



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLOGIA TANSZÉK

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

KÓNYA ZALÁN CSABA

(GÉPÉSZMÉRNÖKI SZAK BSC, 3. FÉLÉV)

Nyílt cellás alumínium habok forrasztása

Konzulens:

Dr. Kemény Alexandra

Adjunktus, BME ATT

Budapest, 2024

NYILATKOZATOK

Elfogadási nyilatkozat

Ezen dolgozat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Tudományos Diákköri Konferenciára előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a célkitűzésekben megfogalmazottaknak maradéktalanul eleget tesz. Ezen dolgozatot a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2024. 11. 10.

.....

konzulens

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, Kónya Zsolt Csaba (MICWVT) a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2024. 11. 10.

.....

hallgató

TARTALOMJEGYZÉK

Tartalom

Előszó.....	4
1. Összefoglalás	5
1. Summary	6
2. Bevezetés	7
2.1. Célkitűzések, áttekintés	8
3. Irodalmi áttekintés.....	9
4. Kísérleti munka	16
4.1. Gyártás	16
4.2. Forrasztás	17
4.3. Mérések.....	20
4.3.1. Hárompontos hajlítás.....	20
4.3.2. Lehajlás	21
4.3.3. Mikroszkópia.....	22
5. Mérések kiértékelése.....	23
5.1. Hárompontos hajlítás	23
5.2. Lehajlás.....	24
5.3. Mikroszkópia	25
6. Konklúzió.....	28
7. Felhasznált források	29

ELŐSZÓ

Széles körben, különböző iparágak következő lépcsőfokául szolgálhat a fémhabok alkalmazása, ha jelenlegi gyártási és kötéstechológiai nehézségeit kiküszöböljük.

* * *

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani konzulensemnek, Dr. Kemény Alexandrának, a támogatásáért, szakmai iránymutatásáért és az aktív részvételéért a mérésekben. Nélküle a kutatás nem jöhetett volna létre ilyen alapos és részletes formában. Köszönettel tartozom továbbá az Anyagtudomány és Technológia Tanszéknek, hogy rendelkezésemre bocsátották a szükséges eszközöket, és a tanszéki kollégáknak is a segítségükért és szakmai hozzájárulásukért.

Budapest, 2024. 11. 10.

Kónya Zalán Csaba

1. ÖSSZEFOGLALÁS

Az alumínium habok különleges cellaszerkezete, különösen a nyílt cellás habok esetében, számos ipari és mérnöki alkalmazásra kínál lehetőséget, ahol fontos a kis tömeg és a jó mechanikai tulajdonságok kombinációja. Azonban a fémhab darabok összeszerelése és mechanikai kapcsolat létrehozása nagy kihívást jelent a gyártás során. Kutatásomban ennek a problémának a megoldására keményforrasztási eljárás alkalmazását vizsgáltam, melyek az alumínium habok stabil összekötését teszik lehetővé.

A kutatás alapjául szolgáló alapanyag választása az ötvözetlen alumíniumra (Al 99,7) esett, melyet olvadáspontja miatt választottam. Az alumínium habokat két különböző cellaméretű változatban állítottam elő kisnyomásos kézi infiltrálással, hogy vizsgáljam, milyen hatással van a forrasztás jóságára a fémhab szerkezete. Az összehasonlítás során pedig két különböző típusú, alumíniumötvözet alapú forrasztanyagot alkalmaztam, hogy megtaláljam az optimális forrasztanyagot a fémhabok összekötéséhez. A vizsgálati módszereim között szerepelt a hárompontos hajlítás, a zömítés, valamint él menti letörést is teszteltem a forrasztás mentén.

A kutatás során kapott eredmények további fejlődési irányokat mutatnak a fémhabok összeszerelési eljárásainak fejlesztésében. A forrasztási technológia paraméter optimalizációja segíthet abban, hogy a fémhabok nagyobb szerepet kapjanak az új anyagok fejlesztésében, különös tekintettel az energiahatékonyságra és a szerkezeti stabilitásra.

Kulcsszavak: *alumíniumhab, nyíltcellás fémhab, keményforrasztás*

1. SUMMARY

The unique cell structure of aluminum foams, especially in the case of open-cell foams, offers numerous industrial and engineering applications where a combination of low weight and good mechanical properties is essential. However, assembling metal foam pieces and creating mechanical connections pose significant challenges in manufacturing. In this research, the use of brazing processes was investigated to solve this issue, enabling a stable connection of aluminum foams.

The material chosen as the basis for the research was pure aluminum (Al 99.7) due to its melting point. Aluminum foams were produced in two different cell sizes using a low-pressure infiltration method to examine how the foam structure affects the quality of brazing. For comparison, two different types of aluminum alloy-based brazing materials were used with the aim of finding the optimal one for connecting metal foams. The testing methods included three-point bending, compression, and edge fracture tests along the brazed joint.

The results of the research indicate further directions of development for the assembly processes of metal foams. Optimizing the parameters of the brazing technology could help metal foams play a more significant role in the development of new materials, with particular emphasis on energy efficiency and structural stability.

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

2. BEVEZETÉS

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%-a az ötvözetlen alumíniumnak, ami kiváló ütéselnyelő képességet biztosít. Ennek köszönhetően széles körben használják őket a járműiparban, repülőgépgyártásban, valamint építőiparban, ahol fontos a súlycsökkentés és a mechanikai tulajdonságok megőrzése.

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, amely hosszú távon hozzájárulhat a fémhabok még szélesebb körű ipari felhasználásához. Ezen a területen a keményforrasztás kiemelt szerepet kaphat, amely két különálló fémhab egység tartós és erős, anyaggal záró összekötését teszi lehetővé.

Célom két különálló darab keményforrasztás általi összekötése (1. ábra), illetve a fémhab szilárdságának és hajlítással szembeni ellenállásának növelése.



1. ábra. Keményforrasztott fémhabszerkezet

2.1. Célkitűzések, áttekintés

A dolgozatom célja két alumíniumhab összekötése keményforrasztási technológiával, amellyel a hajlítással szembeni ellenállása is növelhető, így az alkalmazhatósága bővíthetővé válik.

Először a szakirodalomból áttekintettem a témához kapcsolódó részeket, amiből hasznos információkat merítettem és használtam fel.

A továbbiakban bemutatom a gyártási és mérési eljárásokat, azon belül az öntést, a keményforrasztást, és a mechanikai vizsgálatokat. Ezután értékelem a kapott eredményeket, majd levonom a végközvetkeztetéseket, és ismertetek jövőbeli lehetőségeket, hogy milyen irányban lehet tovább indulni a téma kutatásával kapcsolatban (2. ábra).



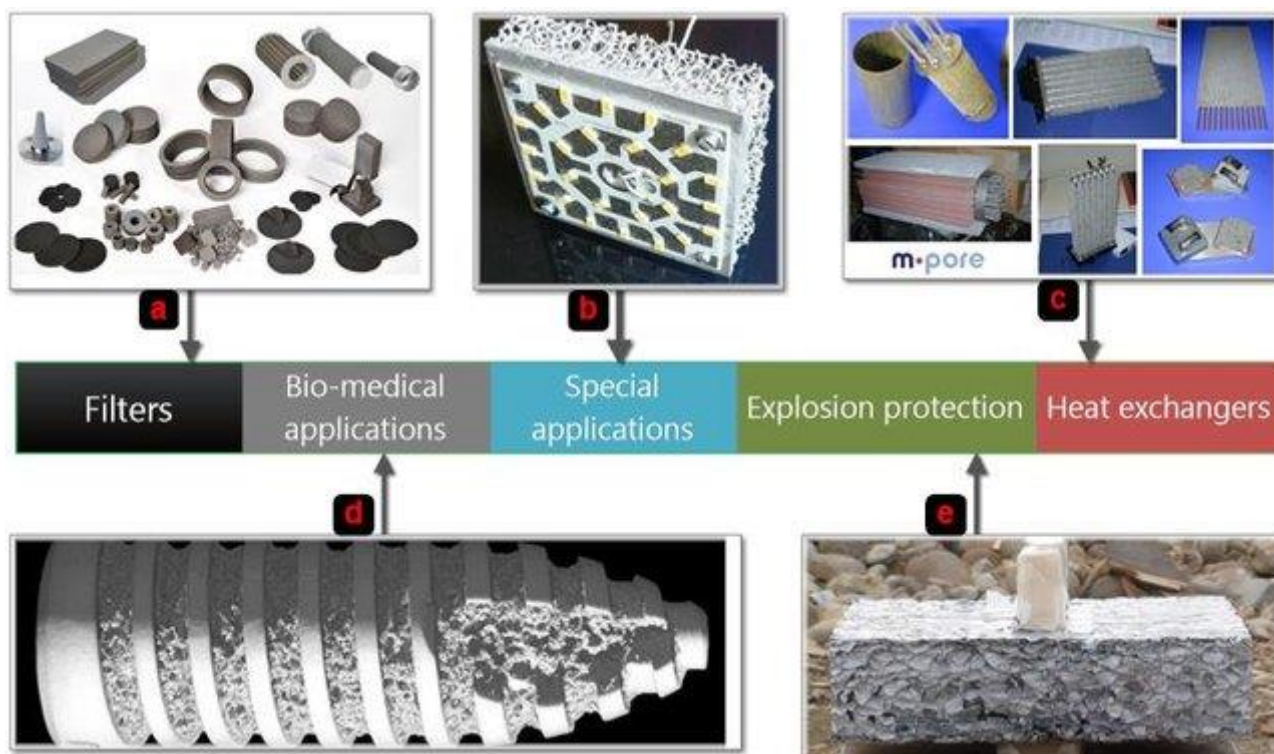
2. ábra. A dolgozat felépítése

3. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

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 (Boettinger, 2014).

