

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Vegyésmérnöki és Biomérnöki Kar

Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék

# **Fémhabok**

## *Pórusos anyagok*

Készítette:

**Kohári Dóra**

Budapest, 2019.11.11.

## Tartalomjegyzék

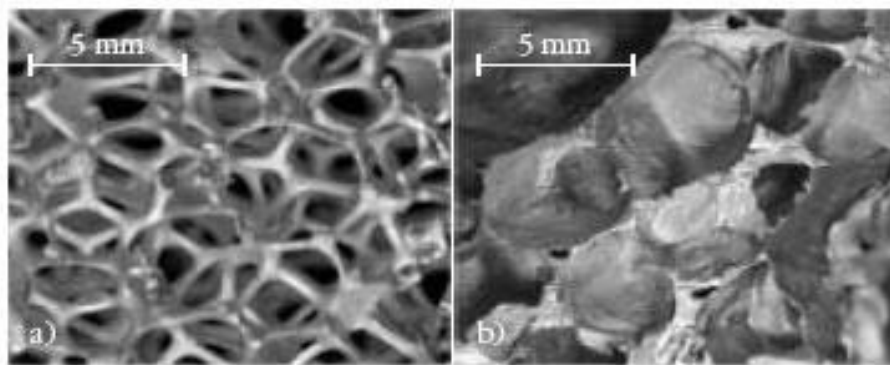
1.	Bevezetés .....	4
2.	Fémhabok előállítása .....	5
2.1.	Fémhabok előállítása.....	5
2.1.1.	Fémhabok előállítása gázbevezetéssel.....	5
2.1.2.	Fémhabok előállítása habosítószerrel.....	6
2.1.3.	Szilárd-gáz eutektikum megszilárdítása („gasars”).....	7
2.1.4.	Fémhabok előállítása fémporokból .....	8
2.2.	Celluláris fémek előállítása .....	10
2.2.1.	Precíziós öntés polimerhabokkal .....	10
2.2.2.	Szórásos eljárás.....	11
2.3.	Fémhabok és celluláris fémek előállítási módjainak összefoglalása.....	12
3.	Fémhabok tulajdonságai és jellemzése.....	13
3.1.	Nem destruktív vizsgálati módszerek .....	13
3.1.1.	Sűrűség meghatározása.....	13
3.1.2.	Színezék penetrációjának mérése .....	13
3.1.3.	Röntgen-sugárral végzett CT vizsgálat.....	13
3.1.4.	Örvényáram mérése .....	14
3.1.5.	Akusztikus mérések .....	14
3.1.6.	Porozimetria és permeametria .....	15
3.1.7.	Buborékpont módszer .....	15
3.1.8.	Elektromos- és hővezetés vizsgálata .....	15
3.2.	Destruktív vizsgálati módszerek .....	16
3.2.1.	Mechanikai vizsgálatok .....	16
3.2.2.	Korrózióvizsgálat.....	16
4.	Fémhabok alkalmazása.....	17
4.1.	Szerkezeti felhasználás.....	17

4.1.1. J�arm�iipar .....	18
4.1.2. �p�t�iipar .....	18
4.2. Funkcionális felhasználás.....	19
4.2.1. Hangszigetelés .....	19
4.2.2. Sz�r�s.....	19
4.2.3. H�cserel�k.....	20
4.2.4. T�zgatl�k .....	20

## 1. Bevezetés

A pórusos anyagok napjainkban előtérbe kerültek. Elsősorban a műanyag habok terjedtek el: hungarocell, szivacsok, csomagolóanyagok, poliuretán habok. Azonban ezek alkalmazhatóságának többek között hőmérsékletfüggőségük és kis szilárdságuk szab határt. A fémből készült celluláris anyagok, a fémhabok éppen azért érdekesek, mert ezek a hátrányok nem jelentkeznek, ezek könnyű celluláris anyagok, melyeket a természet inspirált, a fák a csontok és a tengeri szivacsok is hasonló felépítésű szerkezettel rendelkeznek. [1]

A fémhabokat szerkezetük alapján két csoportba oszthatjuk. A nyitott cellás fémhabok üregei egybefüggőek, vázukat egymáshoz kapcsolódó cellaélek alkotják. Míg a zárt cellás fémhabokban az üregeket cellafalak különítik el. Tipikus zárt és nyitott cellás habok szerkezete figyelhető meg az 1. ábrán.



**1. ábra:** Egy tipikus nyitcellás (balra) és zártcellás (jobbra) szerkezetű fémhab keresztmetszeti képe [2]

A fémhabok, amelyek néhány mikrométeres vagy akár centiméteres nagyságú üregeket is tartalmazhatnak, s amelyekben a cellák falvastagsága is igen széles skálán változhat ( $10^{-6}$ - $10^3$  m) szerkezetüket tekintve hasonlóak a műanyaghabokhoz. A fémhab sűrűsége lényegesen kisebb a tömör fémekéhez viszonyítva, átlagos sűrűségük a fém sűrűségének akár százada is lehet. A fémhabok egyik leggyakoribb jellemzője a relatív sűrűség, amely a fémhab sűrűségének és a fémhabot alkotó fém sűrűségének hányadosa. A jelenleg előállított fémhabok relatív sűrűsége 0,1% és 50% között változik. [3] [4] Az előállítási módjuktól függően a habok szerkezete többé-kevésbé homogén, ami befolyásolja azok tulajdonságát, mely a felhasználási területet is meghatározza. [1]

A szilárd fémhabok az érdekes fizikai és mechanikai tulajdonságaik kombinációjáról ismertek, ilyen tulajdonságok a nagy merevség, a kis fajsúly, a nagy nyomószilárdság és a jó energiaelnyelő képesség. Miközben egyre inkább a figyelem középpontjába kerülnek ezek az anyagok, a „fémhabok” kifejezést egyre többször használják olyan anyagok leírására is,

amelyek szigorúan véve nem habok. A fémhabok pontos azonosítása érdekében különbségek kell tenni több különböző, a köznyelvben fémhabnak nevezett anyag között.

