

# Keményforrasztott nyílt cellás alumínium habok gyártása és a létrehozott kötés minőségének vizsgálata

## Manufacturing of brazed open-cell aluminum foams and testing the quality of the created bond

KÓNYA Zalán Csaba<sup>1,2</sup>, Dr. KEMÉNY Alexandra<sup>1,2</sup>, Prof. Dr. ORBULOV Imre Norbert<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

<sup>2</sup> MTA-BME Lendület Nagyteljesítményű Kompozit Fémhabok Kutatócsoport, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

### Abstract

*This research focused on creating a durable bond between open-cell aluminum metal foams using brazing technology. Based on the measurements used to test the quality of the brazing, a strong bond was formed between the brazing sheet and the aluminum foam. The brazing also improved the foam's resistance to bending without drastic changes to other physical properties, such as their density. The maximum stress value during the bending of the brazed foams was an average of ~54 % higher compared to the infiltrated pure aluminum foams, meanwhile the increase in the density was only ~16 %. The relative density of the brazed aluminum foams compared to the bulk aluminum was ~44 %.*

**Keywords:** aluminum foam, open-cell metal foam, brazing

### Kivonat

A kutatásunk nyílt cellás alumínium fémhabok közötti tartós kötés kialakítását tűzte ki célul, keményforrasztási technológiát alkalmazva. A forrasztás tesztelésére szolgáló mérések alapján a stabil, kohéziós kötés alakult ki a forrasztólemez és az alumíniumhab között, illetve sikerült javítani a fémhab hajlítással szembeni ellenállását további fizikai jellemzők, mint például a sűrűség drasztikus változtatása nélkül. A forrasztott darabok hajlítás során felvett maximális feszültségértéke átlagosan ~54%-kal nőtt az infiltrált ötvöztelen alumínium habhoz képest, míg a sűrűsége csupán ~16%-kal növekedett meg. A forrasztott alumíniumhab relatív sűrűsége a tömbi alumíniumhoz képest ~44% volt.

**Kulcsszavak:** alumíniumhab, nyíltcellás fémhab, keményforrasztás

## 1. BEVEZETÉS

A fémhab egy porózus szerkezet, amely szilárd fémből áll, és nagy arányban tartalmaz gázzal töltött pórusokat. Jellemzően a teljes térfogat 40–95%-át üregek vagy pórusok alkotják. Ezek a pórusok lehetnek elszigeteltek (zárt hab), de alkothatnak összefüggő hálózatot is (nyílt cellás hab), vagy ezek kombinációját. A fémhabok megőrzik az alapfém néhány tulajdonságát, amelyből a habszerkezet készült [1].

A könnyűszerkezetek kiválóan alkalmazhatók az űrparban, és alumíniumhabokat energetikai célokra is felhasználhatják. Az energiaelnyelés, az alakváltozás lokalizálása és a mechanikai csillapítás különösen fontos az autópárhban és a repülőgéppárhban. Az autók passzív biztonsági rendszerei nagy potenciállal bírnak ahhoz, hogy a fő fejlesztési irányok egyikévé váljanak. Más járművek is profitálhatnak az alumíniumhab tulajdonságaiból [2].

A nyíltcellás fémhabok olyan könnyű, porózus anyagok, amelyek különféle fémekből, például alumíniumból, ezüstből, rézből, magnéziumból vagy titánból készülhetnek, szerkezetük habszerű, légbuborékokat tartalmaz. Ezen anyagok nagy előnye, hogy kombinálják a fémek szilárdságát az alacsony relatív sűrűséggel, esetünkben 37–40% az ötvöztelen alumíniumnak, ami kiváló ütéselnyelő képességet biztosít. Ennek köszönhetően széles körben használják őket a járműparban, repülőgépgyártásban.

A fémhabok különleges szerkezetük miatt speciális kötési technológiákat igényelnek, amelyek közül a ragasztás, forrasztás és hegesztés is szóba jöhet [3]. A fémhabok forrasztási technológiáit, különösen a réz-

[4, 5] és alumíniumhabokat [6–8] illetően, kutatások vizsgálták már korábban, tekintettel ezek egyedi porózus szerkezetére és mechanikai tulajdonságaira, azonban elsősorban tömör lemezek közötti szendvicsszerkezetek előállítására irányultak, nem habszerkezetek összekötésére.

A gyakorlatban a fémhabok gyártása a méretüktől és típusuktól függően költséges lehet, a gyártási költségek csökkentésére vagy a megvalósíthatóság érdekében az összeszerelési technikák kínálnak megoldást. Ezen a területen a keményforrasztás a későbbiekben kiemelt szerepet kaphat.

