

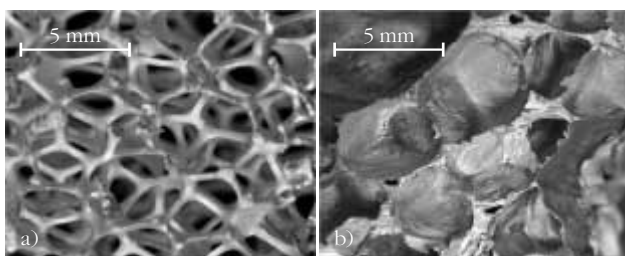
## NAPJAINK KORSZERŰ ANYAGAI: A FÉM HABOK

Környezetünkben számos olyan anyag található, amelynek szerkezete apró, üreges egységekből, cellákból áll, ezeket összefoglalóan celluláris anyagoknak hívjuk. Ilyenek a különböző habok (szappanhab, sörháb, borotvahab), a mosogatószivacs, de ilyen tulajdonságú a hungarocell és a bukósisakok belsejét alkotó műanyag is. Az élelmiszerek között is előfordulnak celluláris anyagok, például a kenyér, a piskóta és a jégkrém.

A természetben is találhatunk celluláris anyagokat. A legismertebbek a fa és a szivacs, de emellett a korall, az emberi koponya és a combcsont is celluláris szerkezetű. Az emberiség már több ezer éve használ természetes celluláris anyagokat, de csak a 20. században kezdett el mesterséges celluláris anyagokat iparilag előállítani; először polimerekből, később kerámiákból, üvegekből, fémekből. Napjainkban leginkább a polimerhabok terjedtek el, ám ezek alkalmazhatóságának a kis szilárdság, az alacsony olvadáspont és a tűzveszélyesség szab határt. Fémek habosításával azonban nagy fajlagos szilárdságú, jó energiaelnyelő anyagokhoz juthatunk, amelyek több száz fokos hőmérsékleten is stabilak, ráadásul száz százalékban újrahasznosíthatók. Emellett jó hangelnyelők és alkalmazhatók rezgéscsillapításra, valamint elektromágneses árnyékolásra is [1].

Fémhabokat éppen ezért leginkább a járműiparban használnak; sok helyen alkalmaznak fémhabokat autók lökhárítójában, ajtóinak belsejében, vagy me-revítésként küszöbök belsejében. Ezáltal nemcsak az utasok védelme javul, de jelentős súlycsökkenés – és ezáltal üzemanyag-megtakarítás – is elérhető. Jelenleg alumíniumhabokat használnak például az Audi A8-ban, a Ferrari F430 sportkupékban és a Siemens Combino<sup>®</sup> villamosaiban, buszaiban és vasúti kocsi-jaiban is [2], de terveztek már emelhető munkaállványkart [3] és páncélauto golyóvédő borítását [4] is fémhabokból. Egy másik fontos alkalmazás a hangszigetelés: Japánban például magasutak, viaduktok alját, valamint épületek mennyezetét borítják alumínium habbal [5].

1. ábra. Nyitott (a) és zárt (b) cellás fémhabok keresztmetszeti képe.



A celluláris anyagokat tömör rudak és/vagy lemezek hálózataként lehet elképzelni. A tömör rudakat cellaéleknek, a lemezeket cellafalaknak hívjuk. A háromdimenziós celluláris anyagokat haboknak nevezzük, ha a bennük található szilárd anyag térfogati hányada (a *relatív sűrűség*) nem haladja meg az 50%-ot. Az ennél nagyobb relatív sűrűségű háromdimenziós anyagokat porózus anyagoknak nevezzük. Szerkezetük alapján a habok alapvetően kétfélék lehetnek: *zárt cellásak* vagy *nyitott cellásak* (1. ábra). Zárt cellás szerkezetéről beszélhetünk, ha a cellák üregeit cellafalak határolják. Ellenkező esetben, azaz ha a cellák nyitott cellaoldalakon keresztül érintkeznek, nyitott cellás anyagról beszélhetünk. Természetesen léteznek félig nyitott, félig zárt celluláris szerkezetek is, azonban az ilyen szerkezetek kis jelentőséggel bírnak.

