

Pados Gábor

Funkcionális fémhab szerkezetek
kötéstechnológiai lehetőségei és
mechanikai vizsgálatuk

TDK 2024





BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLÓGIA TANSZÉK

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

PADOS GÁBOR

(GÉPÉSZMÉRNÖKI SZAK MSc, 4. FÉLÉV)

FUNKCIONÁLIS FÉM HAB SZERKEZETEK KÖTÉS- TECHNOLÓGIAI LEHETŐSÉGEI ÉS MECHANIKAI VIZSGÁLATUK

Konzulens:

Dr. Kemény Alexandra

egyetemi adjunktus

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, *Pados Gábor* (DMD5CN), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírásommal 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

Előszó	5
1. Összefoglalás	6
1.1. Summary	7
2. Bevezetés	8
2.1. Célkitűzések és áttekintés	8
3. Szakirodalmi áttekintés	10
3.1. Alumínium	10
3.2. Kötéstechnológiák	10
3.2.1. Forrasztás	10
3.2.2. Hegesztés	11
3.3. Fémhabok	13
3.4. Fémhabbal töltött zártszelvények	14
3.5. Fémhabok és fémhab szerkezetek kötése	15
3.5.1. Fémhab szendvicsszerkezetek előállítása	18
4. Anyagok és módszerek	27
4.1. Felhasznált anyagok	27
4.2. Gyártási eljárás	28
4.2.1. Zártszelvénybe infiltrált fémhab szerkezetek	28
4.2.2. Dörzshegesztés utáni hőkezelés	31
4.2.3. Szintaktikus alumíniumhab szendvicsszerkezetek	32
4.3. Vizsgálatok	33
4.3.1. Sűrűségmérés	33
4.3.2. Makroszerkezeti vizsgálatok	34
4.3.3. Mikrokeménységmérés	34
4.3.4. Mikroszerkezetvizsgálat	34
4.3.5. Mechanikai vizsgálatok	35
5. Eredmények	36
5.1. Sűrűségmérés eredményei	36
5.2. Makroszerkezeti vizsgálatok eredményei	36
5.3. Mikrokeménységmérés eredményei	38
5.4. Mikroszerkezeti vizsgálatok eredményei	38

5.5. Mechanikai vizsgálatok eredményei.....	41
Eredmények értékelése, következtetések	44
5.6. Jövőbeli tervek	44
6. Felhasznált források.....	45
7. Melléklet.....	48

ELŐSZÓ

Célom mindig olyan területek felfedezése és kutatása, amelyek még kevésbé ismertek, de nagy potenciállal rendelkeznek ipari fejlesztés szempontjából.

* * *

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni konzulensemnek, Kemény Alexandrának a segítő munkáját, tanácsait és odaadását a kutatás iránt, aki szakmai tudásával mindvégig segítette munkámat. Szeretném még megköszönni Nagy Péternek a próbadarabok kimunkálásában, illetve a Harlo Kft. segítőkész munkatársának, Kulcsár Andrásnak a hegesztésben való segítséget, valamint Bubonyi Tamásnak, a Miskolci Egyetem munkatársának, hogy segített elvégezni a hegesztett próbatestek roncsolásmentes vizsgálatát. Köszönöm még Korsós Krisztiánnak, a pásztázó elektronmikroszkóppal végzett mérésekben való segítségét és Breznay Csabának a forrasztásban nyújtott segítségét.

Ezen kívül köszönöm az Anyagtudomány és Technológia Tanszéknek a rendelkezésemre bocsátott eszközöket és a kollégáknak a segítséget. A jelen Tudományos Diákköri Kutatás az MTA-BME Lendület Nagyteljesítményű Kompozit Fémhabok Kutatócsoport keretében valósult meg. A dolgozat az Innovációs és Technológiai Minisztérium EKÖP-24-2-BME-168 kód-számú Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. Ezt a munkát részben a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatta az OTKA-FK_21 138505 támogatási szerződés keretében.

Budapest, 2024.11.10.

Pados Gábor

1. ÖSSZEFOGLALÁS

A fémhabok a modern mérnöki és anyagtudományi kutatások egyik legígéretesebb anyagcsoportját jelentik, hiszen ezen anyagok cellás struktúrája lehetővé tesz egy kiváló anyagtulajdon-sági kombinációt, mint a kis sűrűség, nagy fajlagos szilárdság és nagy energiaeinyelő képesség. Ezeket az előnyös tulajdonságokat számos ipar tudná előnyeire fordítani, illetve különösen alkalmasak olyan területeken, mint a járműgyártás, az építőipar vagy éppen a repüléstechnika, ahol a szerkezeti elemek tömegének csökkentése kulcsfontosságú, ugyanakkor a biztonság és a mechanikai teljesítmény fenntartása elengedhetetlen.

A fémhabok széles körű ipari alkalmazásához azonban megfelelő kötéstechológiákra van szükség, amelyek biztosítják a megbízható és tartós kötések, így szerkezeti elemként képes betölteni funkcióját. A hagyományos hegesztési, forrasztási és ragasztási eljárások alkalmazása fémhabok esetében speciális kihívásokat jelent, hiszen ezek a cellás anyagok a folyamat elvégzése közben deformációt szenvedhetnek vagy károsodhatnak. A kötéstechológiák és a fémhabok folyamatos fejlesztése azonban lehetőséget biztosít arra, hogy ezen kihívások ellenére is stabil és jól funkcionáló kötések hozzunk létre. Az anyagválasztás és a kötéstípus optimalizálása tehát kulcsfontosságú a fémhabok ipari elterjedéséhez, különösen olyan területeken, ahol a súlycsökkentés jelentős gazdasági előnyöket hordoz.

Jelen kutatásban célom vékonyfalú alumíniumötvözet csőben ($AlMgSi_{0,5}$) egylépcsésben előállított, alumíniumötvözet mátrixú ($AlSi_{12}$), duzzasztott agyagkavicsal töltött funkcionális fémhabok összehegesztése dörzshegesztési eljárással, illetve 99,7% tisztaságú alumínium mátrixú, szintén duzzasztott agyagkavicsal töltött fémhabok gyártása, majd ezekből szendvics-szerkezet létrehozása keményforrasztási eljárással, majd a létrehozott kötések vizsgálata és az eredmények kiértékelése. A kompozit fémhabokat kisnyomásos kézi infiltrálással gyártottam. A kötések minőségét mikroszerkezeti és mechanikai vizsgálatokkal jellemeztem.

kulcsszavak: kötéstechológia, dörzshegesztés, szendvics-szerkezet, kompozit fémhab

1.1. Summary

Metal foams represent one of the most promising material groups in modern engineering and materials science research. These materials' cellular structures enable a combination of advantageous properties such as low density, high specific strength, and excellent energy absorption capacity, making them highly suitable for applications in industries like automotive manufacturing, construction, and aerospace, where weight reduction is crucial while maintaining safety and mechanical performance.