- Celluláris fémek: a legáltalánosabb kifejezés, amely egy fémtestre utal, amelyben gázzal telt üregek találhatóak. A fémfázis az anyagot cellákra osztja, amelyekben a gázfázis található.
- Porózus fémek: a celluláris fémek speciális típusa, melyek egy fajta üregre van korlátozva. A pórusok általában kerek és egymástól elkülönültek.
- Szilárd fémhabok: A celluláris fémek speciális osztálya, melyek folyékony fémhabokból keletkeznek, és így megszabott morfológiával rendelkeznek. A cellák zártak, kerek vagy polihedrálisak és vékony fémréteg választja el őket.
- Fémszivacs: a celluláris fémek morfológiájának egy fajtája, melyben nyitott cellák találhatóak. [5]

## 2. Fémhabok előállítása

### 2.1. Fémhabok előállítása

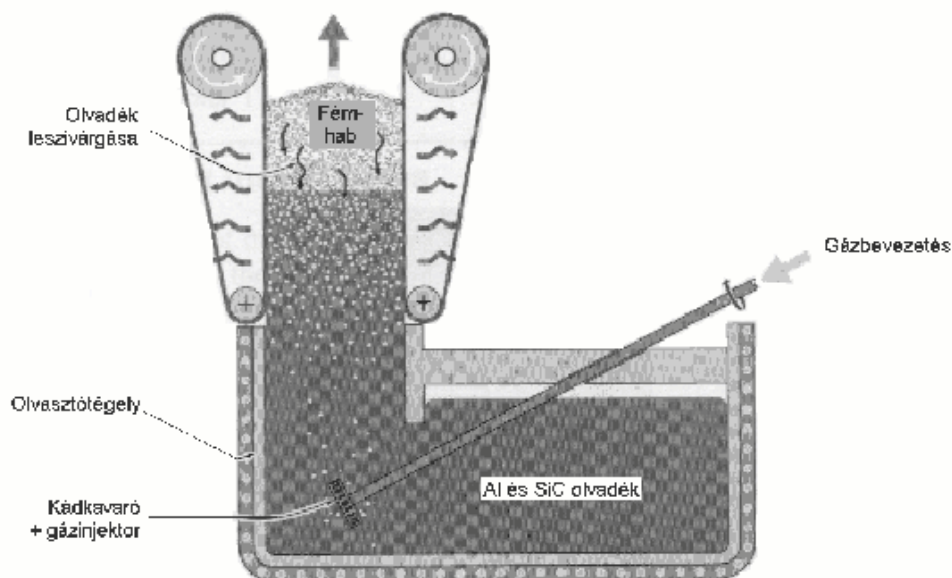
A fémhabok előállítása során az eljárások egyik megkülönböztető tényezője, hogy a kiindulási anyag fémolvadék vagy fémpor, azonban meg kell jegyezni, hogy fémpor használta esetén is a hab képződése olvadék fázisban történik. A második fontos különbség a porozitást kialakító gáz forrása, lehet külső forrásból származó gázt bevezetni, habosítószer alkalmazni, vagy az oldott gázt precipitációra kényszeríteni. A harmadik tényező a hab képződésének folyamata, mely lejátszódhat azonnal vagy kaphatunk egy köztiterméket, melyet későbbi lépés vagy lépések során habosítunk. Ezekon kívül továbbá fontos az olvadék viszkozitásának növelése, ez megtehető finom kerámiapor vagy ötvözők adagolásával. Erre azért van szükség, mert a képződött buborékok a nagy sűrűségű folyadékban a nagy felhajtó erő következtében gyorsan a felszínre jutnának, mielőtt a fémhab kialakulhatna. [5]

#### 2.1.1. Fémhabok előállítása gázbevezetéssel

Ennek a módszernek a során az első lépés az alumínium vagy alumínium ötvezet olvadékának előállítása, melyhez a viszkozitás növelése érdekében szilícium-karbid, alumínium-oxid vagy magnézium-oxid szemcséket adnak. A részecskéket általában 10-20%-os mennyiségben adagolják, méretük pedig 5-20  $\mu\text{m}$ . Megoldandó probléma a részecskék felületének nedvesedése az olvadék által és a homogén eloszlásuk biztosítása. A második lépésben az olvadékot gáz bevezetésével habosítjuk, a gáz lehet levegő, nitrogén vagy akár argon is. Egy keverő, ahogyan a 2. ábrán is látható apró buborékokat képez a gázokból és

biztosítja a buborékok egyenletes eloszlását, mely nagyon fontos, mivel csak ebben az esetben kapunk megfelelő minőségű habot. Az apró gázbuborékokból és a fémolvadékból álló viszkózus keverék a felszínére jut, így egy meglehetősen száraz folyadékhabot kapunk, miközben az olvadt alumínium egy része kifolyik a buborékok közül. A keletkezett hab meglehetősen stabil a jelen lévő kerámiarészecskék miatt, mely hab egy szállítószalaggal eltávolítható a folyadék felszínéről, hogy lehűljön és megszilárduljon.

Az így előállított fémhab hossza elméletileg bármilyen hosszú lehet, olyan széles amelyet a szállítószalag lehetővé tesz és általában 10 cm vastag. Amennyiben az alapanyag alumínium, a termék porozitása 80-89%, ennek megfelelően sűrűsége  $0,069-0,54 \text{ g/cm}^3$ , az átlagos pórusmérete 3-25 mm és a falvastagsága 50-85  $\mu\text{m}$ . [6]



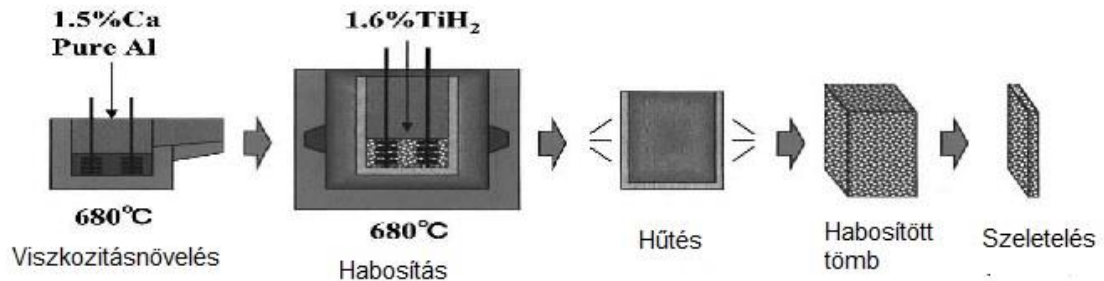
**2. ábra:** A direkt gázbevezetéssel történő fémhab előállítási módszer sematikus ábrája [3]

### 2.1.2. Fémhabok előállítása habosítószerrel

A második lehetőség a fémek közvetlen habosítására habosítószer adagolása a fémolvadékhoz a gáz közvetlen bevezetése helyett. A folyamat hajtóereje, hogy a habosítószer hő hatására gázfejlődés közben elbomlik.

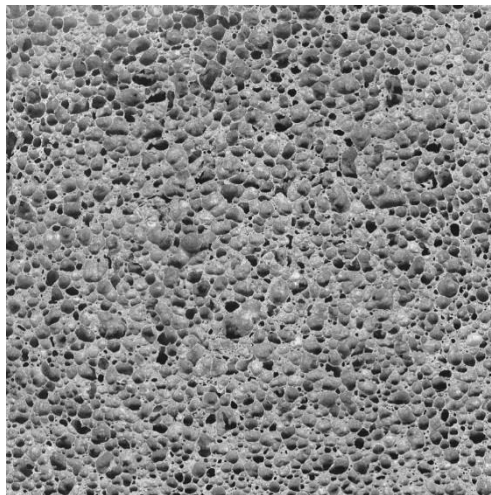
Az eljárás során  $680^\circ\text{C}$ -on kalciumot adnak az alumínium olvadékhoz. Az olvadékot néhány percig kevertetik, mialatt a viszkozitás akár ötszörösére is növekedhet, a kalcium-oxid, kalcium-alumínium-oxid és  $\text{Al}_4\text{Ca}$  intermetallikus vegyület képződésének köszönhetően. Miután a viszkozitás elérte a kívánt értéket, 1,6wt% titán-hidridet adagolnak, ami habosítószerként hidrogént szolgáltat a forró viszkózus olvadékba. Az olvadék azonnal elkezd

lassan expandálni és fokozatosan kitölti a habosító formát. A habosítás állandó nyomáson történik. A forma lehűtése során az olvadáspont alatt kialakul a szilárd alumínium hab, mely kivehető az öntőformából további feldolgozásra. A művelet folyamatának főbb lépései a 3. ábrán figyelhető meg.



