp 75-78 (2003), Trans Tech Publications, Switzerland

[10] *Szöllösi Árpád, Orbulov Imre Norbert*: Fémhabok és fémalapú kompozitok előállítása és tulajdonságai, XXVII. Országos Tudományos Diákköri Konferencia, Anyagtudomány II. szekció, Gödöllő, 2005. március