However, the broad industrial application of metal foams requires appropriate joining technologies that ensure reliable and durable bonds, allowing them to function as structural components. Traditional welding, brazing, and adhesive bonding methods present specific challenges when applied to metal foams, as these cellular materials may undergo deformation or damage during the process. However, the continuous development of both joining technologies and metal foams offers the possibility of overcoming these challenges to create stable and functional joints. The optimization of material selection and bonding methods is thus critical to the widespread industrial adoption of metal foams, particularly in sectors where weight reduction offers significant economic advantages.

This research aims to join functional metal foams using friction welding, consisting of an aluminum alloy matrix (AlSi12) filled with expanded clay aggregates, produced in one step inside a thin-walled aluminum alloy tube (AlMgSi0.5). Additionally, metal foams with a 99.7% pure aluminum matrix, also filled with expanded clay aggregates, were manufactured, and sandwich structures were created using brazing techniques. The joints produced were then examined and evaluated. The composite metal foams were fabricated through low-pressure manual infiltration, and the quality of the joints was characterized through microstructural and mechanical testing.

Keywords: joining technology, friction welding, sandwich structure, composite metal foam

2. BEVEZETÉS

Eddigi kutatásaim során az önmagában előállított fémhabok mechanikai vizsgálata mellett, a fémhabbal kitöltött szerkezeti elemek mechanikai vizsgálataival foglalkoztam, azonban az előző évi TDK dolgozatomban már olyan szerkezetek létrehozását és mikroszerkezeti vizsgálatát végeztem, amelyek összekötése volfrámelektrodás, semleges védőgázos ívhegesztés (TIG) eljárással készült. Noha az ömlesztőhegesztés kivitelezhető volt azokon a próbatesteken, egyértelműen arra lehetett következtetni, hogy nem célszerű eljárás a fémhabok kötésére [1].

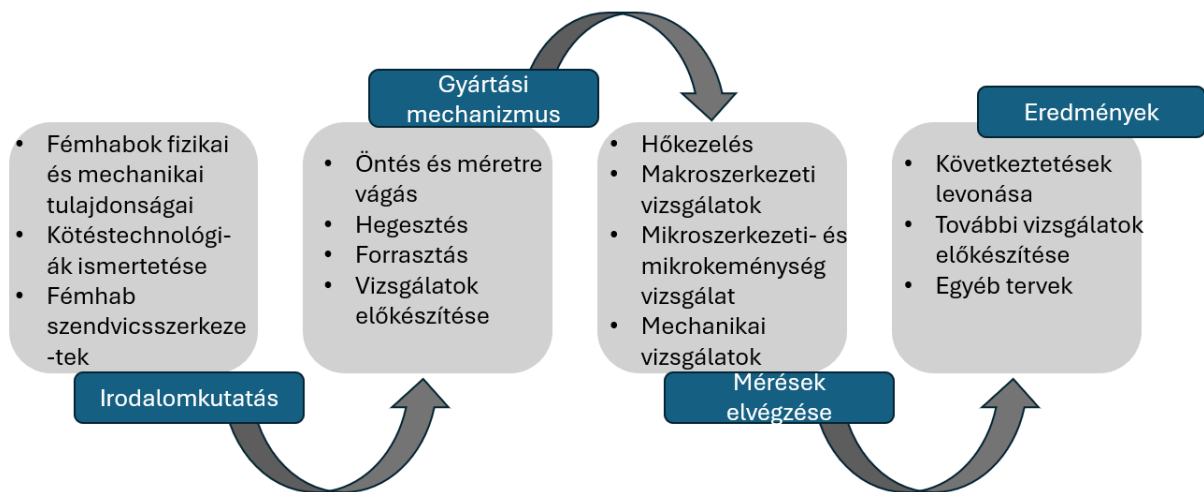
Minekután a kötéstechológiai lehetőségek vizsgálata előtt már sikeresen kifejlesztésre került egy innovatív gyártási eljárás, amely során a fémhabokat, azok minden előnyös tulajdonságával, mint a nagy fajlagos szilárdság, kis sűrűség, nagy mechanikai energiaelnyelés és termikus stabilitás, sikerült vékonyfalú zártszelvényekbe tölteni [2–4], így a következő felmerülő feladat, az a különböző kötéstechológiák kivitelezhetősége, azok optimalizálása és továbbfejlesztése.

Ebben a dolgozatban olyan funkcionális, fémhab töltetű szerkezetek létrehozását és kötését tűztam ki célul, amelyek megfelelő terheléstervezés esetén, képesek lennének ipari felhasználásban is fejlesztésekhez hozzájárulni. Többféle szerkezet létrehozására összpontosítok a kutatás során, ugyanis a csőbe töltött kompozit fémhabszerkezetek dörzshegesztése, és a kompozit fémhab szendvicsszerkezetek, keményforrasztás útján való létrehozása is célom. Ezeknek paraméterei nem triviálisak, ugyanis irodalomkutatásom során, ilyen eljárásokkal létrehozott szerkezetekkel nem találkoztam. A megfelelő paraméterek feltárása, valamint azok optimalizálása és az elkészült próbatestek mikroszerkezeti- és mechanikai vizsgálata kifejezetten fontos kutatás lehet a fémes kompozit szerkezetek tudományában.

2.1. Célkitűzések és áttekintés

Minekután a fémhabok és a fémhab töltetű funkcionális szerkezetek komoly potenciállal rendelkezhetnek az előzőekben ismertetett előnyös tulajdonságaik miatt, amelyeket még nem tud széleskörűen kihasználni az ipar, a különböző gyártási és kötéstechológiai ismeret hiányosságai miatt, így elengedhetetlen fontosságú ezen szerkezetek és eljárásaik fejlesztése. A kutatásban célom egy ipari környezetben is kivitelezhető gyártási eljárás kidolgozása és az elkészült szerkezeti elemek összekötése. A szerkezetek összekötése dörzshegesztéssel, valamint keményforrasztással készül, amelyek paraméterei a későbbiekben kerülnek bemutatásra. A dolgozatban továbbá a későbbiekben részletesen ismertetésre kerülő funkcionális szerkezetek összekötése és a kötés mikroszerkezeti- és mechanikai vizsgálata kerül bemutatásra.