Alkalmazásukat nagymértékben befolyásolják mechanikai, elektromos, kémiai és akusztikai tulajdonságaik. Az alumíniumhabok lehetséges alkalmazási területei (3. ábra):

- Könnyűszerkezetek: Kitűnő merevség-tömeg arány mechanikai terhelés esetén.
- Szendvicspanelek magjai: Az alumíniumhabok kis sűrűségűek, jó szívóssággal és nyomószilárdsággal rendelkeznek.
- Alakváltozó képesség: Az alumíniumhabok képesek nagymértékű alakváltozást elviselni szabályozott összenyomódással.
- Mechanikai csillapítás: Az alumíniumhabok csillapító kapacitása nagyobb, mint a tömör fémeké.
- Rezgéscsillapítás: A habosított panelek nagyobb sajátfrekvenciákkal rendelkeznek, mint az azonos tömegű tömör lemezek.
- Akusztikai elnyelés: A nyílt cellás alumíniumhabok hangelnyelő képességgel bírnak.
- Energiaelnyelés: Az alumíniumhabok kivételes képességgel rendelkeznek, az energiát nagy alakváltozási tartományon közel állandó szilárdság mellett nyelik el.
- Energetikai felhasználás: A nyílt cellás habok nagy hozzáférhető felülettel és magas cellafal-vezetőképességgel rendelkeznek, kiváló hőátadási képességet biztosítva (hőcserélők, hűtőszekrények).
- A cellaélek magas hővezető képessége és nagy felülete megakadályozza az égést (lángelfojtók).
- Kiváló szűrőket lehet készíteni alumíniumhabokból.



3. ábra. Alkalmazási területek (Kararr al-ziady 2019)

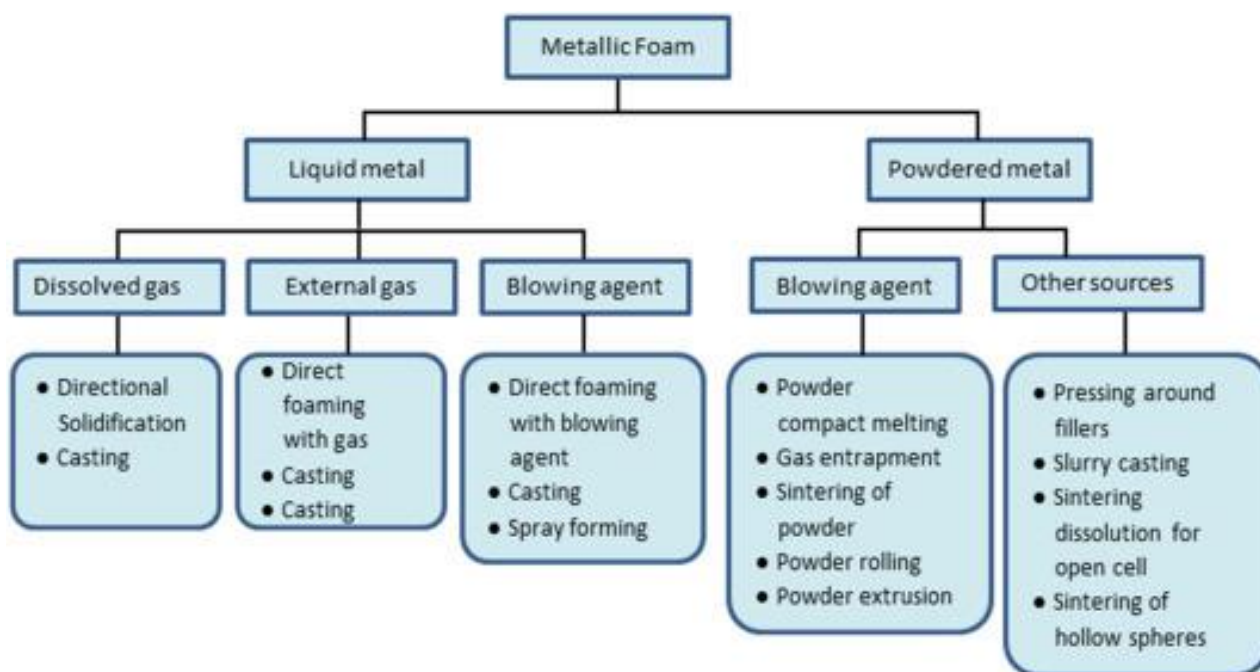
A könnyűszerkezetek kiválóan alkalmazhatók az űripárban, és alumíniumhabokat energetikai célokra is felhasználhatják. Az energiaeinyelés, az alakváltozás lokalizálása és a mechanikai csillapítás különösen fontos az autópárban és a repülőgépipárban. Az autók passzív biztonsági rendszerei nagy potenciállal bírnak ahhoz, hogy a fő fejlesztési irányok egyikévé váljanak. Más járművek is profitálhatnak az alumíniumhab tulajdonságaiból (Garai F. 2020).

A fémhab és más cellás fémszerkezetek tulajdonságait a fém tulajdonságai, a relatív sűrűség és a cellatopológia (pl. nyitott vagy zárt cellaszerkezet, cellaméret stb.) határozzák meg. A fémhabokat jellemzően az alábbi kilenc eljárás egyikével készítik, melyek az alábbiakban találhatók (4. ábra). A szögletes zárójelkben felsorolom azokat a fémeket, amelyeket az adott eljárással (vagy annak változatával) habosítottak.

1. Gáz buborékoltatása olvadt Al–SiC vagy Al–A₂O₃ ötvözetekben. [Al, Mg]
2. Habképző anyag (általában TiH₂) bekeverése egy olvadt ötvözetbe (jellemzően alumínium ötvözetbe), majd a nyomás szabályozása hűtés közben. [Al]
3. Fémpor (leggyakrabban alumínium ötvözet) és egy szemcsés habképző anyag (ismét TiH₂) összepréselése, majd hevítése pépes állapotig, amikor a habképző anyag hidrogént szabadít fel, ezáltal az anyagot kitágítva. [Al, Zn, Fe, Pb, Au]

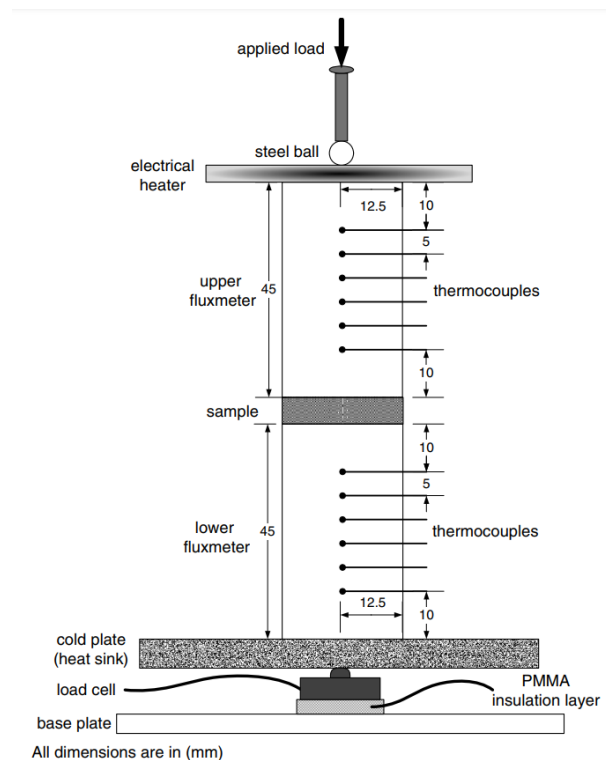
4. Kerámia öntőforma készítése viasz vagy polimer hab előanyagból, amit az előanyag kiégetése, majd nyomásos behatoltatása követ egy olvadt fémmel vagy fémpor iszappal, amit végül szinterelnek. [Al, Mg, Ni–Cr, rozsdamentes acél, Cu]
5. Fém gőzfázisú lerakása vagy elektrodepozíciója egy polimerhab előanyagra, amit később kiégetnek, így üreges magú cellaszéleket hagyva. [Ni, Ti]
6. Nagynyomású inert gáz csapdázása pórusokban poros meleg izosztatikus nyomással (HIP), amit a gáz nagy hőmérsékleten történő tágulása követ. [Ti]
7. Üreges gömbök szinterelése, amelyeket egy módosított atomizációs eljárással, vagy fém-oxid, illetve hidrid gömbökből, majd redukcióval vagy dehidridálással készítenek, vagy fém polimer gömbökre történő gőzfázisú leválasztásával. [Ni, Co, Ni–Cr ötvözetek]
8. Fémpor és egy kimosható por együttes préselése, vagy egy kimosható szemcsés ágy nyomásos fémfolyadékkal történő behatoltatása, amit kimosás követ, így egy fémhab vázat hagyva. [Al, sóval, mint kimosható anyaggal]
9. Gáz (jellemzően hidrogén) oldása folyékony fémben nyomás alatt, lehetővé téve annak kontrollált felszabadítását a szilárdulás során. [Cu, Ni, Al] (Boettinger, 2014)