## 2. GYÁRTÁS

### 2.1. Fémhabgyártás

A fémhabokat ötvözetlen alumíniumból, öntési eljárással, úgynevezett kisnyomásos infiltrálással gyártottuk, amit fontos előkészületi lépések előztek meg. Egy szerkezeti acél zártszelvényből hegesztett tégely belső felületére grafitot vittünk fel, ezzel megakadályozva az olvadék és a tégely egymással való reakcióját. A tégely oldalára hegesztett kivezető csövet lezártuk alumínium-oxid paplannal, ez a légáteresztő rés könnyíti az olvadék infiltrálását, és megakadályozza annak kifolyását az öntőformából. Az útszóró só (NaCl) eltérő lyukméretű sziták segítségével osztályoztuk, amelyekből 3,0 – 4,0 mm mérettartományban alkalmaztunk a fémhab gyártása során. Ezután beletöltöttük az adott térfogatú útszóró sót, ami a tégely magasságának ~45%-át tette ki, ezt rozsdamentes acél ráccsal zártuk le. Így nem tudnak elmozdulni a szemcsék a teljes gyártás folyamata alatt. Mivel a só rossz hővezető, az előmelegítési folyamat közel 2 órát vett igénybe 550°C-on.

Az öntéshez az ötvözetlen alumíniumot (99,7% tisztaságú) IND IF-10 típusú indukciós kemencében (Induktor Kft., Diósd, Magyarország) olvasztottuk meg, 8 kW teljesítmény mellett, párhuzamosan az előmelegítéssel, ami egy ProThermo Hofmann dobozkemencében (Prothermo-Hofmann Kft., Kecskemét, Magyarország) történt. Az öntési folyamatot az olvadék 750°C-os hőmérsékletén kezdtük, amit lehűlés közben mértünk egy Maxthermo MD-3003K digitális hőmérővel (Maximum Electronic Co Ltd., Hszinpej, Taiwan). Az olvadt alumínium bejutását a sószemcsék közé argongáz kisnyomásos (3,5 bar) kézi infiltrálással segítettük elő.

A végtermék levegőn hűlt, utólagos hőkezelést nem alkalmaztunk. A teljes kihűlést követően az öntőformából eltávolítottuk a habot, azt nem megsértve. A sót kiáztattuk először állóvízben, majd folyóvíz alatt.

### 2.1. Forrasztás

A fémhabot ~12x55x120 mm-es méretű darabokra vágtuk egy Struers Discotom-10 vízhűtéses vágógéppel (Struers, Koppenhága, Dánia), 10S25 abrazív vágótárcsával 2850 1/min fordulatszámon, 0,5 mm/s előtolás mellett. A forrasztási felületeket felcsiszoltuk SiC csiszolópapírral P600-as minőségig. A forrasztandó habfelületekre, illetve a forraszlemezre Flussmittelpaste AL-100 típusú folyósítószer (Technolit GmbH, Großlütder, Németország) vittünk fel. A forraszlemez egy három rétegű, erre a célra gyártott lemez. A külső borításai ~AlSi9, úgynevezett 'liner', míg a belseje kismennyiségű ötvözt tartalmazó alumínium mag. Egy, külön ehhez az eljárásához készített szerkezetben összeállítottuk a habokat és a lemezt (**Error! Reference source not found.**). Ez a szerkezet két 10 mm vastagságú acél lemezből állt, amit négy ponton csavar kötéssel rögzítettünk. A csavarkötés a hő hatására meglazulhat, ezért egy ~27 N súlyú tömeggel állandó terhelést biztosítottunk az összeállított habszerkezetnek. A terhelés hozzájárult a felületek közötti kötés kialakításához.