**3. ábra:** Habosítószerrel történő alumíniumhab előállítás folyamatának folyamata [6]

Egy tipikus közepes méretű öntőforma esetén a művelet 15 perc alatt elvégezhető. Az ezzel a technológiával előállított habok tűnnek a leghomogénebb alumíniumhabnak a jelenleg elérhetőek közül, ahogyan a 4. ábrán is látható szerkezetük. Lehetőség van vasötvözetek és egyéb alacsony forráspontú ötvözetek habosítására is. Azonban az így előállított habok jelentősen drágábbak, mint a direkt gázbevezetéssel előállítottak, továbbá az eljárás hátránya, hogy jelenleg még csak szakaszos technológiaként üzemeltethető. [5]



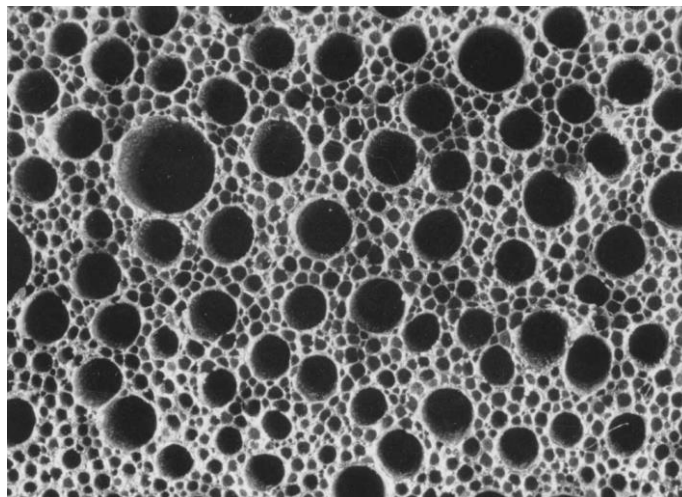
**4. ábra:** TiH<sub>2</sub> habosítószerrel előállított alumíniumhab szerkezete

### 2.1.3. Szilárd-gáz eutektikum megszilárdítása („gasars”)

Az eljárást nagyjából két évtizede fejlesztették ki, mely azon a tényen alapul, hogy néhány fém eutektikumot képez hidrogéngázzal. Ezeket a fémeket magas nyomású hidrogénatmoszférában megolvasztva homogén olvadék keletkezik, mely hidrogénnel van telítve. Hőmérséklet csökkenés hatására az olvadék egy eutektikus átmeneten keresztül heterogén kétfázisúvá rendszerré válik (gáz+folyadék). Ha a rendszer összetétele elég közel

esik az eutektikus koncentrációhoz, akkor egy adott hőmérsékleten szegregációs reakció zajlik le. Az rendszer hűtése során elkezdődik az olvadék megszilárdulása, a megszilárdulási front 0,05-5 mm/s sebességgel halad előre a folyadék fázisban. A megszilárdulási front közelében a hidrogén koncentráció megnő és buborékokat képez. A folyamat paramétereit körültekintően kell megválasztani, úgy hogy a képződött buborékok a megszilárdulási zóna közelében maradjanak és a szilárd fázisban megragadjanak.

Az előállított pórusok morfológiája nagyban függ a hidrogén koncentrációjától, az alkalmazott nyomástól, a hűtés sebességétől és irányától és az olvadék kémiai összetételétől. Általában nagymértékben a megszilárdulási zóna haladási irányába álló hosszúkás pórusok alakulnak ki. A pórusok átmérője 10  $\mu\text{m}$ -100  $\mu\text{m}$ , a hosszuk 100  $\mu\text{m}$ -300  $\mu\text{m}$ , a porozitás pedig 5-75%. A pórusméret-eloszlás nem egyenletes a kis és nagy pórusok konkurens növekedése és egyesülése miatt. A pórusok lehetnek kúposak vagy hullámosak, redősek, a hab szerkezete az 5. ábrán látható. [6] [5]



**5. ábra:** Szilárd-gáz eutektikum megszilárdulásával előállított alumíniumhab szerkezete [6]

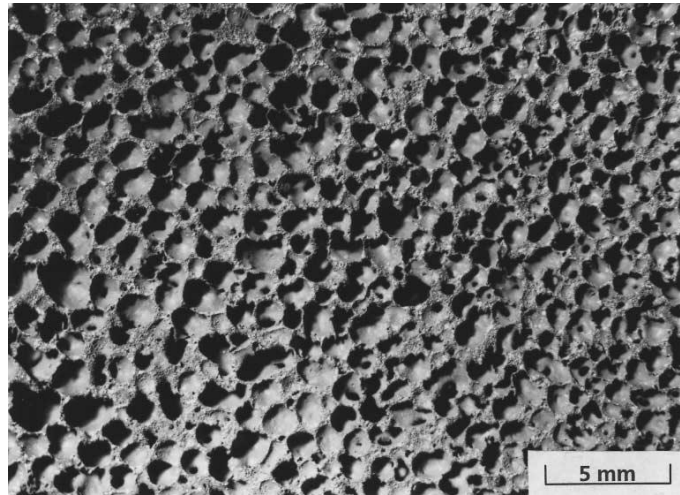
#### 2.1.4. Fémhabok előállítása fémporokból

A folyamat a fémpor (fém, ötvözet, fémporkeverék) és a habosítószer összekeverésével kezdődik, ezután ezt a keveréket tömörítik. A tömörítés elvben bármilyen módszerrel elvégezhető, amely biztosítja a habosítószer megfelelő beágyazódását a fémmátrixba nyitott pórusok megmaradása nélkül. Néhány példa ezekre a módszerekre, a forró egytengelyű vagy izosztatikus prézelés, extrúzió vagy porhengerlés. A választott technikát a prekursor kívánt alakja határozza meg. A következő lépés a mátrix olvadás pontja körüli hőkezelés, miközben a habosítószer elbomlik. A felszabadult gáz a tömörített prekuzort expandálja, nagy porozitású szerkezetet kialakítva. A teljes expanzióhoz szükséges idő, mely néhány másodperc vagy néhány perc a hőmérséklettől és a prekursor méretétől függ. Az expanzió maximális fokát és a