Dolgozatomban a következő folyamatábrán meghatározottakkal foglalkozom **(Hiba! A hivatkozási forrás nem található.)**.



1. ábra Munkafolyamat leírása

3. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

3.1. Alumínium

Az alumíniumötvözetek habosításának, majd kötéstechológiájának részletes tárgyalása előtt érdemes beszélni az alumíniumról, mint alapanyagról, illetve annak ötvözeteiről átfogóan, ugyanis ez a könnyen alakítható és kitűnő korrózióállósággal rendelkező anyag kiemelkedő szerepet játszik valamennyi iparágban. Az alumínium egy felületen középpontosan köbös, $2,7 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű, ezüstös-fehér színű, nagyon jó hő- és elektromos vezetőképességű könnyűfém, amely vastag oxidréteget alakít ki, már a levegővel való érintkezést követően, így védekezve a további oxidációtól. Tulajdonságai ötvözéssel széles skálán változtathatók, szakítószilárdsága akár $125\text{-}800 \text{ MPa}$ között beállítható. A különböző iparágak, ezeket az előzőekben felsorolt előnyös tulajdonságokat igyekeznek kihasználni, széles felhasználási palettán. Legnagyobb mennyiségben a járműiparban és a repüléstechnikában használják fel, amely iparágak kifejezetten nagy előnyre tehetnek szert a termékeik tömegének redukálásával [5].

Itt kell említést tenni az alumínium mátrixú fémhabokról, melyek olyan cellás szerkezetű anyagok, amelyek az előző fejezetekben említett jó fajlagos tulajdonságokkal és kis sűrűséggel rendelkeznek.

3.2. Kötéstechológiák

3.2.1. Forrasztás

A különböző, ipari felhasználásra szánt anyagokat, alkatrészeket szinte kivétel nélkül össze szükséges kötni egymással, ha termékként akarjuk felhasználni. Habár a kialakítható kötések fajtája rengeteg, most a dolgozatom témájához közvetlenül kapcsolódó kötéstípusokat mutatom be. Elsőként a forrasztást, amely egy iparban rendkívül elterjedt megoldásnak minősül és további kutatások mutatkoznak ígéretesnek a témában. A forrasztás ismertetését, egy fogalmi tisztázással kezdem: „*Forrasztásnak azt a kötési eljárást nevezik, melynek során a szilárd szerkezeti elemeket egy alacsonyabb olvadáspontú olvadt fémötvözzel (forrasztanyaggal) kötik össze, és így alakzáró kötést hoznak létre. Az olvadt forrasztanyag, amelynek nedvesítő tulajdonságúnak kell lennie, az összekötendő darabok anyagának megolvasztása nélkül, diffúziós (illetve esetenként adhéziós) kapcsolattal köt. A diffúzió lényege, hogy az összeforrasztandó anyag és a forrasztanyag atomjai kölcsönhatásba lépnek egymással, ez biztosítja az erős forrasztott kötést.*” [5].

A kis feldolgozási hőmérséklet és a tervezhető forrasztóanyag opció miatt az ólommentes forrasztás például jelentős potenciált mutat az alumíniumötvözetek összekapcsolásában.

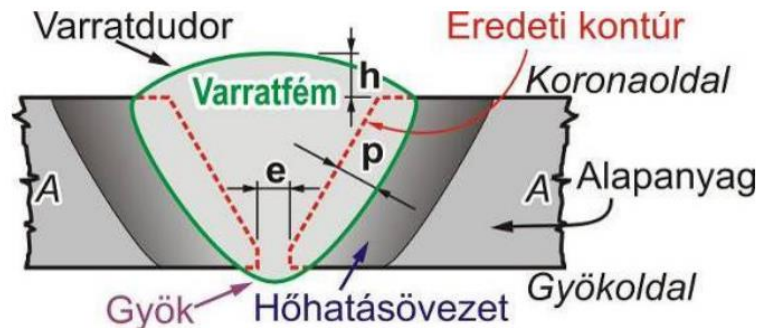
Min és társai a kutatásukban 6061 alumínium ötvözeteket és ultrahangos fél-szilárd forrasztási módszert alkalmaztak. A gyártás során 400 W-os ultrahangos rezgést, 20 kHz frekvencián 10 másodpercig használtak, majd megvizsgálták a ~50 nm és ~10 µm méretű Al_2O_3 részecskék hozzáadásának hatását az alumíniumötvözetek összekapcsolására. Céljuk a nanorészecskék hozzáadásával a kötés mikroszerkezeti változásainak megismerése volt. A kötések pászta- zó elektronmikroszkóp (SEM), energiadiszperzív röntgenspektroszkópia (EDS), röntgendiffrak- ciós vizsgálat (XRD) és keménységmérés segítségével vizsgálták. Az eredményekből arra kö- vetkeztettek, hogy az Al_2O_3 nanorészecskék pozitív hatással vannak a kötés minőségére és mechanikai tulajdonságaira, minek után ezek a részecskék jelentős mértékben megváltoztatták a mikroszerkezetét a kötésnek, amely ezáltal javította a mechanikai tulajdonságait, továbbá ezen mikrorészecskék alkalmazása javította a kötés nyírószilárdságát is legalább 8,7%-kal [6].

3.2.2. Hegesztés

A másik, dolgozatban alkalmazott kötéstechnológia a hegesztés, amely a legnagyobb térnye- résű kötéstechnológiai eljárás család az iparban. A következőkben a kutatásban alkalmazott/re- leváns hegesztéssel kapcsolatos alapfogalmakat tüntetnek fel, amelyek ismerete elengedhetetlen a pontos fogalmazás érdekében. A fogalmakat az MSZ ISO/TR 25901-1:2020 szabványból [7] idézem:

- **Hegesztés:** „Hővel vagy nyomással, vagy mindkettővel, illetve hozaganyaggal vagy anélkül alkalmazott kötési eljárás, amelyben két vagy több alkatrész egyesül, folyto- nosságot képezve a munkadarab(ok) anyaga(i) között.”
- **Ömlesztőhegesztés:** „Helyi megömlesztéssel, külső erő alkalmazása nélkül végzett hegesztés, amelynek során az összekötendő felülete(ke)t hozaganyag adagolásával vagy anélkül kell megolvasztani.”
- **Alapanyag:** „Az anyag, amelyet hegesztéssel, hegesztőforrasztással vagy keményfor- rasztással össze kell kötni, vagy amelynek a felületére réteget kell felrakni.”
- **Varrat:** „A hegesztés eredménye.”
- **Hőhatásövezet:** „Az alapfém nem megolvasztott része, amelynek mikroszerkezetére a hőfolyamat hatással volt.”
- **Hegesztőanyag:** „A varrat készítéséhez felhasznált anyag.”
- **Ömledék/hegfürdő:** „Folyékony fémfürdő, amely az ömlesztőhegesztés (2.1.1.2.) so- rán képződött.”