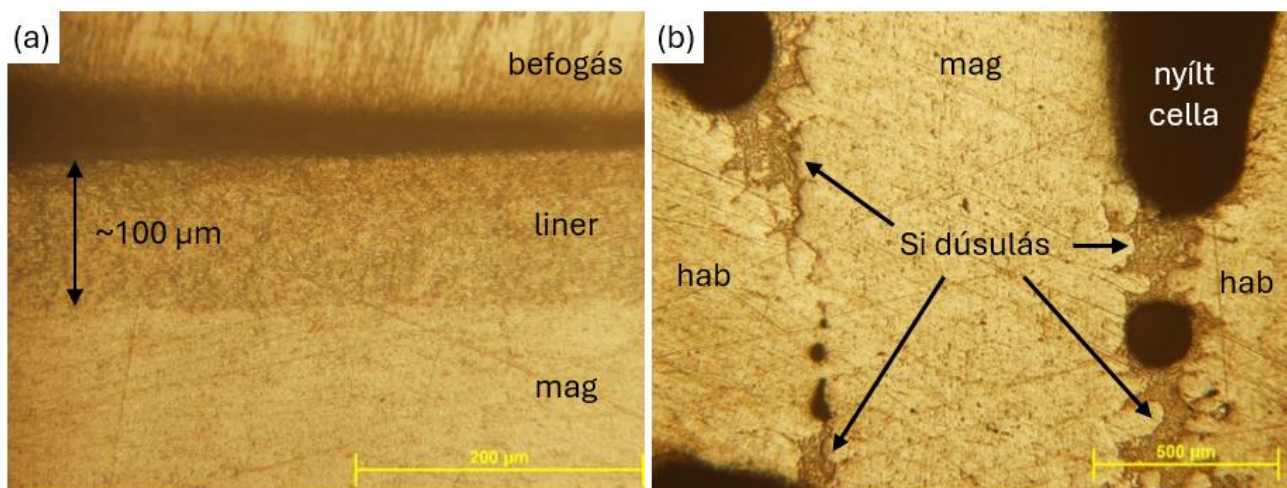
1. ábra. Forrasztási elrendezés fotója

A keményforrasztás alatt a forraszlemez magja és a hab nem olvad meg, a liner viszont igen. A hőntartás folyamata ~75 percen keresztül tartott, állandó 630°C-os hőmérsékleten. Ez a hőmérséklet az ötvözetlen alumínium olvadáspontjának (660°C) a ~95%-a. A forrasztott darab a kemencéből való kivétel után levegőn hűlt, szerkezeten kívüli, extra nyomó terhelés nélkül. Az elkészült egységet a mérésekhez ~20x25x100 mm-es méretre vágtuk a korábban alkalmazot berendezéssel és paraméterekkel. Egyéb utómunkára nem volt szükség.

### 3. MÉRÉSEK, EREDMÉNYEK

#### 3.1. Mikroszkópia

A mikroszkópos vizsgálat által jobban megérthetővé válik a forraszanyag szerkezete, illetve a keményforrasztás alatt végbemenő folyamatok. Egy forrasztott szeletet, illetve egy, a forraszlemezről kimunkált darabot, beágyaztam a könnyebb metallográfiai előkészítéshez. Egy forgótárcsás vizes csiszolóval P4000 minőségig, majd azután Topol 1 szuszpenzióval tettük láthatóvá a szilíciumtartalmat. Egy Olympus PMG-3 optikai mikroszkóppal vizsgáltuk a minták mikroszerkezetét. A felvételeken jól látszik a hengerelt forraszlemez felépítése, illetve a liner vastagsága és magas szilícium tartalma (**Error! Reference source not found.** (a)). A nagy szilícium tartalmú liner megolvadt és dúsulások képződtek a hab és a mag anyaga között, a szilícium beoldódott. A hab és a mag között közvetlen kapcsolat alakult ki (2. ábra (b)).



2. ábra. A forraszanyag (a) és forrasztott szerkezet (b) mikroszkópi felvétele

A forraszlemez elemösszetételét WAS PMI-Master Sort optikai spektroszkóppal (WAS Worldwide Analytical Systems AG, Uedem, Németország) vizsgáltuk (1. táblázat), külön a külső liner és a belső mag összetételét.

A forraszlemez elemösszetétele

1. táblázat

|       | Ötvözet | Si<br>(t%) | Fe<br>(t%) | Cu<br>(t%) | Mn<br>(t%) | Mg<br>(t%) | Cr<br>(t%) | Zn<br>(t%) | Ti<br>(t%) | Al<br>(t%) |
|-------|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| mag   | 3117    | 0,33       | 0,15       | 0,86       | 1,18       | -          | 0,06       | 0,005      | 0,13       | 97,3       |
| liner | 4147    | 11,6       | 0,23       | 0,006      | 0,014      | 0,16       | 0,001      | 0,007      | 0,008      | 88,0       |

#### 3.2. Hárompontos hajlítás

A hajlított darabok geometriai méreteit egy Mitutoyo Absolute Digimatic CD-15DC tolómérő (Mitutoyo Corporation, Kawasaki, Japán) segítségével határoztuk meg, a tömegét pedig egy Denver Instrument APX 200 precíziós mérleggel (Denver Instrument Co., Denver, CO, USA) mértük. A mért adatokat és az azokból számított sűrűségértékeket tartalmazza a 2. táblázat. Látható, hogy az infiltrált habok sűrűsége a víz sűrűségével közel megegyezik, de a forrasztott habok sűrűsége is csak ~16%-kal növekedett meg, 44%-os relatív sűrűséggel a tömör alumíniumhoz képest.