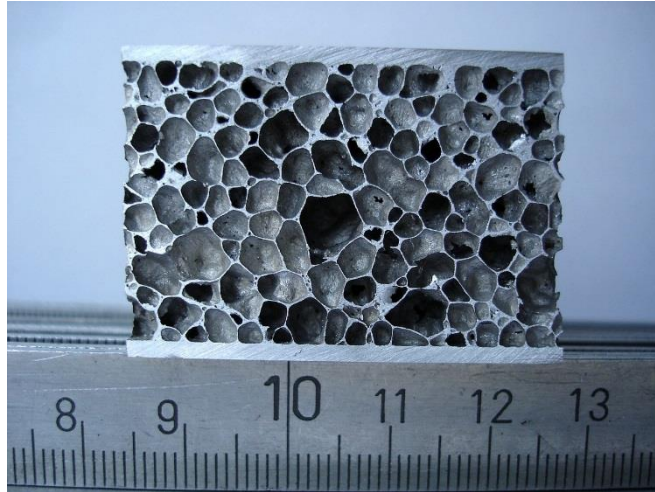
sűrűséget a habosítószer mennyiségével, a hőmérséklettel és a melegítés illetve lehűtés sebességével lehet szabályozni.

Az eljárás nem csak alumíniumra és ötvözeteire van korlátozva, cink, ón, sárgaréz, ólóm és arany is habosítható a megfelelő paraméterek és habosítószer megválasztásával. Cink és alumínium ötvözetek esetén titán- vagy cirkónium-hidridet, acélok esetén karbonátokat alkalmaznak habosítószerként. Hidridek alkalmazás esetén a hozzáadott mennyiség a legtöbb esetben kevesebb, mint 1%. [6]



**6. ábra:** Fémporból előállított alumíniumhab szerkezete [6]

Ha egy kemencében egy darab prekursor anyagot habosítanak, akkor egy meghatározhatatlan formájú fémhab keletkezik, kivéve, ha az expanziót bizonyos irányokban korlátozzák. Ezt úgy hajtják végre, hogy a prekursor anyagot egy üreges formába helyezik és melegítéssel kiterjesztik, így zárt külső héjú és nagy belső porozitású szerkezet jön létre. Szendvicspanelek, melyek két fémlap között habosított fémet tartalmaznak, egyszerűen kialakíthatóak ragasztók használatával, azonban, ha az elemek között fémes kötésre van szükség, akkor a két fémlapot és a fémhab prekursorát együtt hengerlik. A végső hőkezelés során, amelyben csak a habosodó mag olvad meg a héj pedig szilárd marad, kialakul a szendvicsszerkezet, mely a 7. ábrán látható. Leggyakrabban az alumíniumhabot acél vagy titán borítólemezekkel kombinálják. [5]



**7. ábra:** Alumíniumból készült szendvicspanel szerkezete [6]

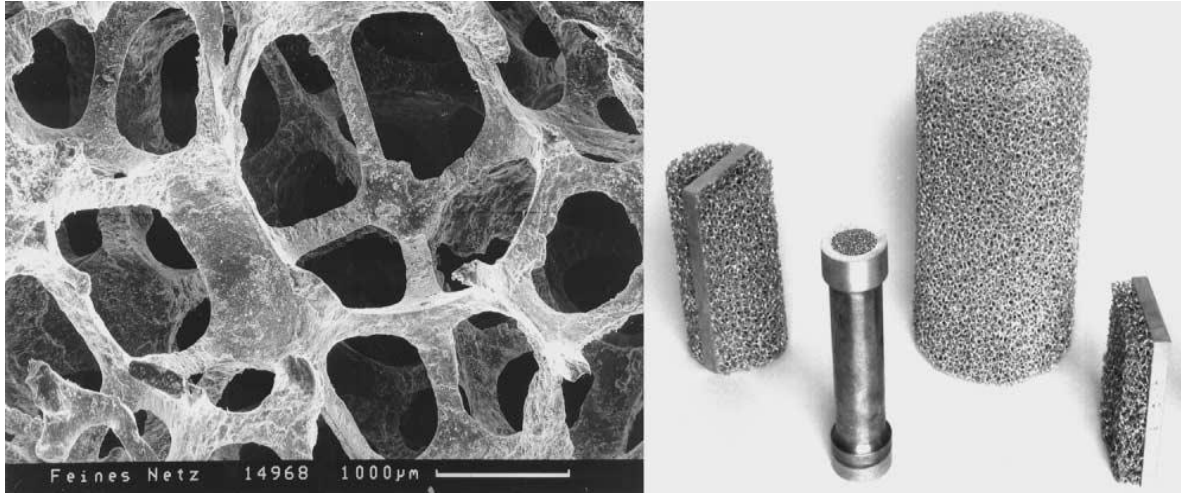
## **2.2. Celluláris fémek előállítása**

A celluláris fémek előállítása során nem mindig alkalmaznak habosítási módszereket. Ennek ellenére sok esetben ezeket is fémhaboknak nevezik. Gyakran egy polimer habot speciális kezeléssel felnyitnak, majd a fémmel egyfajta replikát készítenek belőle, melynek eredménye egy fémszerkezet. A replikációt fémgőzzel való bevonással vagy galvanizálással is végre lehet hajtani. Az eredmény egy nyitott cellás szerkezet, amely inkább szivacs, mint hab. Ebben az esetben a fémhab stabilitásával és szerkezetével nem kell törődni, mivel csak a polimer prekursor van habosítva. Sok egyéb más anyag is használható templátként celluláris anyagok előállítására: szerves és szervetlen szemcsék, üreges gömbök, vagy szokványos polimer szerkezetek, melyet a megfelelő lépéseken keresztül fémszerkezetté alakítanak. Ezzel ellentétben az igazi habosítás során nem alkalmaznak templátot a kívánt morfológia elérése érdekében, a fém saját magát alakítja a hab képződése során. [5]

### **2.2.1. Precíziós öntés polimerhabokkal**

Fémhabok előállíthatók olvadt fémből anélkül, hogy a fémet ténylegesen habosítsák. Kiindulási pontként egy polimerhabot, általában poliuretánt használnak. Amennyiben a hab zártcellás, első lépésben nyitott cellás szerkezetet kell kialakítani, melyet egy hőálló anyag zagyával töltenek meg, ez általában mullit, fenolgyanta és kalcium-karbonát keveréke. Ezután a polimerhabot hőkezeléssel eltávolítják és az így kapott nyitott üregeket megtöltik az olvadt fémmel, így replikát kapva az eredeti polimerhab szerkezetéről. Nyomás alkalmazása és a forma melegítése szükséges lehet, ha a keskeny üregek megtöltése nem lehetséges gravitációs öntéssel. A rendszer lehűtése után az öntőformát eltávolítják, például nagynyomású vízzel, és megkapjuk a kívánt szerkezetű fémhabot, mely a 8. ábrán látható.