Csak az első öt eljárás van kereskedelmi gyártásban. Mindegyik módszer egy szűkebb fémkészlettel használható porózus anyag létrehozására, amely korlátozott relatív sűrűségi és cellaméret-tartományokat eredményez (Boettinger, 2014).



4. ábra. Fémhabok gyártási eljárásai (Boettinger, 2014)

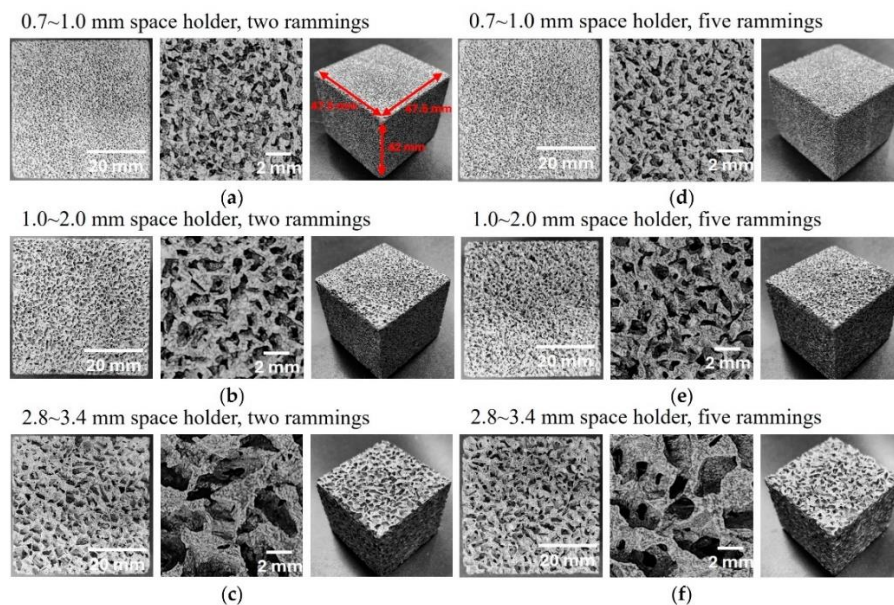
A nyílt cellás fémhabok hővezetési és zömítési tulajdonságainak mérésére többféle módszert alkalmaznak, melyek figyelembe veszik a fémhab egyedi, porózus szerkezetét. A hővezetés vizsgálatához olyan mérési eljárásokat használnak, amelyek lehetővé teszik a hővezetés elválasztását más kisebb hőátadási módoktól, mint például a sugárzás. Például a kísérletek során speciális eszközöket és irányított nyomást alkalmaznak (5. ábra) az effektív hővezetés kiszámításához, figyelembe véve a fémhab és a mérőfelületek közötti hőkontaktus-ellenállást (TCR). Különböző vastagságú minták alkalmazásával, azonos körülmények között, lehetséges a TCR leválasztása, így pontosabb mérési eredmények érhetők el a hab szerkezetén belüli hővezetésre vonatkozóan (Kim, 2024).



5. ábra Hőkontaktus ellenállás mérési elrendezés (Kim, 2024)

A zömítési vizsgálatok során a fémhabokat szabályozott sebességű nyomásnak teszik ki, hogy megfigyeljék, hogyan deformálódnak, és hogyan befolyásolja ez a hőellenállást. Különböző pórusűrűségű és porozitású mintákat elemeznek, ami betekintést nyújt abba, hogyan hatnak a szerkezeti paraméterek a fémhab áramlási ellenállására és hőátadási teljesítményére. Gyakran alkalmaznak numerikus áramlástani (CFD) szimulációkat is, például Laguerre–Voronoi tesszellációs modelleket, amelyekkel a hab szerkezetét optimalizálják speciális alkalmazásokhoz, mint hőcserélők vagy hőtároló rendszerek (Kim, 2024).

Ez a komplex megközelítés lehetővé teszi a kutatók számára, hogy olyan fémhabokat fejlesszenek ki, amelyek kiváló hőhatékonysággal és szerkezeti szilárdsággal rendelkeznek. A kutatások folyamatosan arra összpontosítanak, hogy a fémhab teljesítményét anyagbevonatokkal vagy makro (6. ábra) és mikroszerkezeti módosításokkal tovább javítsák (Kim, 2024).



6. ábra Különböző cellaméretű és porozitású fémhabok (Kim, 2024)

Az új kutatások a nyílt cellás alumíniumhabok zömítéssel viselkedését vizsgálják, különös tekintettel arra, hogyan befolyásolja a porozitás és a pórusméret az anyag mechanikai tulajdonságait és energiaelnyelő képességét. Kísérletek szerint a kisebb pórusméret és alacsonyabb porozitás nagyobb relatív sűrűséget és vastagabb cellafalakat eredményez, amelyek növelik a hab zömítési szilárdságát és energiaelnyelő képességét. Az anyagösszetétel is szerepet játszik: a szívósabb ötvözetek jobban képesek elnyelni az ütési energiát, javítva az energiaelnyelést. Ezek az eredmények fontosak az autóipari és védelmi alkalmazásokhoz szükséges anyagtervezésben (Kim, 2024).

A fémhabok különleges szerkezetük miatt speciális kötési technológiákat igényelnek, amelyek közül a ragasztás, forrasztás és hegesztés is szóba jöhet (Messler, 2011).

Ragasztás: A fémhabok ragasztásához olyan speciális, rugalmas ragasztókat kell alkalmazni, amelyek képesek megfelelően kitölteni a pórusokat, valamint elviselik a fémhab tágulási és összehúzódási mozgásait. Az ilyen ragasztók kiválóan oszlatják el a terhelést a csatlakozási felületeken, és jól ellenállnak a korróziónak is, amitől tartósabb kapcsolatot biztosítanak. A ragasztó hőérzékenysége miatt ez csak limitált hőmérsékleti tartományban alkalmazható.

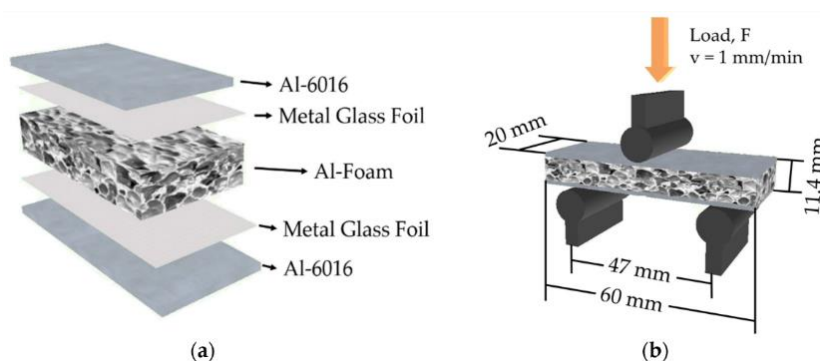
Hegesztés: Bár kihívást jelent a fémhabok hegesztése a hőhatás miatti alakváltozás elkerülése érdekében, vannak olyan technikák, mint például a sajtoló hegesztési eljárások, amelyek megőrzik a

fémhab szerkezetét. Az ömlesztő hegesztés viszont nagy hőmérsékletet igényel, és megolvasztja a fémhabot, ezért óvatos energiabevitelre van szükség a stabil szerkezet érdekében. Ezek a technológiák lehetővé teszik, hogy a fémhabokat különféle ipari alkalmazásokban használják, ahol fontos a könnyű, de erős és ellenálló szerkezet kialakítása.