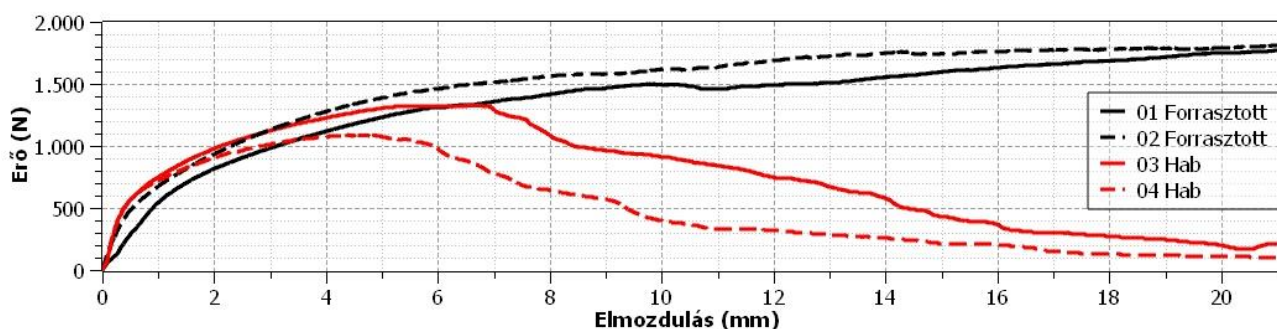
| Próbatest       | a<br>(mm) | b<br>(mm) | t<br>(mm) | m<br>(g) | V<br>(cm <sup>3</sup> ) | $\rho$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|----------|-------------------------|--------------------------------|
| 1 (forrasztott) | 20,57     | 102,03    | 25,78     | 64,48    | 54,09                   | 1,19                           |
| 2 (forrasztott) | 20,89     | 101,74    | 26,35     | 66,18    | 56,01                   | 1,18                           |
| 3 (infiltrált)  | 21,68     | 109,57    | 26,77     | 64,79    | 63,60                   | 1,02                           |
| 4 (infiltrált)  | 20,71     | 109,31    | 26,60     | 61,86    | 60,21                   | 1,03                           |

A hajlítóvizsgálat során 5 kN erőmérőcellával szerelt Instron 5965 elektromechanikus univerzális anyagvizsgáló berendezést (Instron, Norwood, MA, USA) használtunk, a folyamatot pedig fix pozicionálású kamerával rögzítettük. Az alátámasztások közti távolság 85 mm, a nyomóhenger és az alátámasztó hengerek átmérője pedig Ø25 mm voltak. A mérés során a berendezés keresztfeje mozgott lefelé 5 mm/min sebességgel, az adatokat a berendezéssel összekötött számítógép 100 ms lépéssel rögzítette. A hárompontos hajlítás során négy próbatestet vizsgáltunk. A 3. ábrán látható egy próbatest hajlító vizsgálata lépésről lépésre. A repedés látványosan megáll a forraszlemezénél. A mérések alatt egy forraszlemez sem repedt, szakadt el.