Az első fémhabot 1942-ben *Sosnik* állította elő alumíniumból, és mivel kezdetben csak drága és nehézkes technológiával lehetett fémhabokat előállítani, lassan indult meg a fémhabok iránti ipari érdeklődés, és ezzel együtt a kutatás és a fejlesztés. Azóta azonban számos eljárást dolgoztak ki fémhabok előállítására. Napjainkban szinte majdnem minden fém habosítható, kezdve az acéltól, a titánon, a magnéziumon és a nikkel-szuperötvözeteken át egészen a fémüvegekig.

A leggyakoribb előállítási módszereket négy nagy csoportba foglalhatjuk aszerint, hogy a fém milyen állapotban készítik belőle a fémhabot [6]. Ennek megfelelően készíthetünk habokat olvadékból, porból, fémgőzből és fémionból. E két utóbbi módszert együttesen bevonásos technikáknak is nevezhetjük (1. táblázat). Az alábbiakban ezekből a módszerekből ismertetjük a legfontosabbakat.

1. táblázat		
Leggyakoribb fémhab-előállítási módszerek		
olvadékból történő előállítás	porkohászati módszerek	bevonásos technikák
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>buborékoltatásos habosítás</i></li> <li>• <i>habosítás fűvatóanyaggal</i></li> <li>• <i>granulátumra öntés</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>fémpor habosítása fűvatóanyaggal</i></li> <li>• habosítás pórusokba zárt gázzal</li> <li>• üreges gömbök szinterelése</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bevonás galvanizálással</li> <li>• bevonás porlasztással</li> <li>• bevonás vákuumpárologtatással</li> </ul>

A *dölt betűvel* kiemelt előállítási módszerekkel a cikkben bővebben foglalkozunk.

2. táblázat

**Fémhabok legfőbb fizikai tulajdonságai**

Cellaméret	20 nm – kb. 20 cm
Relatív sűrűség	0,003 – 0,5
Rugalmassági modulus	0,02 – 15 GPa
Rugalmasság határa	0,02 – 50 MPa
Hővezetési tényező	0,3 – 35 W/m·K
Fajlagos ellenállás	$9 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-5} \Omega\text{m}$

**Buborékolatásos habosítás**

Fémolvadékot legegyszerűbben gáz bevezetésével habosíthatunk. Az olvadék belsejében keletkező gáz-buborékok ekkor nagyon gyorsan az olvadék felszínére emelkednek, és „elszöknek”, mivel az olvadék nagy sűrűsége miatt a gázbuborékokra ható felhajtóerő jelentős. Ez a kedvezőtlen jelenség az olvadék viszkozitásának növelésével csökkenthető.

Első lépésként 5–20  $\mu\text{m}$  átmérőjű kerámiaszemcséket (pl. SiC vagy  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) kevernek az olvadékhoz, ami nemcsak az olvadék viszkozitását, hanem a keletkező hab stabilitását is megnöveli. Ezután forgólápaton vagy fúvókán keresztül gázt (argont, oxigént vagy nitrogént) nyomnak az olvadékba. A keletkező viszkózus olvadék-buborék elegy az olvadék felszínére emelkedik, ahol stabil folyadékhabot képez, amelyet egy szállítószalag emel ki és továbbít. A folyadékhab lehűtésével zárt cellás fémhabhoz juthatunk. Ezt a módszert Kanadában és Norvégiában alkalmazzák; körülbelül 1000 kg fémhabot tudnak óránként előállítani.