Forrasztás: A fémhabok forrasztási technológiáit, különösen a réz- és alumíniumhabokat illetően, számos kutatás vizsgálta, tekintettel ezek egyedi porózus szerkezetére és mechanikai tulajdonságaira.

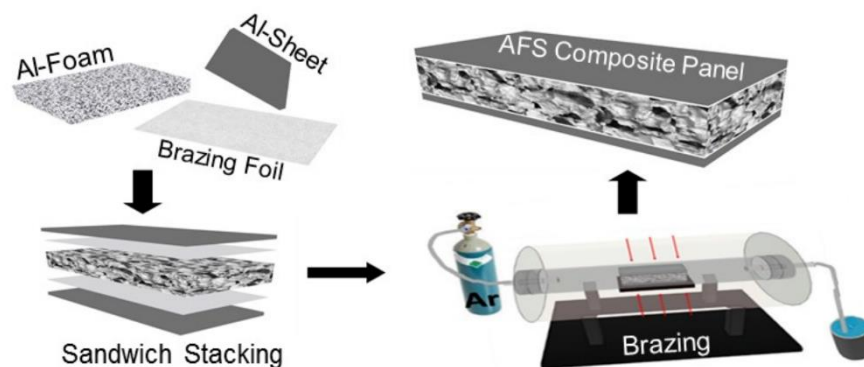
Egy tanulmány például a rézhab réz lemezhez történő forrasztását vizsgálta réz-nikkel-ón-foszfor (Cu-Ni-Sn-P) amorf forrasztóanyag alkalmazásával. Ezt a módszert hőcserélők fejlesztéséhez optimalizálták, ahol a rézhab magas hővezetőképessége és kis súlya különösen előnyös. A forrasztási folyamat során a hőmérsékletet 660–680°C közötti tartományban tartották, ahol az időtartam befolyásolta az illesztés mikroszerkezetét és mechanikai szilárdságát. A magasabb hőmérséklet és hosszabb idő jobb diffúziót eredményezett, és kevesebb mikrorést hagyott a kötésben, ezzel növelve az illesztés szilárdságát. Az olyan intermetallikus fázisok, mint a Cu-P és a Cu-Ni, javították a keménységet, ami minimalizálta a deformációt a használat során (Zahri, 2021).

Az alumíniumhab esetében egy másik kutatás alumíniumötvözet lapok forrasztását vizsgálta alumínium alapú fémüvegek felhasználásával 560–590°C közötti hőmérsékleten (7. ábra). Ez a technika különösen alkalmas olyan alkalmazásokhoz, ahol magas hőmérséklettel szembeni ellenállás szükséges, például az autóiparban és a repülőgépiparban, ahol az alumíniumhab panelek helyettesíthetik a nehezebb tömör alumínium alkatrészeket. A forrasztás (8. ábra) lehetővé teszi erős, stabil kötések létrehozását, amelyek ellenállnak a magas hőmérsékletnek, szemben a ragasztókkal, amelyek hőállósága korlátozott (Bangash, 2018).



7. ábra Szendvicspanel felépítése (a) és hárompontos hajlítása (b) (Bangash, 2018)

Ezek a kutatások alátámasztják, hogy a forrasztás megbízható kötési módszer a fémhabokhoz, különösen olyan ipari alkalmazásokhoz, ahol könnyű anyagokra és erős hő- vagy mechanikai ellenállásra van szükség (Zahri, 2021), (Sami 2020), (Bangash, 2018).



8. ábra Szendvicspanel keményforrasztása (Bangash, 2018)

Zhang és munkatársai tanulmányt közöltek az alumínium hab/alumínium szendvicspanelek szerkezetéről és tulajdonságairól, amelyeket vákuumforrasztási módszerrel készítettek Al-Si forrasztóanyag alkalmazásával. A cikk a forrasztási felület mikroszerkezetét és mechanikai tulajdonságait elemzi, továbbá a forrasztási paraméterek mikroszerkezetre és mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását is vizsgálja (Zhang, 2019).

A vákuumforrasztás folyamata során a mintákat $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{perc}$ sebességgel $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra melegítették, majd a teszhőmérsékletre hevítették, ahol 20 percig tartották. A forrasztási ciklus végén a mintákat $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ alá hűtötték. A mikroszerkezeti elemzések alapján a forrasztott kapcsolat négy különálló zónára oszlott: az I. zóna az alumínium alapfém zóna, a II. egyfázisú (Al) szilárd oldat zóna, a III. központi zóna, amely többfázisú vegyületekből áll, és végül a IV. zóna, ami az alumínium hab mátrixa. A központi zónában CaAl_2Si_2 vegyület és szilárd oldatok voltak jelen, amelyek hozzájárultak a kötés szilárdságának növeléséhez (Zhang, 2019).

A mechanikai tulajdonságok vizsgálatakor a legnagyobb hajlítószilárdságot 625°C -on, 20 perces hűtési idő mellett érték el, amely 68 MPa szilárdságot eredményezett, ez pedig 41%-kal magasabb érték volt, mint a 605°C -on kapott eredmény. A hajlítószilárdság-elmozdulás görbéket három szakaszra osztották: lineáris rugalmas, rugalmas-képlékeny és törési szakasz. A 625°C -on készített szendvicspanel erős metallurgiai kötést mutatott, amely meghaladta az alapanyag szilárdságát (Zhang, 2019).

A szerzők megállapították, hogy az alkalmazott alapanyag kombinációhoz a megfelelő forrasztási hőmérséklet 625°C , ami magasabb, mint a hagyományos Al alapú forrasztóanyagok forrasztási hőmérséklete. Ennek oka valószínűleg az alumínium hab szerkezetének hőszigetelő tulajdonságai és az oxidréteg jelenléte, amelyek magasabb hőmérsékletet igényelnek a megfelelő kötési erő eléréséhez (Zhang, 2019).

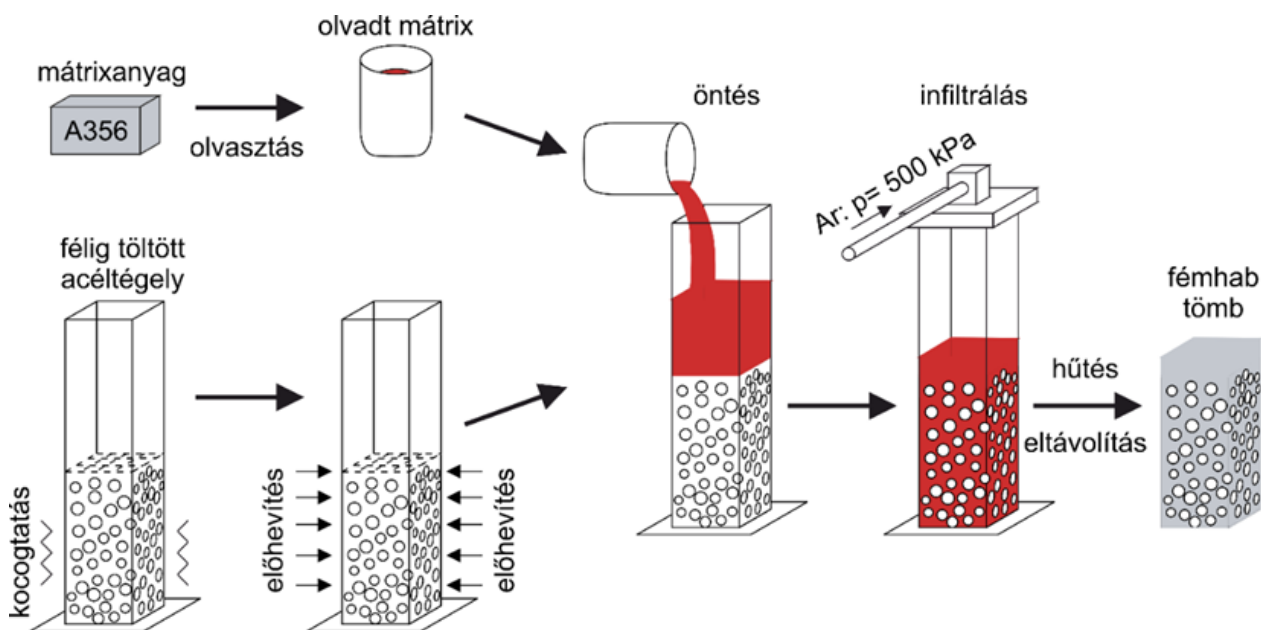
4. KÍSÉRLETI MUNKA

4.1. Gyártás

A későbbiekben használt alumínium habokat saját magam készítettem, ezeknek a gyártási módszerét ismertetem röviden alább.