- **Beolvadás:** „Az a mélység, ameddig az alapfém kötési felülete megolvadt.”
- **Beolvadási mélység:** „A varratfém vastagsága a varratdudor nélkül.”
- **Gyök:** „A hegesztés készítésével ellentétes oldalon lévő zóna.”



2. ábra A hegesztett kötés részei [8] alapján

Ezenkívül ismertetem még a dörzshegesztéssel kapcsolatos fogalmakat is, amelyeket az MSZ EN ISO 15620:2000 [9] alapján értelmeztem:

- **Dörzshegesztés:** olyan hegesztési eljárás, amelyben a hegesztendő munkadarabokat egymással szemben forgatják vagy oszcillálják, miközben megfelelő nyomást alkalmaznak az érintkező felületek között.
- **Folyamatos hajtású (forgó) dörzshegesztés:** Olyan dörzshegesztési eljárás, amelyben a hegesztendő munkadarabok közül az egyik rögzített helyzetben van, míg a másik nagy sebességgel forog az érintkezési felület mentén.
- **Axiális erő:** Az egymással hegesztendő alkatrészek közti tengelyirányú nyomóerő.
- **Alkatrész:** Az egyes elemek a hegesztés előtt.
- **Érintkezési felület:** Az egyik alkatrész felülete, amely érintkezésbe kerül egy másik alkatrész felületével, hogy kötést hozzon létre.
- **Előmelegítési nyomás:** Az a nyomás, amelyet a dörzshegesztési folyamat előmelegítési fázisában alkalmaznak az érintkező felületek között. Célja a súrlódásból eredő hőtermelés növelése.
- **Előmelegítési út:** A dörzshegesztés előmelegítési fázisában az az út, amelyet a hegesztendő felületek egymáshoz képest elmozdulnak. Az előmelegítési út hosszát a kívánt hőmérséklet és hőeloszlás eléréséhez igazítják.
- **Zömítési nyomás:** A dörzshegesztés zömítési (vagy összeolvasztási) fázisában alkalmazott nyomás, amely a hegesztendő felületek teljes összeolvadását biztosítja.
- **Zömítési út:** Az a távolság, amelyet a hegesztendő darabok a zömítési fázis alatt elmozdulnak egymáshoz képest.

- **Zárónyomás:** Az a nyomás, amellyel a berendezés adott részei (tokmányok vagy egyéb rögzítésre alkalmas kialakítású alkatrészek) rögzítik a hegesztendő munkadarabokat a folyamat során, biztosítva azok stabil helyzetét és megfelelő erőátvitelét a dörzshegesztés alatt.

Az alumínium és annak ötvözetei sokféleképpen hegeszthetők, a megfelelő hegesztett kötés létrejöhet erő és hő együttes hatására, mint a tompa-, pont-, vagy dudorhegesztés stb. esetében, vagy csak hő hatására mint az ív- vagy lánghegesztések [5,8].

Ebben a kutatásban tompa felületeket illesztettem össze, amelyek kötését a nagy nyomóerő és a forgás miatt keletkező súrlódási hő eredményezte. Ilyen típusú (421-es eljárású [10]) forgó dörzshegesztést tengelyeknél, csöveknél, vagy egyéb forgásszimmetrikus alkatrészeknél alkalmaznak.

3.3. Fémhabok

A fémhabok, mint anyagcsoport, minden esetben valamilyen cellás szerkezetű anyagot jelent, viszont a cellák közti átjárhatóság szerint megkülönböztethetünk nyílt- és zárt cellás habokat. Előbbi esetben szabad átjárhatóság figyelhető meg a teljes cellastruktúrában. Ezeknek a szerkezeteknek a gyártása általában olyan szemcsék felhasználásával történik, amelyek jó hőállóságot mutatnak és nem oldódnak az olvadt fémötvözetekben. A gyártást követően fontos még, hogy ezek a szemcsék eltávolítandók, tehát valamilyen módon kioldhatónak kell lenniük. Leggyakrabban sószemcséket alkalmaznak, amelyek később vízzel kimoshatóak a fém mátrixból. A zárt cellás szerkezet ezzel szemben, egy nem átjárható cellás struktúrát jelent, az üregeket egymástól zárt cellafalak választják el. Egyik alcsoportja ezeknek a típusú haboknak, a szintaktikus fémhabok, amelyeknek egyik lehetséges előállítása során, a fémolvadékba adott anyagú gömbhéjakat keverve alakítják ki a cellás szerkezetet. Természetesen mindkét anyagnak van relevanciája, hiszen eleget tudnak tenni adott felhasználási körök kritériumainak, de a nyílt cellás fémhabok sűrűsége a zárt cellás fémhabok sűrűségének akár a felénél is kisebb lehet, azonban a zárt cellás habok szerkezeti merevsége és szilárdsága nagyobb, mint nyílt cellás esetben [11].

Kutatásomban előfordul mindkét struktúra felhasználása, így az irodalomkutatásom során mindkét típus megismerésére törekedtem. Mátrixanyagként általában valamilyen alumínium ötvözetet alkalmaznak a fémhabok előállításához más kutatásokban is, hiszen nem csak, hogy az előzőekben részletezett előnyös tulajdonságokkal rendelkezik, de még könnyen is önthető és megfelelő ötvözők adagolásával tovább javíthatóak adott tulajdonságai. Kis számban azonban

előfordulnak egyéb mátrixú fémhabok is, például magnézium-, cink- és titán ötvözetek is szolgálhatnak mátrixanyagként, azonban ezekből az alapanyagokból jellemzően porkohászati úton történik a habok előállítása [12–18].

3.4. Fémhabbal töltött zártszelvények

Amennyiben valamilyen funkcionális szerkezet részeként alkalmazzuk a fémhabokat, különösen jobb mechanikai jellemzőket figyelhetünk meg, ha a zártszelvények zárt cellás fémhabokkal vannak kitöltve [19].