Az eljárás nehézségei a forma teljes, levegőmentes megtöltése, az irányított szilárdulás kialakítása és az öntőforma anyagának maradék nélküli eltávolítása a kialakított szerkezet sérülése nélkül. Az alumíniumon és ötvözetein kívül feldolgozható így magnézium és réz is. A sűrűség és a morfológia a polimerhabtól függ, a porozitás tipikus tartománya 80-97%. [6]



**8. ábra:** Pásztázó elektron mikroszkóppal készült felvétel egy precíziós öntéssel készített fémhabról és így előállított alkatrészek [6]

### 2.2.2. Szórásos eljárás

Szórásos eljárással több különféle fém és ötvözet feldolgozható. Az olvadt fémot folyamatosan atomizálják és repülés közben kis fémcseppek jönnek létre. A cseppeket egy szubsztrát felületén gyűjtik, ahol megfelelő formát adnak neki. A szórásos eljárással kialakított anyagok oxid tartalma alacsony, finom a szemcséjük. A tulajdonságok ezen kombinációját nem lehet hagyományos öntési eljárásokkal elérni. Egy tulajdonság teszi az eljárást különösen vonzóvá: a lehetőség, hogy porok (oxidok, karbidok, fémek) adagolásával módosítható a lerakódó réteg, azáltal hogy a fémcseppek reagálnak ezekkel az anyagokkal, vagy a felületükre tapadva beépülnek a szerkezetbe. Ha a hozzáadott anyag gázfejlődés közben elbomlik, amikor az olvadékkal reagál, az hagyományos módon is pórusokat képez a keletkező szerkezetben. [6]

## 2.3. Fémhabok és celluláris fémek előállítási módjainak összefoglalása

1. táblázat: A fémhabok és celluláris fémek előállítási módjainak összefoglalása [6]

Kategória	Eljárás	Elérhető porozitás (%)	Alkalmazható fémek
Folyadék fázisú eljárások	Direkt habosítás gázbevezetéssel	90-97,5	Al, Zn
	Direkt habosítás habosítószerrel	91-93	Al, Zn
	Szilár-gáz eutektikum megszilárdulása	5-75	Ni, Cu, Al, Mg
	Fémporokból kiinduló habosítás	60-90	Al, Zn, Pb
	Precíziós öntés polimerhabokkal	80-97	Al, Zn
	Öntés granulátumokkal	<65	Al, Zn, Pb, Cu
	Szórásos formázás	<60	Cu, acél
Szilárd fázisú eljárások	Porok és szálak szinterelése	20-80	bronz, acél
	Gáz csapdázása	<45	Ti
	Szuszenziók habosítása	<93	Al
	Porsajtolás granulátumokkal	<70	Ti
	Üreges gömbszerkezetek	<80	acél
	Por/kötőanyag technika	-	Fe, Cu
	Reaktív szinterelés	<50	TiAl, FeAl
Elektrokémiai párologtatás	Elektrokémiai párologtatás	92-95	Ni, Cu
Gőzlerakódás	Gőzlerakódás	93-97,5	Ni, Ni-Cr, Cu

### 3. Fémhabok tulajdonságai és jellemzése

A celluláris fémeket és ötvözeteket számos úton lehet jellemezni.

#### 3.1. Nem destruktív vizsgálati módszerek

##### 3.1.1. Sűrűség meghatározása

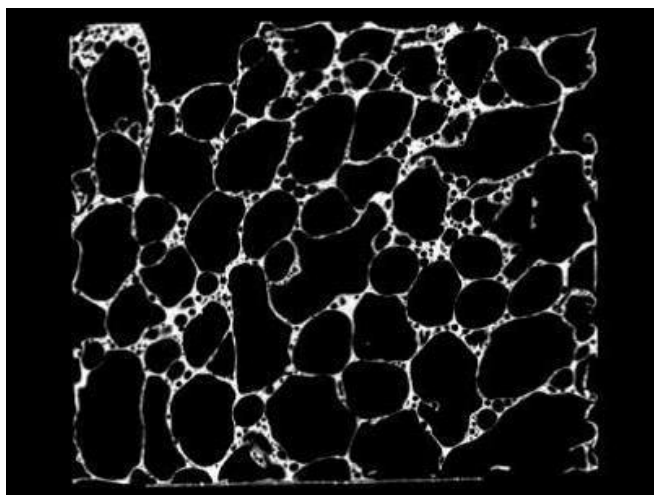
Egy pórusos fém sűrűsége meghatározható a tömegének és a térfogatának mérésével és Archimedes törvényének felhasználásával, mely során a vizsgált testre ható felhajtóerőt vizsgáljuk ismert sűrűségű folyadékban. Ha a vizsgált minta nem rendelkezik zárt felszínnel, akkor folyadék bejutását meg kell akadályozni egy vékony felületi polimerréteg kialakításával. [6]

##### 3.1.2. Színezék penetrációjának mérése

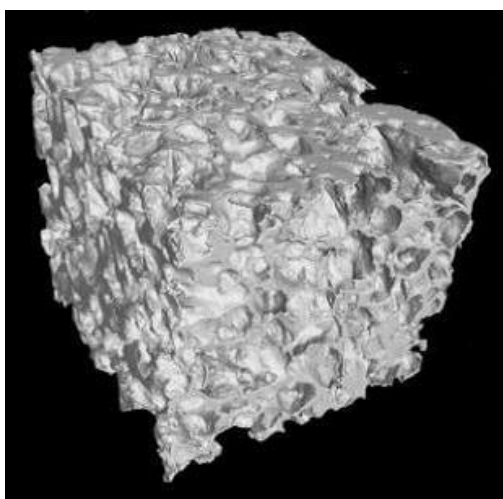
A zárt cellás vagy zárt külső felülettel rendelkező fémhabok esetén is keletkezhetnek hibák a gyártási folyamat során. Ezek a tökéletlenségek lehetnek apró lyukak vagy repedések a cellák falán vagy a zárt külső felületen. A színezék penetrációjának mérése ezeket a hibákat tárja fel. Ehhez először folyékony halmazállapotú vegyi anyagot visznek fel a habra, melyet a lyukak és a repedések abszorbeálnak. Miután a felület megszáradt, egy színezéket alkalmaznak, mely elszíneződik azokon a részeken, ahol a vegyi anyag megkötődött. A színes jelek megjelenését detektálva az idő függvényében egy térkép készül a hibákról. [6] [7]

##### 3.1.3. Röntgen-sugárzással végzett CT vizsgálat

A CT berendezés az egyedüli méréstechnikai eszköz, amellyel olyan térfogat-információ szerezhető a vizsgált szerkezetről, ami nemcsak a külső burkolófelület topológiáját határozza meg nagy pontossággal, hanem adatot szolgáltat a belső struktúráról, inhomogenitásról is. Napjainkban a CT berendezéseket számos vizsgálatához alkalmazzák. A CT berendezés 2D-s felvételt készít az adott munkadarabról, majd a munkadarabot az asztallal együtt egy bizonyos szögben elfordítja, és újabb felvételt készít róla. Ez addig folytatódik, amíg az adott munkadarab teljesen körbe nem fordul. Az alkatrész ellentétes oldalán elhelyezett detektor érzékeli a különböző röntgen intenzitást. A vizsgálat elvégzése után rendelkezésünkre áll minden egyes egységnyi szögelfordulás után egy 2D-s kép, mely a *9. ábrán* látható. A CT vizsgálat után rendelkezésre áll számos 2D-s felvétel, amelyeket általában a CT berendezéshez kapott szoftverrel lehet összeállítani, hogy egy 3D-s modellt kapjunk, mely a *10. ábrán* figyelhető meg. [8]