A fémhabokat ötvözetlen alumíniumból, öntési eljárással, úgynevezett kisnyomásos infiltrálással készítettem, amit fontos előkészületi lépések előztek meg. Egy szerkezeti acél zártszelvényből hegesztett tégely belső felületére grafitot vittem fel, ezzel megakadályozva az olvadék és a tégely egymással való reakcióját. A tégely oldalára hegesztett kivezető csövet lezártam alumínium-oxid paplannal, ez a légáteresztő rés könnyíti az olvadék infiltrálását, és megakadályozza annak kifolyását az öntőformából. A sötétlő lyukméretű sziták segítségével osztályoztam, 0,5 mm-es pontossággal 2 és 5 mm között. Ezután beletöltöttem az adott térfogatú útszóró sót (NaCl), ami a tégely magasságának ~45%-át tette ki, ezt rozsdamentes acél ráccsal zártam le. Így az előmelegítés folyamata alatt a só nem tud elmozdulni, majd azt követően az olvadt alumíniumban sem úszik fel, amellyel esetlegesen a hab sűrűségét növelné. 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 olvasztottam meg, 8 kW teljesítmény mellett, párhuzamosan az előmelegítéssel, ami egy ProThermo Hofmann B-70 kemencében történt. Az öntési folyamatot az olvadék 750°C-os hőmérsékletén kezdtem, amit lehűlés közben mértem. Az olvadt alumínium bejutását a sószemcsék közé argongáz kisnyomásos (3-4 bar) kézi infiltrálással segítettem elő (9. ábra, 1. táblázat).



9. ábra Gyártási lépések (Kemény, 2022) alapján

1. Táblázat Öntés adatai

Öntés	Anyagminőség	Térkitöltő anyag méret (mm)	Előmelegítési idő (h)	Előmelegítési hőmérséklet (°C)	Olvadék hőmérséklet (°C)	Infiltrálási nyomás (bar)	Infiltrálási idő (s)
1	Al99,7	3,0-4,0	2	550	730	3,5	10
2	Al99,7	2,5-3,0	2	550	750	3,5	10
3	Al99,7	2,5-3,0	2	550	750	3,5	10

A végtermék levegőn hűlt, utólagos hőkezelést nem alkalmaztam. A teljes kihűlést követően az öntőformából kivágtam a habot, azt nem megsértve. A sót kiáztattam először állóvízben, majd folyóvíz alatt. Így el is készült a nyíltcellás hab (10. ábra).



10. ábra Fémhab tömb

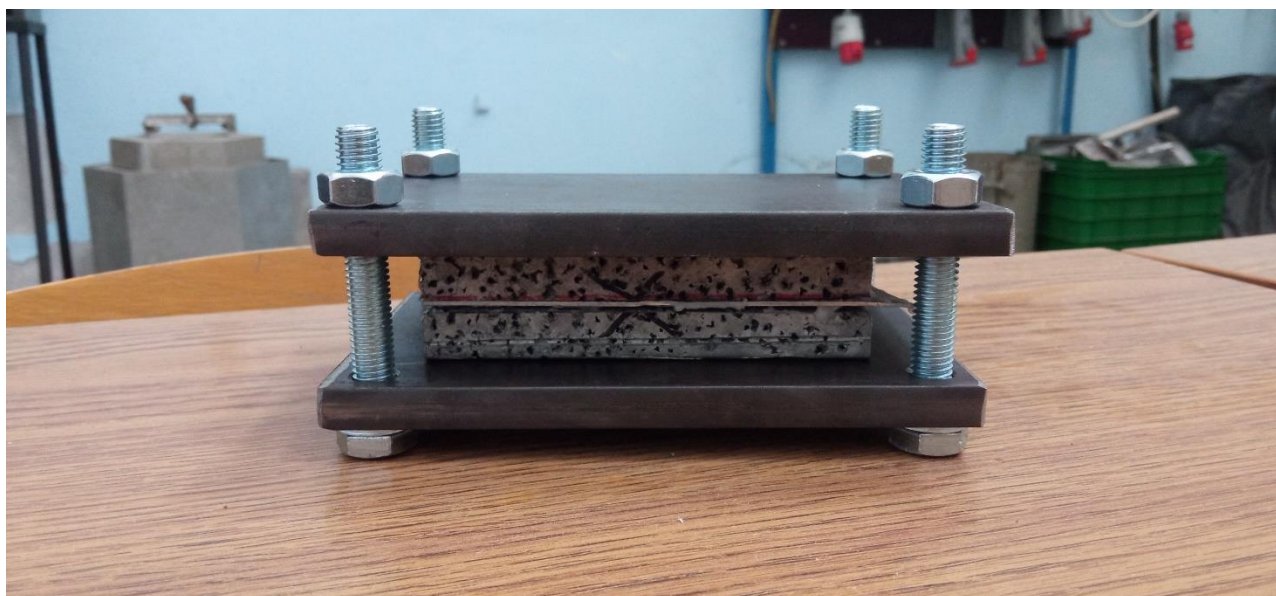
4.2. Forrasztás

A fémhabokat 12x55x120 mm-es méretre vágtam, a forrasztási felületét csiszoltam P600-ig SiC csiszolópapírral (2. táblázat). A P600-as csiszoló papír 26 db szemcsét tartalmaz $1\text{ }\mu\text{m}^2$ -en. A forrasztandó felületekre, illetve a forraszlemezre Flussmittelpaste AL-100 típusú folyósítószeret kentem. A forraszlemez egy három rétegű, erre a célra gyártott, lemez. A két oldalán kisebb olvadáspontú AlSi9 réteg van 0,1 mm vastagságban, míg a magja nagyobb olvadáspontú alumínium ötvözet. A lemez pontos anyagösszetételét a későbbiekben részletesen bemutatom.

2. táblázat Forrasztás előtti geometriai és tömeg értékek

Név	a (mm)	b (mm)	c (mm)	m (g)	V (cm ³)	ρ (g/cm ³)
1. öntés 01	54,88	109,31	12,89	88,78	77,31	1,15
1. öntés 02	54,92	109,51	13,82	88,58	83,12	1,07
2. öntés 01	55,80	123,40	11,83	74,00	81,48	0,91
2. öntés 02	55,67	123,67	13,37	95,00	92,02	1,03
2. öntés 03	55,83	124,00	13,83	95,00	95,77	0,99
2. öntés 04	56,00	124,00	11,37	74,00	78,93	0,94

Egy, külön ehhez az eljáráshoz készített szerkezetben összeállítottam a habokat és a lemezt. Ez a szerkezet két 10 mm vastag acél lemezből állt, amit négy ponton csavar kötéssel rögzítettem (11. ábra).



11. ábra Forrasztási elrendezés

A csavarkötés a hő hatására meglazulhat, ezért egy plusz terhelést helyeztem a szerkezetre, így összesen ~27 N állandó terhelést kapott a habszerkezet (12. ábra). A terhelés hozzájárult a felületek közötti kötés kialakításához. A keményforrasztás alatt a forraszlap magja nem olvad meg, az szilárd

állapotban marad. A hőntartás folyamata ~1 óra 15 percen keresztül tartott, állandó 630°C-on. Ez a hőmérséklet az ötvöztelen alumínium olvadáspontjának (660°C) a 95%-a.



12. ábra Forrasztás során alkalmazott tömeg

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 vágtam (3. és 4. táblázatok). Egyéb utómunkára nem volt szükség.

3. táblázat Hajlításra vágott próbatestek méretei

Hárompontos hajlításra	a (mm)	b (mm)	t (mm)
1 (forrasztott)	20,57	102,03	25,78
2 (forrasztott)	20,89	101,74	26,35
3 (hab)	21,68	109,57	26,77
4 (hab)	20,71	109,31	26,60
5 (forrasztott)	25,68	105,55	28,09
6 (forrasztott)	25,63	105,67	26,86

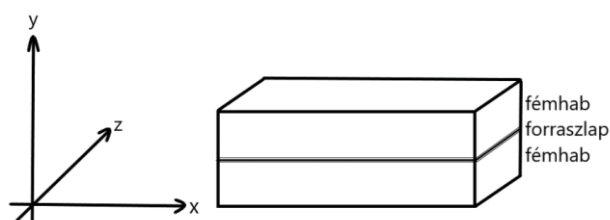
4. táblázat Hajlításra vágott próbatestek fizikai tulajdonságai

Hajlítás	m (g)	V (cm ³)	ρ (g/cm ³)
1 (forrasztott)	64,48	54,09	1,19
2 (forrasztott)	66,18	56,01	1,18
3 (hab)	64,79	63,60	1,02
4 (hab)	61,86	60,21	1,03
5 (forrasztott)	61,92	76,16	0,81
6 (forrasztott)	53,49	72,73	0,74

4.3. Mérések

A kötés sikerességét különböző mérésekkel vizsgáltam. Összehasonlításképpen azonos méretű forrasztás nélküli fémhabokon is elvégeztem az adott tesztek.