**Habosítás fúvatóanyaggal**

Ha a buborékokat gázképződés kíséretében bomló anyag (fúvatóanyag) segítségével visszük be az olvadékba, akkor fúvatóanyaggal történő habosításról beszélhetünk. Ebben az esetben is növelni kell az olvadék viszkozitását, amit legtöbbször kalcium hozzákeverésével érnek el. Ezután keverik az alumíniumolvadékokhoz a fúvatóanyagot; a legtöbb esetben titán-hidridet ( $\text{TiH}_2$ ). A titán-hidrid körülbelül 700 °C-on elbomlik. Az ekkor felszabaduló hidrogéngáz fújja fel az olvadékot. A zárt cellás fémhabot ebből hűtéssel kaphatjuk. Az első ilyen eljárást Japánban fejlesztették ki, maximum napi 1000 kg alumíniumhabot tudnak gyártani.

**Granulátumra öntés**

A módszer lényege, hogy egy öntőformába olyan szerves vagy szervetlen (például só, perlit) szemcséket vagy üreges gömböket helyezünk, amelyek a fém olvadáspontján még stabilak. A szemcsékre vagy üreges gömbökre ezután olvadt fémet öntünk. A szemcsék közti pórusokba az olvadékot inert gáz segítségével létrehozott túlnyomás, vagy az öntőforma alján alkalmazott vákuumszívás préseli be. Hűtéssel fémsemce kompozithoz jutunk. Amennyiben a kompo-

zitból eltávolítjuk a szemcséket (szerves szemcsék esetén hőkezeléssel, sószemcsék esetén a só vízzel történő kioldásával) nyitott cellás, ellenkező esetben zárt cellás fémhabhoz jutunk. Ezt az előállítási módszert Magyarországon és Svájcban is alkalmazzák.

**Fémpor habosítása fúvatóanyaggal**

Ezzel a módszerrel tetszőleges alakú fémhabot készíthetünk, amelyet vékony, tömör fémréteg borít – ez sok alkalmazásnál előny. Először összekeverik a fémport (pl. alumínium) és a fúvatóanyagot, ami a legtöbbször titán-hidrid. Majd a keverékből extrudálással, tömörítéssel vagy egyéb eljárással masszát, úgynevezett prekurzort készítenek. A prekurzort beteszik a kívánt alakú öntőformába, majd körülbelül 700 °C-ra hevítik. Ebben az esetben is a fúvatóanyag elbomlásakor keletkező hidrogéngáz fújja fel a már olvadt fémet.

**Bevonásos módszerek**

A bevonásos módszereknél nyitott cellás műanyaghab szerkezetét másolják le úgy, hogy a műanyaghab cellaéléire vékony fémbevonatot képeznek különböző technológiákkal (katódporlasztással, vákuumpárolgatással vagy galvanizálással), majd hőkezeléssel eltávolítják a műanyaghabot. A keletkező nyitott cellás fémhab élei így üregesek lesznek, ezeket általában szintereléssel tömörítik. A legkisebb sűrűségű fémhabok ezekkel a módszerekkel állíthatók elő.