**9. ábra:** Alumínium habról készített CT felvétel [8]



**10. ábra:** Alumínium hab CT felvételeiből összeállított 3D-s modell [8]

#### 3.1.4. Örvényáram mérése

A habok jellemezhetők a relatív sűrűségükkel és pórusméretükkel multifrekvenciás elektromos impedancia mérésen keresztül. Ehhez egy gerjesztési tekercset alkalmaznak, mely változó mágneses teret hoz létre. Az indukció örvényáramot hoz létre és egy ennek megfelelő mágneses teret a minta körül, mely egy másik tekercssel érzékelhető. Az örvényáram nem csak a geometriai elrendezéstől és a frekvenciától függ, hanem a fémhab tulajdonságaitól is. A kimenő jelet nagyban befolyásolja a porozitás. Ennek megfelelően ez a módszer alkalmas lokális sűrűség és megfelelő kalibráció utána más pórustulajdonságok meghatározására is. [6] [7]

#### 3.1.5. Akusztikus mérések

A fémhabok hangelnyelő tulajdonságát általában egy impedancia csőben mérik, mely gyors és precíz mérést tesz lehetővé. Az impedancia cső tartalmazza a korong alakú mintát az egyik végéhez közel a hátsó faltól változtatható távolságban és a hangszórót, a másik végén pedig a

detektort. A szokásos hangfrekvencia tartomány vizsgálatához 60 cm hosszú és 30-100 mm átmérőjű csövet használnak. A csillapítást általában a frekvencia függvényében mérik, és az abszorpciós görbékkel jellemezhető az adott fémhab.

#### 3.1.6. Porozimetria és permeametria

Nyitott cellás pórusok esetén a belső tulajdonságokkal kapcsolatos tulajdonságok meghatározása fontos, ezek a fajlagos felület, a pórus-és csatornaméret-eloszlás, ehhez számos különböző módszer alkalmaznak.

##### Higanyporozimetria

A módszer során nyomás alatt higanyt préselnek a minta pórusaiba. A behatolt mennyiség és a nyomás kapcsolatban vannak a pórustérfogattal. Azonban a néhány száz mikrométernél nagyobb pórusok detektálása nehéz ezzel az eljárással.

##### Gázadszorpció

Ez módszer hasonló a higanyporozimetriához, azonban itt inert gázt, általában nitrogént alkalmaznak. Így meglehetősen pontosan meghatározható a fémhab belső felület. Még a nagyon kicsi pórusok, egészen az atomi méretskáláig kimutathatóak.

##### Permeametria

Ez a módszer gáz vagy folyadék pórusos anyagon való átáramlásának vizsgálatán alapul. A mérés során vizsgálják a nyomásesést a kolonna mentén az átlagos áramlási sebesség függvényében. A folyadék viszkozitását ismerve meghatározható permeabilitás és a súrlódási együttható, ezekből lehet következtetni a hab belső felületének méretére. Azonban az így meghatározott értékek alacsonyabbak, mint a gázadszorpciós során a BET modellel meghatározott értékek, mivel nem a teljes belső felület hat kölcsön az áramló folyadékkal. [6]

#### 3.1.7. Buborékpont módszer

A módszer során először a pórusokat folyadékkal töltik meg, ezután folyamatosan növelik a nyomást. Egy bizonyos nagyságú nyomás esetén a folyadék kapilláris erejének köszönhetően a folyadék kifolyik a pórusokból ellenállásesést okozva. A nyomás további növelésének hatására az egyre kisebb pórusokból is távozik a folyadék, amíg a minta kiszárad. A permeametria során mért áramlási sebességet a nyomásesés függvényében ábrázolva és a megfelelő száraz minta görbéjével összevetve meghatározható a minta legnagyobb pórusának mérete és a pórusméret-eloszlás is. [6]

#### 3.1.8. Elektromos- és hővezetés vizsgálata

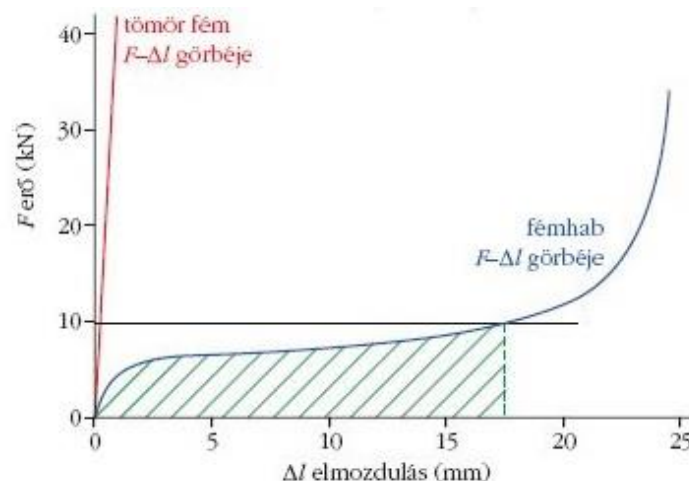
Az elektromos- és hővezetés mérésére ugyanazokat a módszereket alkalmazzák, mint más anyagok vizsgálata esetén. A vizsgálatok kimutatják, hogy elektromos vezetőképességük

jelentősen alacsonyabb, mint a tömör fémek esetén, hővezető képességük pedig igen csekély, hőszigetelőként alkalmazhatóak a bennük található nagymennyiségű levegő miatt.

### 3.2. Destrukzív vizsgálati módszerek

#### 3.2.1. Mechanikai vizsgálatok

A mechanikai vizsgálatok a fémhabok szerkezeti anyagként való felhasználásának előfeltétele. 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. Emiatt az összenyomáshoz szükséges erő ebben a szakaszban közel konstans. A fémhab összenyomási deformációs görbéje így három részből áll: egy kezdeti, lineárisnak tekinthető szakaszból, az ezt követő hosszú platószakaszból, és végül az úgynevezett denzifikációs szakaszból, amelyben a már összeroppant cellák tömörödése megy végbe. Ennek a hosszú platószakasznak köszönhető, hogy a fémhabok 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 11. ábra, ahol azonos külső geometriájú tömör fém, valamint fémhab összenyomási görbéje található. 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. [2]



11. ábra: Egy tömör fém és egy fém hab deformációs görbéje [2]

#### 3.2.2. Korrózióvizsgálat

A pórusos fémek korrózióval szembeni ellenállása gyengébb, mint a tömör fémeké a nagy fajlagos felület, és a nagy felületre kiterjedő negatív görbület miatt. [9] Jelenleg még nincs elfogadott standard vizsgálat a pórusos fémek korróziójának vizsgálatára, azonban a tömör



fémek vizsgálatára kifejlesztett rutin vizsgálatok nem alkalmazhatóak. A különböző iparágak sajátos standardekert állítottak fel, ilyen például az autóiipari alkatrészek korróziójának vizsgálata. [6]

#### **4. Fémhabok alkalmazása**

A fémhabok alkalmazási területét mechanikai, elektromos, akusztikus, kémiai tulajdonságaik nagymértékben befolyásolják. Összenyomással, benyomással, ütéssel való alakításuk sajátos, lényegesen eltér a tömör fémeknél megszokottól. Merevek és jó alakítási, hővezetési tulajdonságokkal is rendelkeznek. Szilárdságuknál és lyukacsos szerkezetüknél fogva jó ütközésienergia-elnyelők, magashőmérsékleti és nagynyomású szűrők; akusztikus tulajdonságuk révén jó hangszigetelők.