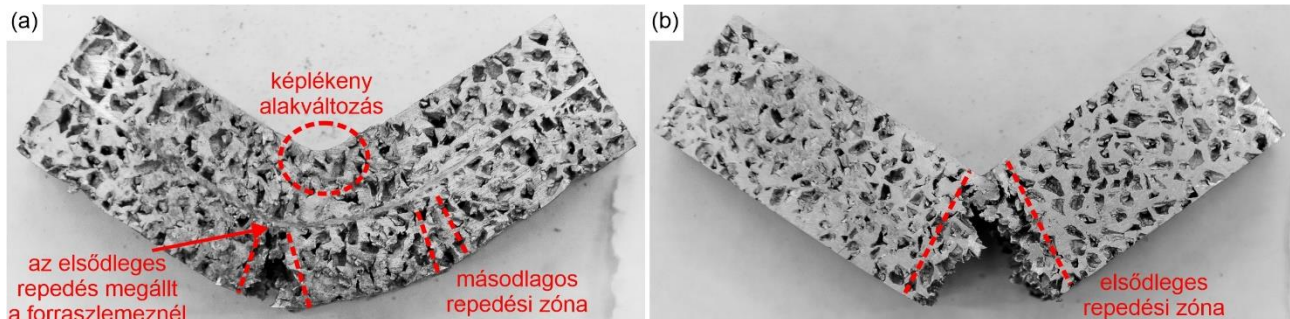
3. ábra. Hárompontos hajlítás folyamata

Kezdetben a forraszlemez a hajlítás semleges szála, hiszen az a magasság felénél helyezkedik el. A repedés megkezdődése után, a diagramon (4. ábra) is jól láthatóan, átveszi a terhelést. A hajlítás során, 21 mm-es lehajlásig a maximális számított feszültség a forrasztott haboknál átlagosan 3,7 MPa, míg az infiltrált haboknál ez az érték 2,4 MPa, tehát a keményforrasztással 56%-kal megnöveltük a hab hajlítással szembeni ellenállását.



4. ábra. A hajlítás során rögzített erő-elmozdulás görbék

A forrasztott haboknál a mérés során nem lép fel instabilitás és erőcsökkenés, mivel a forraszlap jelentős terhelést képes felvenni. Ennek következményeképpen a felső nyomott oldalon képlékeny alakváltozást figyeltem meg, amely a nem forrasztott habokon egyáltalán nem volt megfigyelhető. Míg előbbieknél az elsődleges repedés terjedése megállt a forraszlapnál, és ennek következtében egy második repedési zóna alakult ki a húzott oldalon (5. ábra (a)), az utóbbiaknál csak egy, elsődleges repedési zóna alakult ki, amely végigfutott a darab teljes keresztmetszetén (5. ábra (b)), és jelentős erőcsökkenést okozott, elvesztve a szerkezet teherbírását.



5. ábra. A középben keményforrasztott (a) és nyílt cellás fémhab (b) alakváltozási mechanizmusa hárompontos hajlítás során

#### 4. KÖVETKEZTETÉSEK

A keményforrasztás alkalmazásával sikerült olyan kötéseket létrehozni, amelyek jelentősen javítják az alumínium fémhabok mechanikai tulajdonságait az önálló habhoz képest, és a sűrűsége is csak kismértékben növekszik. A keményforrasztott alumínium fémhabok ipari alkalmazása jelentős előnyökkel járhat. Ezek az előnyök nemcsak a termékek teljesítményét növelik, hanem hozzájárulnak az energiahatékonyság javításához és a környezeti terhelés csökkentéséhez is. Ez új piacok megnyitását és innovatív termékek kifejlesztését teszi lehetővé. Ez a fejlesztés nagy jelentőséggel bír, mivel az alumínium fémhabok hagyományos korlátjainak bővítését jelenti.

#### IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Laughlin D.E., Hono K. *Physical Metallurgy* (Ötödik Kiadás), Elsevier, Amszterdam, 2014, 2399-2595.
- [2] Garai F. *Modern Applications of Aluminium Foams*. International Journal of Engineering and Management Sciences, 2020, 5(2), 14-21.
- [3] Lienert T. Siewert T., Babu S., Acoff V. *Welding Fundamentals and Processes*, ASM International, Novelty OH, 2011, 3-12.
- [4] Mohd Zahri N.A., Yusof F., Badruddin I.A., Haseeb A.S.M.A., Sukiman N.L., Kamangar S. *Deformation and Fracture Behavior of Sandwiched Copper Foam Brazed Joint Using Amorphous Copper-Tin-Nickel-Phosphorus Filler*, Frontiers in Materials, 2021, 8:665219
- [5] Sami, M. M., Zaharinie, T., Yusof, F., Ariga, T. *Investigation on Strength and Microstructural Evolution of Porous Cu/Cu Brazed Joints Using Cu-Ni-Sn-P Filler*. Metals, 2020, 10(3), 416.
- [6] Bangash, M. K., Ubertaini, G., Di Saverio, D., Ferraris, M., Jitai, N. *Joining of Aluminium Alloy Sheets to Aluminium Alloy Foam Using Metal Glasses*. Metals, 2018, 8(8), 614.
- [7] Lu X., Luo H., Yang S., Wei Y., Xu J., Yao Z. *Two-step foaming process combined with hot-rolling in fabrication of an aluminium foam sandwich panel*, Materials Letters, 2020, 265, 127427.
- [8] Zhang J., Cheng H., Huang X., Sun D. *Microstructure and properties of aluminum foam/aluminum sandwich prepared by brazing*. Transactions Of The China Welding Institution, 2019, 40(8), 144-149