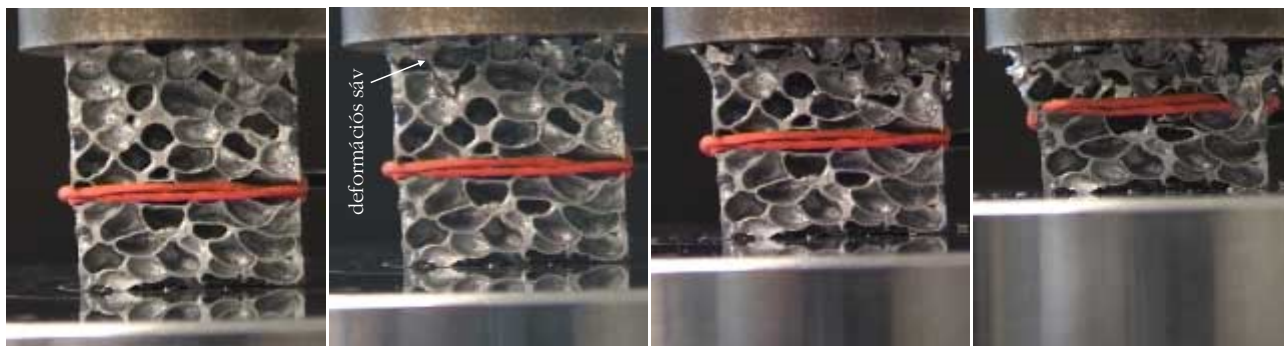


A különböző előállítási módszereknek köszönhetően a fémhabok fizikai tulajdonságai széles skálán mozognak (2. táblázat). A cellák nagysága nanohaboknál lehet akár 20 nm is, de általában néhány százmikronos, milliméteres, vagy néhány centiméteres cellájú fémhabokkal találkozhatunk. A fémhabban lévő fém térfogati hányada, a *relatív sűrűség* is tág határok között mozog: a legkisebb sűrűségű fémhabokban a fém térfogata alig 0,3%-át teszi ki az anyag térfogatának.

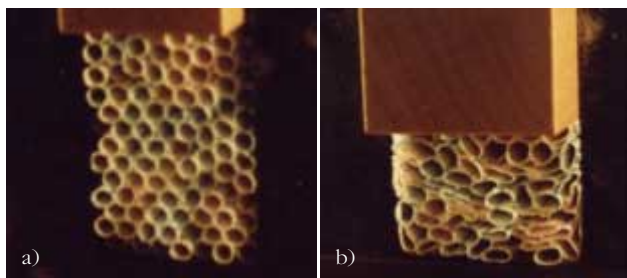
A legtöbb fémhab összenyomás során jellegzetesen, úgynevezett *deformációs sávok* kialakulásával deformálódik. Ez azt jelenti, hogy (egy rövid, homogénnek tűnő deformáció után) kiválasztódik egy cellaréteg, amelyben a cellák összeroppannak, azok a cellák azonban, amelyek nincsenek ebben a rétegben, lényegében nem deformálódnak (2. ábra). Emiatt az összenyomáshoz szükséges erő ebben a szakaszban közel konstans.

A fémhaboknak – és más celluláris szerkezetű anyagoknak ez a sajátossága egyszerűen szemléltethető a szívószálmodellel (3. ábra). Szívószálakat párhuzamosan téve egymásra összenyomás során kialakul egy, az összenyomás irányára merőleges szívószálréteg, amelyben a szívószálak összetörnek. A rétegen kívüli szívószálak épek maradnak egészen addig, amíg ki nem alakul egy olyan deformációs sáv, amely keresztülhalad ezeken a szívószálakon.

A fémhab összenyomási deformációs görbéje (erő-elmozdulás görbéje) így három részből áll: egy kezdeti, lineárisnak tekinthető szakaszból, az ezt követő hosszú



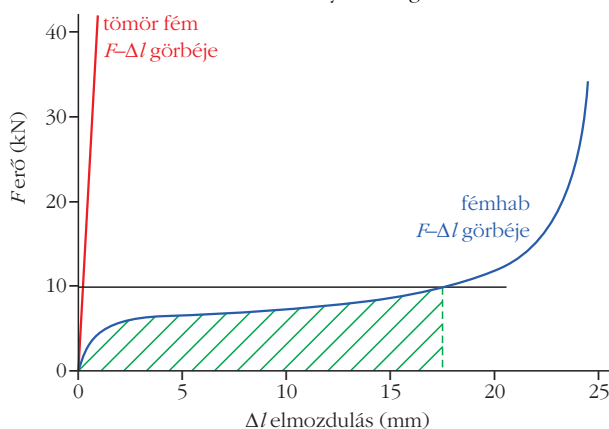
2. ábra. Buborékoltatásos habosítással készített hab alakváltozása összenyomás során. (A piros befőttesgumival egy akusztikus detektort rögzítettünk a minta felületéhez.)