Kemény és társai AlSi7Mg (A356) szintaktikus fémhabokat helyeztek, illetve ragasztottak AlMgSi0,5 ötvözetű, 2 mm falvastagságú zártszelvényekbe, háromféle keresztmetszetben (kör ($\varnothing 32$ mm), négyzet (30×30 mm), téglalap (30×20 mm)). A szögletes keresztmetszetű zártszelvények 140 mm hosszúak voltak, kör keresztmetszet esetén 160 mm hosszúak. Töltőanyagként $\varnothing 2,5$ -3 mm duzzasztott agyagkavics gömböket alkalmaztak. A gyártás 500 kPa nyomási szinfiltrálással történt. A méretre vágott habokat ezt követően kiválósos keményítéssel hőkezelték, majd, szintén kiválósosan keményített, eltérő keresztmetszetű zártszelvénybe helyezték, vagy ragasztották. A ragasztás vagy epoxy ragasztóval, vagy szilikonnal (polisziloxán) történt. A fémhab mag rendre akkorára lett kialakítva, hogy a ragasztóanyag típusától függően, megfelelő kitöltendő tér maradjon a mag és a cső belső fala között, epoxi ragasztó esetén $\sim 1,5$ mm, szilikon esetén $\sim 2,5$ mm. A kutatásban vizsgálták az így elkészített próbatesteket, hárompontos hajlítóvizsgálattal, illetve zömítővizsgálattal is. A sűrűségmérés azt mutatta, hogy a ragasztott próbatestek sűrűsége $\sim 60\%$ -a a tömör alumíniuménak. A hajlítóvizsgálat eredményei azt mutatták, hogy a szilikon ragasztóval ragasztott próbatestek, hajlítóvizsgálat során, nagyobb energiát voltak képesek elnyelni ($223 \pm 15,6$ J), annak ellenére is, hogy kisebb maximális erőt voltak képesek felvenni, mint az epoxival ragasztottak. Keresztmetszetet tekintve, a téglalap keresztmetszetű próbatestek bizonyultak a legelőnyösebbnek. A hajlítóvizsgálatok során, azonban fontos kiemelni, hogy mind a zártszelvénybe helyezett, mind a ragasztott fémhabok, olyan szerkezetet eredményeztek, amelyek a rideg fémhabokhoz képest, jelentősen növelték azok hajlítószilárdságát. Zömítővizsgálat esetén egyértelműen a kör keresztmetszetű próbatestek voltak az optimálisan viselkedők, hiszen geometriájukból adódóan nem volt feszültséggyűjtő hely rajtuk. A szilikon ragasztó szétfeszítette a zártszelvények falát, azonban az epoxi ragasztó kedvezően hatott a próbatestekre, és növelte azok szilárdságát (202 ± 12 MPa) valamint energialenyelését is (948 ± 13 J) [20,21].

3.5. Fémhabok és fémhab szerkezetek kötése

Fémhabok esetében fontos szempont volt a hegesztési eljárás kiválasztásakor az is, hogy a cellás struktúra, habár bizonyos esetekben előnyös, hegesztéskor nagy nehézségeket okozhat. A porózus fémszerkezetek, fémhabok hegesztésekor, amennyiben az valamilyen ömlesztőhegesztéssel történik, úgy az olvadt alapanyag és ömledékfürdő kitölti a hegesztési vonalban található cellákat és megszilárdulás közben zsugorodás jelensége helyi repedéseket okozhat, ezzel hibát létrehozva a szerkezetben. Ezenfelül, a cellás szerkezet egyik fontos jellemzője a cellák közel homogén eloszlása, de az előzőekben felsorolt problémák inhomogenitást okoznak a szerkezetben, hiszen a hegesztési vonal környékén az anyag sokkal sűrűbb lesz, kevesebb üres cellával, illetve az említett repedések is a hegesztés környékén jelentkeznek, tehát a tönkremenetel több okból kifolyólag is a hegesztés vonalának környékéből fog kiindulni. Az ömlesztőhegesztési eljárásokkal szemben a sajtolóhegesztésekre elmondható, hogy kisebb hőmennyiséget visznek be a szerkezetbe, ezzel kikerülve például a cellaszerkezet inhomogenitását. Ilyen eljárás például a kavaráó dörzshegesztés (Friction Stir Welding-FSW), amely képes összehegeszteni különböző szerkezeteket, hozaganyag nélkül. A kavaráó dörzshegesztés során egy forgó csapot vezetnek a munkadarabok érintkezési felületei közé, ahol a dörzshő meglágyítja a darabokat és összehegeszti őket egymással. Az eljárás különösen a kis olvadáspontú nemvas fémek esetén használatos. Egy másik eljáráscsalád az indukciós hegesztéscsalád, amely esetén a fémes anyagok mágnesessége és termikus ellenállóképessége áll a középpontban. Magasfrekvenciájú elektromágneses mezőt használnak, ami a munkadarab elektromos ellenállásából keletkező hőt indukálja és használja a darabok összehegesztéséhez. Fontos kiemelni, hogy a nagy hő keletkezése ellenére, a keletkezett hőhatásövezet nem nagy kiterjedésű. Az ilyen típusú hegesztést széles körben alkalmazzák csövek hegesztésére, hiszen költséghatékony, gyors és egyszerűen kivitelezhető [22].

Rabiei és társai a kutatásuk során porkohászati eljárással gyártottak 316L mátrixú, rozsdamentes acélgömbhéj erősítőanyagú fémhabokat. A gömbhéjak 0,1 mm falvastagsággal és 2 mm külső átmérővel, illetve 0,2 mm falvastagsággal 4 mm külső átmérővel rendelkeztek. A gyártott téglatestek vastagsága 12,5 mm-től, 31,75 mm között volt, sűrűségük 2,5-3,3 g/cm³ között mozgott. A kavaráó dörzshegesztés során az összehegesztendő próbatesteket először úgy rögzítették, hogy aztán a hegesztés során ne tudjanak elmozdulni. Ezután a különböző paraméterek változtatásával, mint a kavaráó csap forgási sebessége és a nyomóerő nagysága próbálták az ideális beállítást megtalálni. Ehhez különböző kavaráó csap geometriát és fordulatszámot, valamint hozaganyagot és darabtávolságot használtak. Az első kísérletek többnyire olyan hibákkal teli varratokat eredményeztek, amelyek nagy repedésekkel és üregekkel voltak tele, valamint a

cellák nagyrésze a megolvadt alapanyaggal töltődött fel, ezzel nagyméretű üregeket hagyva a varratban és annak közvetlen környezetében. A zsugorodási folyamat során ezek a feltöltődött cellák aztán a repedések kiindulópontjává váltak. Hozaganyag alkalmazásával a darabok közt sikerült kötést létesíteniük, de a hatalmas üregek továbbra is jelen voltak és a megömlesztett anyag mennyisége megnőtt, az továbbra is a cellákba folyt, ezzel előidézve a repedéseket és az anyaghiányt. Az eredmények azt mutatták, hogy kavará dörzshegesztéssel nem tűnik kivitelezhetőnek a fémhabok megfelelő kötése [23].