Szemléltetésképpen, a hárompontos hajlítás **y** irányban, a lehajlás **x** irányban vizsgálja a kötés erősségét, ezeket a méréseket a későbbiekben részletesen ismertetem (13. ábra).

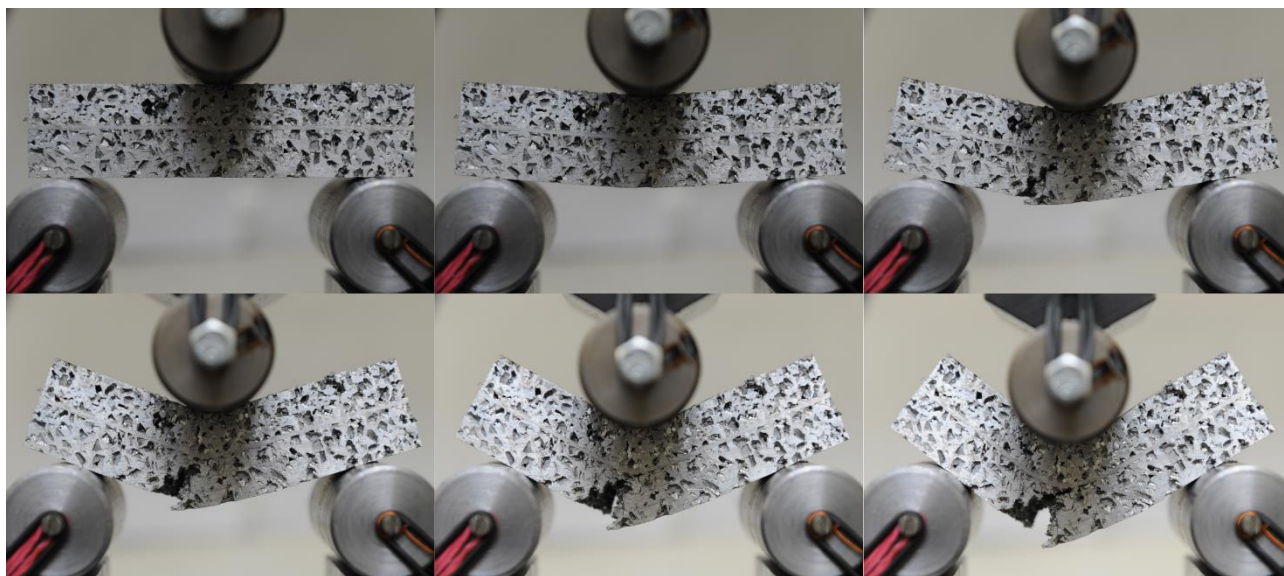


13. ábra hab dimenziói

4.3.1. Hárompontos hajlítás

A hajlítóvizsgálat során 5 kN erőmérőcellával szerelt Instron 5965 elektromechanikus univerzális anyagvizsgáló berendezést használtam, a folyamatot pedig fix pozicionálású kamerával rögzítettem. Az alátámasztások közti távolság 85 mm, a nyomóhenger és az alátámasztó hengerek átmérője pedig Ø10 mm voltak. A mérés során a berendezés felső része mozgott lefelé 5 mm/min sebességgel, az adatokat a berendezéssel összekötött számítógép 100 ms lépéssel rögzítette. Az alábbi ábrákon láthatóak a próbatestek mind a két típusának hajlító vizsgálata lépésről lépésre (14. ábra). További

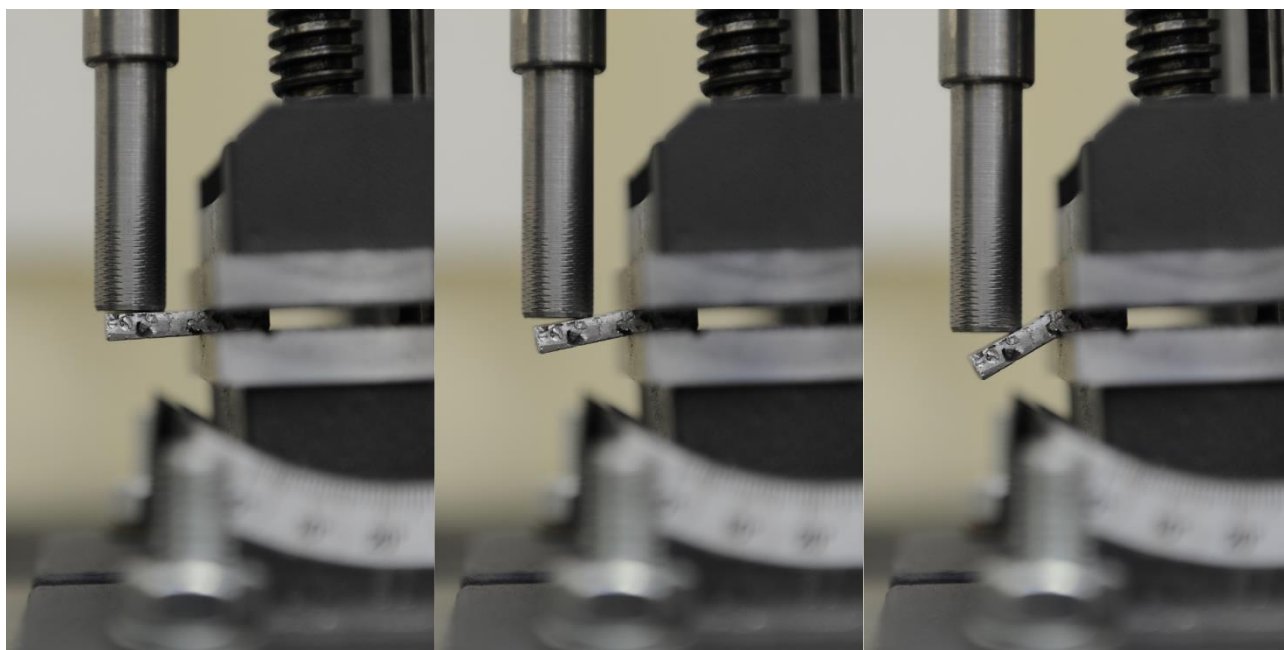
méréseket végeztem nagyobb átmérőjű, Ø25 mm-es alátámasztó hengerekkel, a gép további beállításai változatlanok maradtak.



14. ábra Hárompontos hajlítás

4.3.2. Lehajlás

A lehajlás során vizsgáltam a kötés közvetlen erősségét hajlítással szemben. A mérőberendezés egy vertikális befogatású satuból és a korábban említett Instron 5965 elektromechanikus univerzális anyagvizsgáló berendezésből állt (15. ábra). A próbatestek mérete elősegíti a pontosabb mérést, a méretek csökkentésével megközelítőleg a forrasztás nyírómerevségét kapnánk.



15. ábra Lehajlás folyamata

4.3.3. Mikroszkópia

A mikroszkópos vizsgálat által jobban megérthetővé vált az anyag szerkezete illetve a keményforrasztás alatt végbemenő folyamatok. A tesztekhez egy vékony szeletet vágtam ki a forrasztásból. A szeletet, illetve egy, a forraszlapból kimunkált darabot kétkomponensű gyantába ágyaztam be, a könnyebb kezelhetőségért. Forgótárcsás vizes csiszolóval csiszoltam a mintákat P4000-ig az alábbi léptekkel (5. Táblázat).

5. Táblázat Szemcsenagyság

SiC Csiszolópapír szemcsenagyságok	
P	μm
80	212-180
180	90-75
400	35
600	26
1200	15
2400	12
4000	6