3. ábra. Celluláris szerkezetek összenyomásának modellezése szívszálakkal: (a) a terheletlen szerkezet, (b) a függőlegesen összenyomott szerkezetben a középső régióban ellapult szálak, míg a szélső részekben alig deformált szálak láthatók.

platószakaszból, és végül az úgynevezett denzifikációs szakaszból, amelyben a már összeroppant cellák tömörödése megy végbe (4. ábra). Ennek a hosszú platószakasznak köszönhető, hogy a fémhabok (és általában más habok is) jó ütközésienergia-elnyelők. A fémhabok ugyanis viszonylag sok energiát nyelnek el összenyomásuk közben anélkül, hogy a bennük ébredő átlagos feszültség vagy erő egy adott határon túllépne. Ezt illusztrálja a 4. ábra, ahol azonos külső geometriájú tömör fém, valamint fémhab összenyomási görbéje talál-

4. ábra. Fémhabok és tömör fémek összenyomási görbéje. A zölddel vonalazott terület a hab által elnyelt energia.



ható. Látható, hogy például 10 kN-os erőhatárig a fémhab által elnyelt mechanikai energia, ami az erő-elmozdulás diagram alatti terület, több nagyságrenddel nagyobb, mint amit a tömör fém nyel el.

A fémhabok természetesen nemcsak energia-elnyelőként alkalmazhatók, hanem nagy fajlagos szilárdságuk miatt könnyűszerkezetű merevítők, tárolók is készíthetők belőlük. Ezeknél az alkalmazásoknál főleg zárt cellás habokat használnak. Nyitott cellás fémhabokból szűrők, hőcserélők, elemek, elektródák, katalizátorhordozók, áteresztő védőmembránok, optikai tükrök stb. készíthetők [7].

A fémhab napjainkban már az egyik legkorszerűbb anyagnak számít sokoldalú felhasználhatósága miatt. Nemcsak a Földön, hanem űrhajókon, űrkomponon is használják. Tömegtermelésük beindulásával áruk is jelentősen csökkent, így megjelentek a mindennapi alkalmazásokban is. Ennek ellenére sok alapvető kérdés – mind a fémhabok előállításával, mind a tulajdonságaival kapcsolatban – még nem tisztázott, és aktív tudományos és mérnöki kutatás tárgyát képezi.

Kádár Csilla, Kenesei Péter

ELTE Fizikai Intézet, Anyagfizikai Tanszék

#### Irodalom

1. H. P. Degischer, B. Kriszt (szerk.): *Handbook of Cellular Metals: Production, Processing Applications*. Wiley-VCH, Weinheim, 2002.
2. K. E. Geyer, In: *Cellular Metals Manufacture, Properties, Applications – International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology, 23–25 June 2003, Berlin*. (szerk.: J. Banhart, N. A. Fleck, A. Mortensen) Verlag MIT Publ., Berlin (2003) 25–30.
3. H. W. Seeliger, In: *Cellular Metals Manufacture, Properties, Applications – International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology, 23–25 June 2003, Berlin*. (szerk.: J. Banhart, N. A. Fleck, A. Mortensen) Verlag MIT Publ., Berlin (2003) 5–12.
4. J. Jery, F. Simančík, M. Bortel, S. Kubo, J. Kovačik, In: *Cellular Metals Manufacture, Properties, Applications – International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology, 23–25 June 2003, Berlin*. (szerk.: J. Banhart, N. A. Fleck, A. Mortensen) Verlag MIT Publ., Berlin (2003) 43–46.
5. T. Miyoshi, M. Itoh, S. Akiyama, A. Kitahara, *Advanced Engineering Materials*, 2 (2000) 179–183.
6. J. Banhart, *Progress in Material Science*, 46 (2001) 559–632.
7. <http://www.ergaerospace.com>