Az indukciós hegesztés vizsgálatuk két részre bontható, a mérések során alkalmazott berendezés C alakú tekercsekből állt, egyik (#1) vékony (<19 mm) panelek hegesztésére, másik (#2) vastag (~22 mm) panelek hegesztésére. A tekercsek két oldalán, felül és alul, ferottronok voltak elhelyezve, amelyek így az indukciós áramlatot a darabba vezették, nem pedig akörül generálták. A hegesztés során infravörös kamerát alkalmaztak. A hegesztés után a hűtés vagy gyors hűtéssel, vagyis az áramforrás elvételével zajlott, vagy pedig lassabb hűtéssel, a leléptetési módszert alkalmazva. Utóbbi úgy zajlott, hogy 100°C hűlés után bekapcsolták újra a berendezést és 50°C-kal ismét felmelegítették a darabot, majd ezt a folyamatot megismételve lépcsőzetesen hűtötték le a darabot 400°C-ig, utána a levegőn hűlt tovább [23].

Először levegőn hegesztettek, azonban a varrat mellett korróziós nyomokat figyeltek meg. Ennek kiküszöbölésére argon védőgázt alkalmaztak, amelyet egy kamrában a hegesztés előtt 45-60 másodpercig engedtek a mintákra, hogy az be tudjon hatolni a cellás szerkezetbe, kiszorítva onnét az oxigént. Az első csoportban kisebb vastagságú habokat vizsgáltak eltérő hegesztési paraméterekkel (hegesztési idő, hegesztőerő, hőbevitel stb.). A második csoportban nagyobb vastagságú darabokat hegesztettek, így növelni kellett az erőt és szélesebb tekercset alkalmaztak. Mindegyik próbatest 204°C-ra elő lett hevítve, nagyjából 20 perccel hegesztés előtt, ezzel biztosítva a csapdába ejtett nedvesség szabadulását. Az első hegesztés akkor lett sikeres, mikor a hegesztési erőt 7,5 kW-ról 15 kW-ra emelték, illetve a hegesztés idejét 40-ről 130 másodpercre emelték. Ezekkel a paraméterekkel sikerült először egy megfelelő kötést létrehozni, amiben nem volt szabad szemmel jól látható repedés. Az első csoport összes mintájára jellemző volt ezután, hogy szabad szemmel hibamentes, torzulás, deformáció és dudormentes varratokat mutattak. Fontos megjegyezni, hogy a kavará dörzshegesztéssel szemben, itt nem jellemző, hogy a cellákba, a megolvadt anyag jelentősen befolya. A varratok közelében fekete elszíneződés megfigyelhető volt mindegyik esetben, ez a nedvesség kiégésével magyarázható. A vékonyabb, 4 mm töltőanyag átmérővel rendelkező darabokat észlelhető hiba nélkül sikerült összehegeszteni. Ezután a vastagabb darabok következtek, amelyeknek sűrűsége is nagyobb volt,

valamint vastagságuk $\sim 1,5$ -szer nagyobb volt, ezért mind az előmelegítés-, mind pedig a hegesztés idejét megnövelték. A hegesztési varratok mindegyik esetben megfelelőek lettek, látható hiba nélkül. Hűtésük azonnali volt, az áramforrás lekapcsolásával. A hegesztett, darabokból szabványos alakú és méretű szakító próbatesteket munkáltak ki vízsugaras vágógéppel, úgy, hogy a varrat a szakító próbatest közepén, a húzás irányára merőlegesen fusson. A szakító próbatestek vastagsága akkora volt, hogy legalább 6-8 egész cella benne volt oldalanként, ezzel kikerülve a mérethatást. A mikroszerkezeti vizsgálatokra megfelelő felületelőkészítés után, a próbatesteket SEM vizsgálatnak vetették alá. Ezt követően elkezdték a próbatestek vastagságát növelni, először 15 mm-es paneleket, majd 18 mm-eseket hegesztettek. Mindkettő esetén egyre növelték az előhevítés és hegesztés idejét. Végül 22 mm vastagságú paneleket hegesztettek és azok paramétereit optimalizálták. Ezután még nagyobb vastagságú próbatesteket hegesztettek össze és optimalizálni próbálták a paramétereket, azonban több próbálkozás után be kellett lássák, hogy a 22 mm-nél vastagabb próbatestek ezzel a módszerrel, megfelelően nem hegeszthetők, ugyanis a hőeloszlás már olyan egyenlőtlen lesz, hogy egységes kötésre teljes keresztmetszetben nincs, vagy csak csekély esély van, amely gyártási szempontból nem hívható megfelelőnek [23].

Kemény és társai AlSi12 alumínium ötvözet mátrixanyagú, szintaktikus fémhabokat gyártott egy lépésben [2], AlMgSi0.5 ötvözetű, 2 mm falvastagságú, kör keresztmetszetű zártszelvényekbe. Töltőanyagként duzzasztott agyagkavics gömböket használtak $\varnothing 2,5$ - $3,0$ mm mérettartományban. Az így létrehozott próbatesteket él előkészítést követően volframelektrodás, semleges védőgázos kézi ívhegesztéssel (TIG) hegesztették össze, AlSi5 hozaganyaggal ($\varnothing 2,4$ mm), váltóáram alkalmazásával. Védőgázként 99,996% tisztaságú argont, elektródának $\varnothing 1,6$ mm szürke, lekerekített hegyvégű elektródát használtak. A hegesztés során ~ 150 - 200 mm/perc sebességgel, 15-16 V ívfeszültséggel és 80-90 A áramerősséggel hegesztett egy képzett hegesztő, 2 mm gyökhézagot hagyva. A kutatásban makro-, illetve mikroszerkezeti vizsgálatokat, és a hosszanti keresztmetszeten, a varrattól távolodva a cső falában, valamint a varrat középvonalán mikrokeménységmérést végeztek. A konklúziója a kutatásnak az, hogy töltőanyag miatt nagyon nehezen kivitelezhető a hegesztés, az agyagkavics szórja a hegesztési ívet, valamint az ömledékfürdőben nem csak szabadon elmozdul, de a felszín felé igyekszik [1].