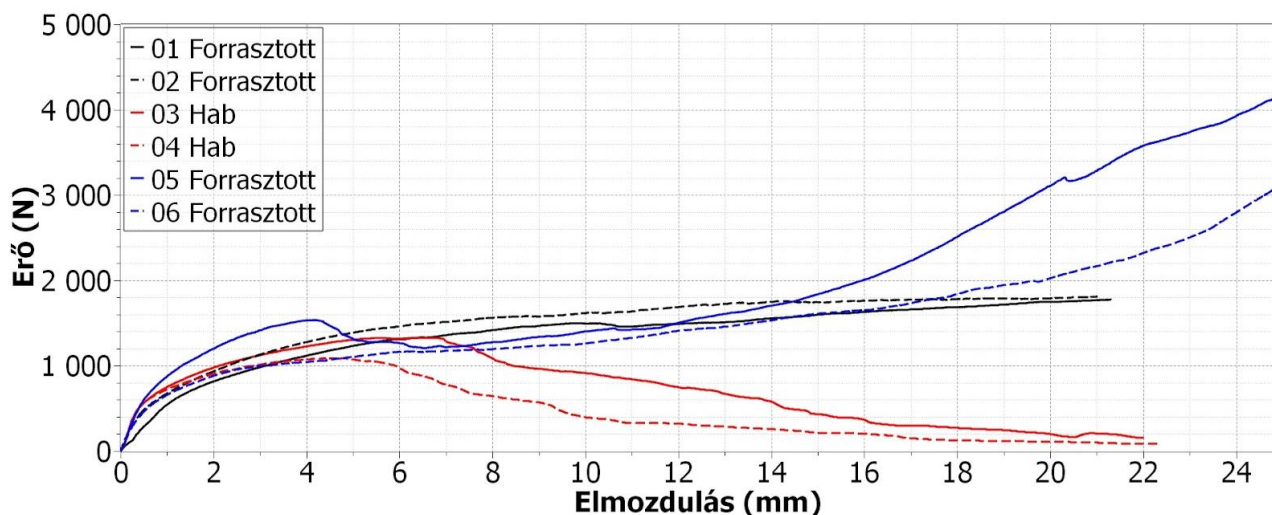
Csiszolás után políroztam Topol 1 szuszpenziót és a hozzá tartozó posztót alkalmazva. Néhány perces polírozás után vízzel majd alkohollal lemostam a felületet. Az alkalmazott polírozószer láthatóvá teszi az anyag szilíciumtartalmát, így vizsgálhatóvá vált a mikroszerkezet. Olympus PMG-3 optikai mikroszkóppal vizsgáltam a mintákat. A mikroszkóp mellett WAS PMI spektrométerrel is vizsgáltam az anyagösszetételét a forraszlapnak, külön a külső (liner) és a belső (mag) összetételét.

5. MÉRÉSEK KIÉRTÉKELÉSE

5.1. Hárompontosos hajlítás

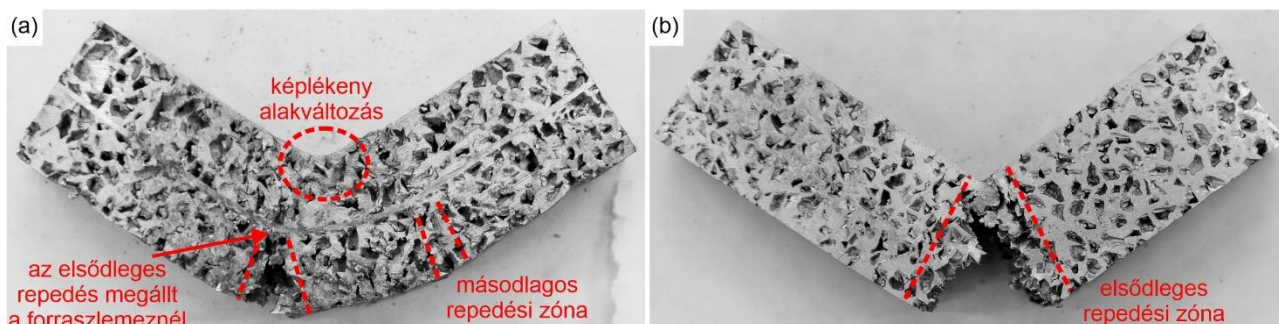
A hárompontosos hajlítás során hat próbatestet vizsgáltam.

Kezdetben a forraszlap a hajlítás semleges szála, hiszen középen helyezkedik el. A repedés megkezdődése után, a diagramon is jól láthatóan, átveszi a terhelést (16. ábra). A repedés látványosan megáll a forraszlapnál (17. ábra). A mérések során egy forraszlap sem repedt fel, szakadt el.



16. 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, az utóbbiaknál csak egy, elsődleges repedési zóna alakult ki, amely végigfutott a darab teljes keresztmetszetén, és jelentős erőcsökkenést okozott, elveszítve a szerkezet teherbírását.



17. ábra A közepén kemény forrasztott (a) és nyílt cellás fémhab (b) alakváltozási mechanizmusa hárompontosos hajlítás során

5.2. Lehajlás

A folyamat alatt minden esetben a hab tört el (18. ábra), azáltal a kötéshez pontos erőértéket nem lehet rendelni, de biztosan tudhatjuk, hogy a kötés megfelelően nagy szilárdságú. Alapvető cél egy erősebb kötés kialakítása, ami itt jól láthatóan sikerült. A forrasztás sértetlen maradt, így nem az a szerkezet leggyengébb pontja.



18. ábra A mérés utáni próbatestek

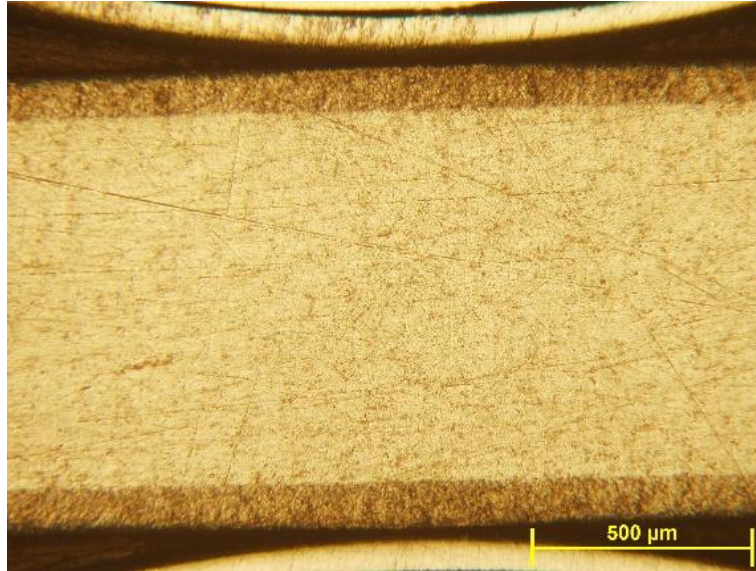
A vizsgálatok számszerű eredményeit a 6. táblázat tartalmazza. Ezeknél az erőértékeknél nagyobb a forrasztott kötések nyírással szembeni ellenállása.

6. Táblázat Lehajlás teszt eredményei

Minta száma	a (mm)	b (mm)	S_o (mm ²)	F_{max} (N)
1	14,64	4,03	59,00	148,5
2	14,93	3,83	57,18	153,2
3	14,97	3,90	58,38	93,1
4	15,04	3,60	54,14	67,7
5	15,86	3,56	56,46	205,4
6	18,68	3,00	56,04	59,8

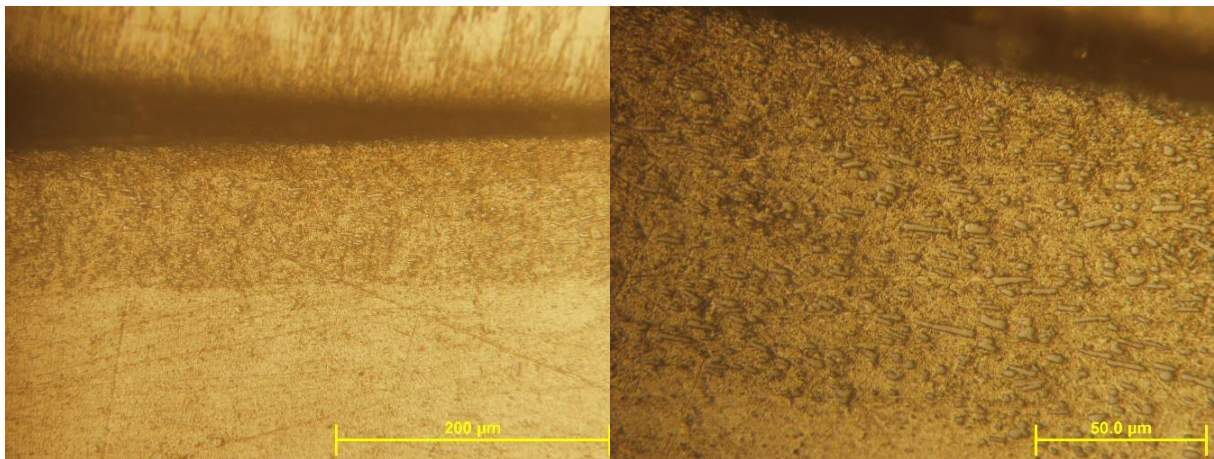
5.3. Mikroszkópia

Az optikai mikroszkópos felvételen jól látszik a forraszlap sávos felépítése (19. ábra). Ebből meghatároztam, hogy a két oldalán jelenlévő liner vastagsága $\sim 0,1$ mm, amely a keményforrasztás során megolvad, és kapcsolatot létesít a forrasztandó habbal.



19. ábra A forraszlap felépítése

Nagyobb nagyításokon megfigyelhető a liner mikroszerkezete, amelyen látszik a szilícium tartalmának morfológiája (20. ábra). A szilícium kiválások lemezes szerkezetűek és egyenletes eloszlásúak.