Az ütközési energia elnyelését használják ki az autógyártásban és golyóálló mellények béléseként történő felhasználásuk során. Hővezetési képességük nem jó, ezért fémhabokat hőszigetelőként is használnak. Elektromos vezetőképességük is lényegesen kisebb a tömör fémekénél. Ütés- és tűzálló, illetve hőszigetelő tulajdonságuk miatt jól alkalmazhatóak veszélyes anyagok, vagy nagy értékű, érzékeny berendezések csomagolóanyagának gyártására. A járműipar a legelterjedtebb felhasználási területük, ahol könnyű szerkezeti és térelválasztó anyagokat, úgynevezett szendvicspaneleket készítenek belőlük.

A kutatások során felfedezett újabb tulajdonságaik egyre szélesebb körű alkalmazási lehetőségeket kínálnak. Felhasználják őket nagy fajlagos felületük miatt kémiai katalizátorok hordozóanyagaként, akkumulátorokban nagy felületű elektródaként. Robbanásveszélyes folyadékok tárolására szolgáló tartályok belső terét szintén fémhabbal töltik ki. Az elektrotechnika is kezdi felismerni ezen új anyagok jelentőségét. Nagyteljesítményű félvezető eszközöknél hőelvezetésre használnak speciálisan erre a célra készített, réz alapanyagú fémhabokat. Rendkívül jó hűtőteljesítményt sikerült elérni ezen a területen is. Méltán nevezi a Europhysics News egyik cikke a fémhabokat a XXI. század anyagának. [3] [4]

A fémhabok felhasználási területe két nagy csoportra osztható, ezek alapján megkülönböztetünk szerkezeti és funkcionális alkalmazásokat.

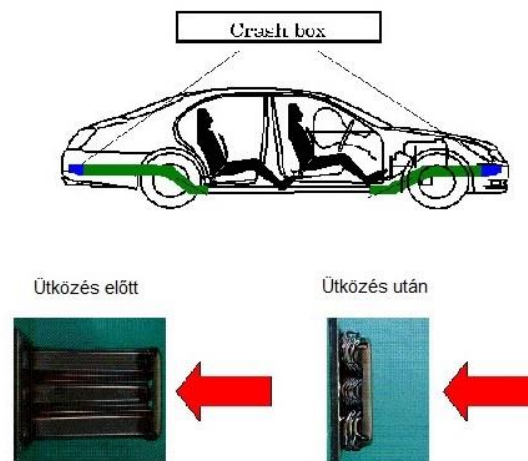
##### **4.1. Szerkezeti felhasználás**

A fémhabok szerkezeti anyagként való felhasználását elsősorban két nagy iparág hasznosítja, a járműipari és az építőipar.

#### 4.1.1. Járműipar

A járműipar szinte minden területén megtalálhatóak a fémhabok, így beépítik személygépjárművekbe, hajókba, vonatokba, repülőkhöz, melyekben két legfontosabb funkciója az energiaelnyelés és a tömeg csökkentése.

A passzív biztonsági szabályozások a járművekben megkövetelik, hogy az ütközési energia elosztódjon és elnyelődjön a megfelelő helyeken egy masszív és biztonságos utasteret létrehozva. A 20 km/h sebességnél nagyobb ütközések esetén a kijelölt területeken az ütközési elemeknek kontrollált és programozott deformációja zajlik le, ezeket az elemeket nevezik „crash box”-nak, melyek alumínium habból készülnek. A fémhabok alkalmazása előnyös, mivel a 3.2.1. fejezet alapján is elmondható, hogy deformációjuk nagy mennyiségű energiát emészt fel. A „crash boks” elhelyezkedése és a deformációja a 12. ábrán látható.



**12. ábra:** „Crash box” elhelyezkedése egy 2008-ban gyártott Mazda Atenzaban és a „crash box” deformációja ütközés hatására [10]

Alumíniumhabok alkalmazását járművekben a nagy szilárdság-tömeg arány teszi lehetővé, így a tömeg csökkentése nem jár együtt a biztonság csökkenésével. A tömeg csökkentése pedig elengedhetetlen az egyre szigorúbb környezeti előírások miatt.

Versenyautókban a motorteret az utastértől elválasztó acéllemezből készült elemet alumínium habszendvics alkatrészre cserélték, ezzel nem csak a tömeget csökkentették 25%-kal, hanem ezzel egy időben a merevséget is növelték 700%-kal. [6]

#### 4.1.2. Építőipar

A mai modern épületek homlokzatát gyakran panelekkel borítják be, ezzel megadva az épület megjelenését. A paneleknek könnyűnek, merevnek és tűzállónak kell lennie. Elég gyakran márványból vagy egyéb kőzetből készülnek ezek a burkolatok, azonban ezeket a drága anyagokat egyre többször helyettesítik fémhabokból készült borítással.

Az erkélyek korlátjainak szigorú előírásoknak kell megfelelniük. Az általánosan használt alapanyagok túl nehezek vagy nem tűzállóak, ezeket a problémák megoldhatók fémhabok alkalmazásával.

A kis sűrűségű alumíniumhabokat gyakran alkalmazzák kis tömegű tűzgátló ajtóknak, mivel kis hővezetési képességgel és nagy tűzállósággal rendelkeznek. Habár az alumínium olvadáspontja  $660^{\circ}\text{C}$ , ami alacsonynak mondható, a belőlük készült hab meglepően ellenáll a nyílt lángnak, az erős oxidációnak köszönhetően, ami ilyen körülmények között lejátszódik. [6]