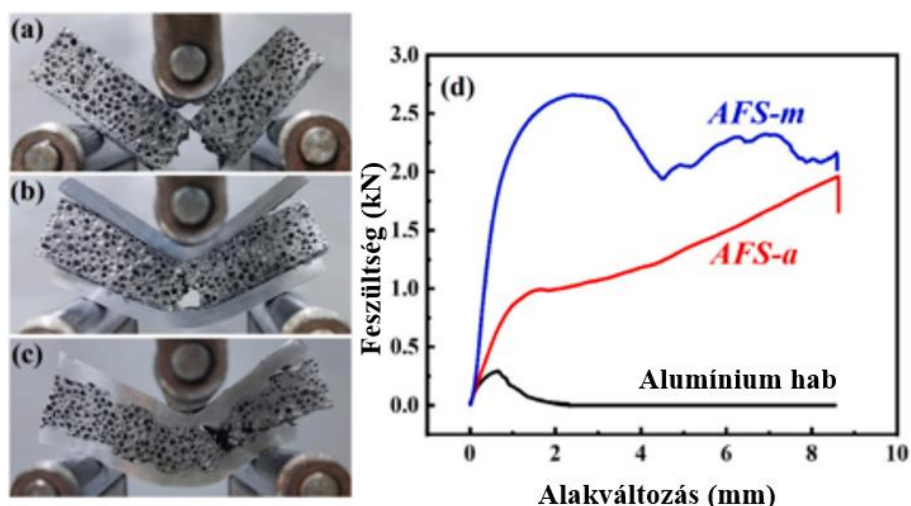
Utóbbi kutatást megfontolva, érdemesnek találtam az ömlesztőhegesztési eljárás család helyett más irányban gondolkodni, ugyanis a fémhab szerkezetek ilyesfajta hegesztése nem tűnik ipari felhasználáshoz megfelelőnek.

3.5.1. Fémhab szendvicsszerkezetek előállítás

A cellás anyagok gyakran kerülnek vizsgálatok és felhasználásuk során is szendvicsszerkezetbe, hiszen ezek a szerkezetek sokszor kiváló mechanikai tulajdonsággal bírnak, a tömegük-höz viszonyítva. A szendvicsszerkezetekre az a jellemző, hogy három fő rétegből állnak: két merev külső rétegből és egy könnyű, cellás szerkezetű magból. Ez a kialakítás, megfelelő tervezés esetén, adott irányú terhelésekkel szemben nagy fajlagos szilárdságot és merevséget, nagy energiaelnyelést, jó hő- és hangszigetelést és kitűnő rezgéscsillapítást biztosítanak. A modern kutatások során, dinamikus igénybevételekkel szemben egyre gyakrabban valamilyen kompozit szendvicsszerkezetet alkalmaznak, hiszen, ha a terhelés iránya tervezhető, akkor az adott irányból nagymértékű felvételére és energia elnyelésére képesek ezek a szerkezetek. Alumínium ötvözetű fémhabokat is tettek már ilyen szendvicsszerkezetek részévé (angol nyelven: aluminum foam sandwiches – AFS), különösen nyílt cellásokat, a könnyebb forraszthatóság vagy éppen hegeszthetőség érdekében.

Liang és társai 6063-as alumínium ötvözet lemezeket és zártcellás alumínium habot használtak alumínium hab töltetű szendvicsszerkezetek létrehozásához. A szendvicsszerkezet befoglaló mérete 60×60 mm volt, a vastagságuk 16mm volt (3 mm lemezenként és 10 mm mag). A hab töltet sűrűsége $0,97 \text{ g/cm}^3$, átlagos cellamérete ~ 1 mm volt. A felületeket közvetlenül a hegesztés előtt tisztították. A kavaro dörzshegesztés berendezése 1200 fordulat/perc sebességgel forgott, 60 mm/perc előtolási sebességgel. A folyamat során a hab tetejére helyezték a tisztított lemezt, és a lemezbe 0,1 mm mélyen hatolt a kavaro dörzshegesztő hegye, majd óramutató járásával ellentétesen forgott a hegy. A következő, ily módon dörzshegesztett vonal 9 mm eltolással készült az előző varrathoz képest, viszont minden esetben ugyanabba az irányba. A lekerekített hegy hossza 3,2 mm volt, 4 mm átmérő a tövében és 3 mm a végén. A mikroszerkezetet később optikai mikroszkóppal (OM), SEM-mel, illetve EDS-sel vizsgálták, míg a szemcse és kötésállapot visszaszórt elektrondiffrakcióval (EBSD). A minták a hegesztett szerkezetből, a hegesztés irányára merőlegesen lettek kivágva, különböző méretekben, majd rajtuk végeztek szakítóvizsgálatot és statikus, hárompontos hajlítóvizsgálatot is. Utóbbihoz $50 \times 8 \times 16$ mm-es próbatesteket használtak, az alátámasztó hengerek közti távolság 40 mm, a hengerek pedig 10 mm átmérőjűek voltak (**3. ábra**). Az eredmények azt mutatták, hogy a kavaro dörzshegesztés az ismertetett paraméterekkel kivitelezhető, a lemez és hab között széles régióban kötés keletkezett, ugyanis a kavarást végző hegy belepenetrálta a lemez anyagát a hab cellái közé. A SEM képeken látható, hogy egyértelmű határolóvonal nem látszik a hab és a lemez anyaga között, így kijelenthető, hogy atomi szinten jött létre kötés köztük. A hárompontos haj-