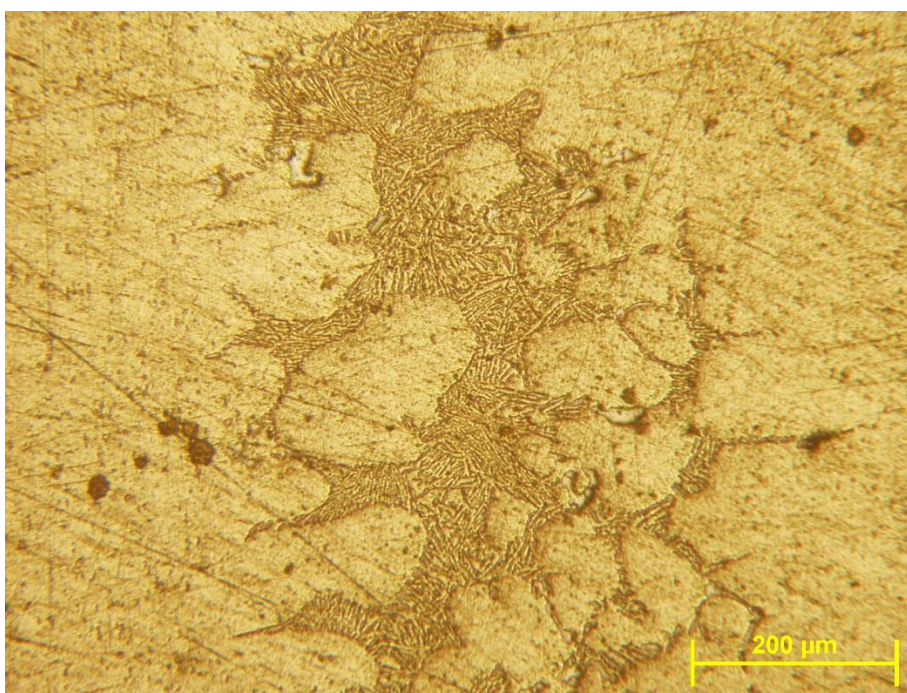
20. ábra Liner mikroszerkezete

Spektrométerrel kapott eredmények táblázatosan (7. Táblázat):

7. Táblázat A forraszlemez elemösszetétele

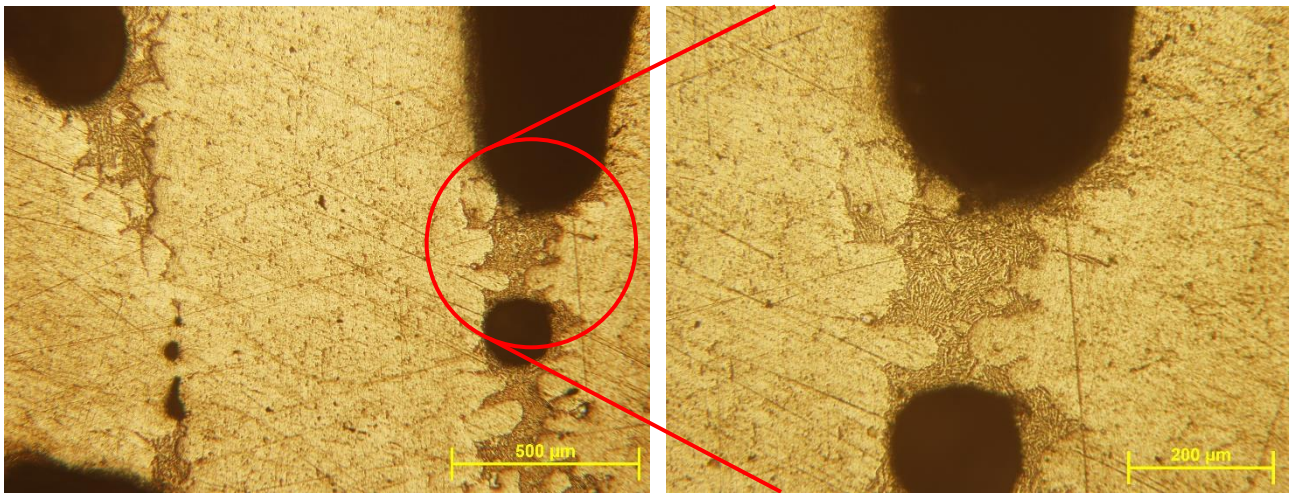
Elemösszetétel	Ötvözet	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
mag	3117	0,33	0,15	0,86	1,18	-	0,06	0,005	0,13	97,3
liner (AlSi9)	4147	11,6	0,23	0,006	0,014	0,16	0,001	0,007	0,008	88,0

A keményforrasztás után készült képeken megfigyelhető, hogy a nagy szilícium tartalmú liner megolvadt és dúsulások alakultak ki (21. ábra), azonban ezek már tús szerkezetűek, amely a forrasztás utáni lassú hűtésből következik. Továbbá ennek hatása az egyenlőtlen eloszlás is.



21. ábra Szilícium kiválások a forrasz-hab határon

A szilícium beoldódott (22. ábra) a hab alapanyagába is, vagyis a diffúzió révén kohéziós kapcsolat alakult ki a forraszlemez és hab között. Azonban mivel egy nyíltcellás szerkezetéről van szó, így nem minden pontban jöhetett létre kapcsolat, tehát anyagfolytonossági hiányok is háthatók a kisebb nagyítású képeken.



22. ábra Szilícium beoldódás a forrasz-hab határon

6. KONKLÚZIÓ

Az alumínium fémhabok keményforrasztásával kapcsolatos projekt során mélyreható tapasztalatokat szereztem mind a technológiai folyamatok, mind a gyakorlati alkalmazások terén. A keményforrasztás alkalmazásával sikerült olyan kötéseket létrehoznom, amelyek jelentősen javítják az alumínium fémhabok mechanikai és fizikai tulajdonságait az önálló habhoz képest.

A keményforrasztott alumínium fémhabok ipari alkalmazása jelentős előnyökkel jár. Az anyagok jó mechanikai tulajdonságai révén széles körben használhatók a légiközlekedés és az autóipar területén. 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.

A jövőre nézve terveim között szerepel a keményforrasztási folyamat továbbfejlesztése, optimalizációja. A különböző forrasztóanyagok alkalmazása, illetve a hozzájuk tartozó szükséges és elégséges forrasztási idő és hőmérséklet meghatározása.

7. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- (Bangash, 2018) Bangash MK, 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. <https://doi.org/10.3390/met8080614>
- (Boettinger, 2014) William J. Boettinger, Dilip K. Banerjee, Physical Metallurgy (Fifth Edition), 2014 <https://doi.org/10.1016/C2010-0-65716-6>
- (Garai, 2020) Garai F. Modern Applications of Aluminium Foams. Int J Eng Manag Sci 2020;5:14–21. <https://doi.org/10.21791/ijems.2020.2.3>
- (Kararr al-ziady, 2019) Kararr al-ziady. Optimization of Recycling for Aluminum Aerosol Cans to Produce Metal Foam <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26921.24163>
- (Kemény, 2022) Kemény A, Movahedi N, Fiedler T, Maróti JE, Orbulov IN. The influence of infiltration casting technique on properties of metal syntactic foams and their foam-filled tube structures. Mater Sci Eng A 2022;852. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143706>
- (Kim, 2024) Kim J, Ha T, Lee Y, Kang B, Kim Y. Mechanical Properties and Deformation Behavior of Open-Cell Type Aluminum Foams with Structural Conditions and Alloy Composition. Metals. 2024; 14(8):877. <https://doi.org/10.3390/met14080877>
- (Messler, 2011) Robert W. Messler, Jr. An Overview of Joining Processes <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v06a.a0005551>
- (Qian, 2024) Xu Q, Wu Y, Chen Y, Nie Z. Unlocking the Thermal Efficiency of Irregular Open-Cell Metal Foams: A Computational Exploration of Flow Dynamics and Heat Transfer Phenomena. Energies. 2024; 17(6):1305. <https://doi.org/10.3390/en17061305>
- (Sadeghi, 2011) Sadeghi E, Hsieh S, Bahrami M. Thermal conductivity and contact resistance of metal foams. Journal of Physics D: Applied Physics. 2011; 44: 125406 <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/12/125406>
- (Sami 2020) Sami MM, 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. <https://doi.org/10.3390/met10030416>
- (Zahri, 2021) Mohd Zahri NA, Yusof F, Badruddin IA, et al. Deformation and Fracture Behavior of Sandwiched Copper Foam Brazed Joint Using Amorphous

Copper–Tin–Nickel–Phosphorus Filler. *Front Mater* 2021; 8.
<https://doi.org/10.3389/fmats.2021.665219>

(Zhang, 2019)

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.
<http://hjxb.hwi.com.cn/hjxb/en/article/doi/10.12073/j.hjxb.2019400223>