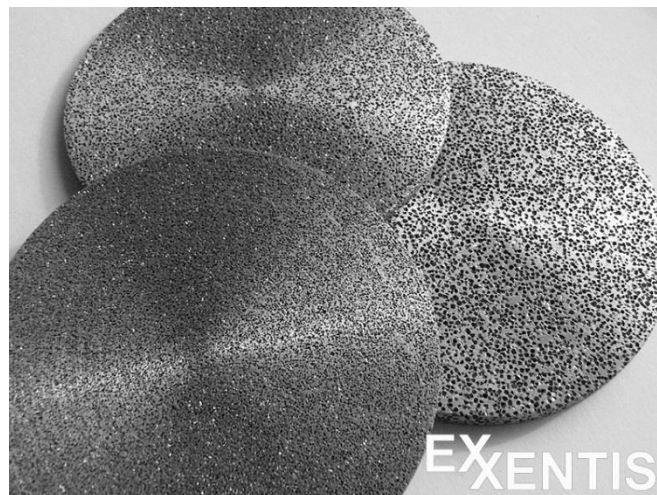
## 4.2. Funkcionális felhasználás

### 4.2.1. Hangszigetelés

A fémhaboknak számos előnye van más hangszigetelésre használt anyagokkal szemben: nagy merevség és szilárdság, jó tűzálló képesség, jó fénytörőképesség, alacsony nedvességfelvétel, kimagasló ütési energia elnyelési képesség. Ennek köszönhetően széles körben alkalmazzák hangszigetelésre és rezgéscsillapításra repülőgépekben, vonatokban, autókban, gépekben és épületekben, továbbá fegyverek hangtompítójában is. [11]

### 4.2.2. Szűrés

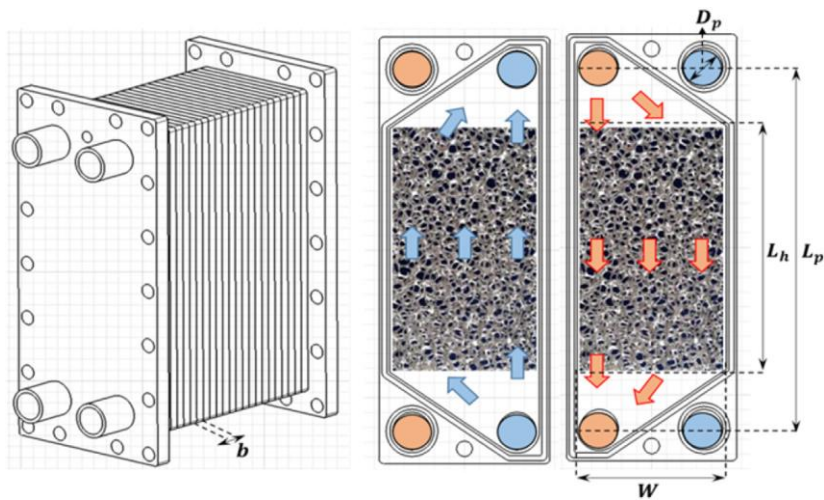
Két típusú szűrőt különböztetünk meg: az egyik visszatartja és elválasztja a folyadékban eloszlott részecskéket, a másik a gázban eloszlott szilárd vagy folyadék halmazállapotú részeket tartja vissza. Az első esetben a fémhabból készült szűrő használható újrahasznosított polimerömladék tisztítására vagy sörből élesztő eltávolítására. A második esetben a fémhab használható víz eltávolítására levegőből vagy egyéb gázból. A szűrők legfontosabb jellemzői a szűrési kapacitás, a visszatartás, a tisztíthatóság, a korrózióállóság, a mechanikai tulajdonságok és az ár. [6] Néhány, kereskedelmi forgalomban kapható alumíniumhab-szűrő látható a *13. ábrán*.



**13. ábra:** Alumíniumhabból készült szűrőbetétek [12]

#### 4.2.3. Hőcserélők

Réz és alumínium habok, melyek nagy vezetőképességgel és nyitott porusrendszerrel rendelkeznek, használhatók hőcserélőként. A hőcsere végrehajtható a gázokat vagy folyadékokat a fémhabon átáramoltatva, miközben a fémhabot hűtik vagy melegítik, a folyamat elvi vázlat a 14. ábrán látható. A nyitott porusoknak köszönhetően a nyomásesés minimalizálható. Legelterjedtebben mikroelektronikai eszközök hűtése során a hűtőbordákban alkalmazzák ezt a módszert. Ezen a felhasználási területen a legfontosabb elvárások a nagy fajlagos felület, kis áramlási ellenállás, és jó hővezető-képesség. [6]



14. ábra: Fémhabot tartalmazó hőcserélő elvi vázlat [13]

#### 4.2.4. Tűzgátlók

Fémhabok alkalmazásával megállítható a tűz terjedése éghető gázokat szállító csővezetékben, még akkor is, amikor a tűz terjedési sebessége eléri az 550 m/s-ot. A gyakorlatban a lehetséges gyújtóforrás közelében építik be csővezetékbe, amennyiben a gyulladás bekövetkezik, a lángok terjedési sebessége nem tud felgyorsulni, mivel a beépített tűzgátló megakadályozza a lángok terjedését.



15. ábra: Duocel® alumínium tűzgátló [14]

## Irodalomjegyzék

- [1] F. García-Moreno, „Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production,” *Materials*, 9. kötet, 2016.
- [2] Cs. Kádár, P. Kenesei, „Napjaink korszerű anyagai: a fémhabok,” *Fizikai Szemle*, p. 279., 7-8. 2008.
- [3] P. Kenesei., Cs. Kádár., Zs. Rajkovits és J. Lendvai, „Fémhabok előállításának módszerei,” *Anyagok Világa*, április 2001.
- [4] J. Banhart, „Foam Metal: The Recipe,” *Europhysics News*, 30. kötet, pp. 17-20, 1999.
- [5] J. Banhart, „Manufacturing Routes for metallic foams,” *JOM*, 52. kötet, pp. 22-27, 2000.
- [6] J. Banhart, „Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams,” *cellular metals and metal foams*, .46. kötet, pp. 559–632, 2001.
- [7] J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck, „On the Non-Destructive Testing of Metal Foams,” in *Metal Foams and Porous Metal Structures*, Germany, MIT Press-Verlag, 1999, pp. 213-214.
- [8] T. A. Varga, T. Mankovits, „Fémhabstruktúrák elemzése és geometriai modellezése,” *International Journal of Engineering and Management Sciences*, 1. kötet, pp. 145-152, 2016.
- [9] V. Shapovalov, „Porous Metals,” *MRS Bulletin*, 19. kötet, pp. 24-28, 1994.
- [10] [Online] [https://www.nipponsteel.com/en/news/old\\_smi/2008/news2008-02-05.html](https://www.nipponsteel.com/en/news/old_smi/2008/news2008-02-05.html). (Utolsó hozzáférés dátuma. 2019.11.09.)
- [11] P. S. Liu, G. F. Chen, „Application of porous metals,” *Porous Materials*, pp. 113-188, 2014.
- [12] [Online]. <https://www.exxentis.co.uk/porous-aluminium/applications/filters-and-filter-elements/>. (Utolsó hozzáférés dátuma: 2019.11.10)
- [13] D. Y. Kim, T. H. Sung, K. C. Kim, „Application of metal foam heat exchangers for a high-performance liquefied natural gas regasification system,” *Energy*, 105. kötet, pp. 57-69, 2016.
- [14] [Online]. <http://ergaerospace.com/photo-gallery/>. (Utolsó hozzáférés dátuma: 2019.11.09.)