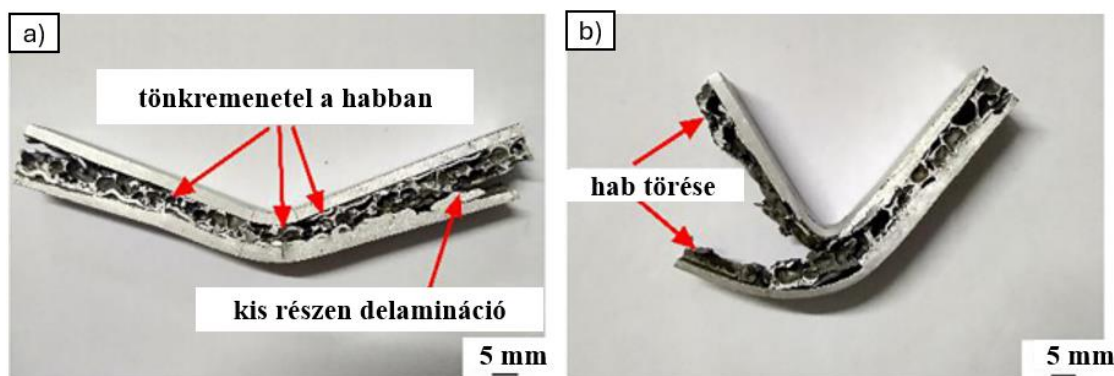
lítóvizsgálat során három különböző próbatestet vizsgáltak, egyszer az alumínium habot önmagában, majd olyan szendvicsszerkezetet, ahol a hab és a lemez közt adhéziós kötés volt („AFS-a”), végül pedig a kohéziós kötéssel létrehozott szendvicsszerkezeteket hajlították el („AFS-m”). A hab önmagában nagyon rideg, az „AFS-a” próbatest esetében, a gyenge kötés miatt nagy területen delamináció volt megfigyelhető, azonban sokkal nagyobb erőt volt képes felvenni, amit még a hab eltörése után is folytatni tudott, köszönhetően a lemezeknek. Az „AFS-m” próbatest azonban kimagaslóan magas erőértéket vett fel a kezdeti szakaszon, bár a hab töltet törése után ez az érték jóval nagyobb lett, mint az „AFS-a” próbatest esetében, viszont a lemezeknek hála egy ponton stagnált, majd kissé ismét emelkedett a felvett erő értéke, míg nem a húzott lemez is eltört. Összességében az „AFS-a” próbatestek ~ 11 J energiát, míg az „AFS-m” próbatestek ~ 20 J energiát nyeltek el, tehát a levonható konklúzió az, hogy a hab töltet, ha kohéziós kötésben van a nagy szilárdságú és vastagságú lemezekkel, akkor a hárompontos hajlítóvizsgálat során, a terhelést jól eloszlatva, nagy erő felvételére és nagy energia elnyelésére képes a létrehozott szendvicsszerkezet [24].



3. ábra Próbatestek (a) alumínium hab, (b) "AFS-a", (c) "AFS-m" hárompontos hajlítás közben, valamint (d) ezek feszültség-alakváltozás görbéi [24] alapján

Peng és társai szintén kavaro dörzshegesztést alkalmaztak AFS szerkezetek létrehozására. A kutatásban a hab és a lemezek is alumínium ötvözetből voltak, AA6061-T6 ötvözetű és $150 \times 140 \times 5$ mm-es befoglaló méretű lemezeket helyeztek a hab aljára és tetejére. A hegesztés előtt mind a habot, mind a lemezeket csiszolópapírral csiszolták, illetve ultrahangos tisztításon is átesetek. A kavaro dörzshegesztő berendezés 750 fordulat/perc sebességgel forgott, előretolási sebessége 35 mm/perc volt. A szerszám W18Cr4V acél ötvözetből készült, 18 mm átmérőjű, lapos vállú volt, a hegye pedig 6 mm átmérőjű és 3 mm hosszú volt. A váll bemélyedése 0,2 mm volt, a nyomvonal eltolása pedig 6 mm. A hegesztés útvonala a lemez egyik végétől a másikig

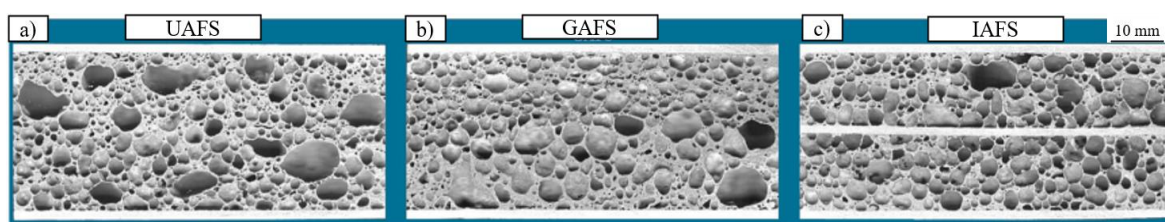
tartott, majd onnét visszafordulva hegesztették a következő varratot. Az elkészült habszerkezetből ezt követően a hegesztési irányra merőlegesen vágtak ki $100 \times 10 \times (11/5/3) \text{ mm}^3$ befoglaló méretű próbatesteket 4 pontos kvázi-statisztikus hajlítóvizsgálathoz. Egy próbatestet Charpy féle vizsgálattal is vizsgáltak, annak befoglaló mérete $55 \times 10 \times 11 \text{ mm}^3$ volt. A hajlítóvizsgálat során a hengerek $0,2 \text{ mm/s}$ sebességgel közeledtek egymás felé. A hajlítószilárdság-elmozdulás görbék három elkülöníthető szakaszt mutattak a habszerkezetek esetén: először egy meredek rugalmas szakasz, majd egy képlékeny szakasz, amely a cellafalak találkozását és ahhoz közeli cellákat terheli és deformálja, majd pedig a harmadik szakaszban a cellák összeesnek és a delamináció is megtörténik a gyengébb kötésű helyeken. A hajlítószilárdsága a szendvicsszerkezeteknek $32,4 \pm 2 \text{ MPa}$, ami az alumínium lemezek ($264,1 \pm 1 \text{ MPa}$) és az alkalmazott alumínium hab önmagában mutatott hajlítószilárdság ($6,2 \pm 0,6 \text{ MPa}$) értéke közt van. A szendvicsszerkezetek gyenge pontja hajlítás esetén a nagy ridegségű hab töltet. Dinamikus vizsgálat esetén, a próbatest a kötéstechológia sikerességének értelmében kedvező eredményt mutatott, ugyanis a lemez a húzott oldalon nem a kötésnél vált le a habról, hanem a hab törött el, tehát a kötés megfelelően erősnek bizonyult. A hab bár ridegen tört egy adott szakaszon, viszont tekintve, hogy nem törött teljesen ketté, nagyjából a felénél hosszabb szakasz ép maradt, így ez jól jelzi, hogy dinamikus igénybevétel esetén ellenállónak bizonyul a szendvicsszerkezet (4. ábra). Egyébként összehasonlítva más kutatási eredményekkel [25,26], ahol adhézión és forraszlemez megoldással hoztak létre alumínium hab szendvicsszerkezeteket, a hajlítószilárdság 16-20%-kal nagyobb értéket sikerült elérni, köszönhetően a kavará dörzshegesztésnek [27].



4. ábra a) a statikus hajlítás során elhajlított AFS, b) a dinamikus vizsgálatban tönkrement próbatest, [27] alapján

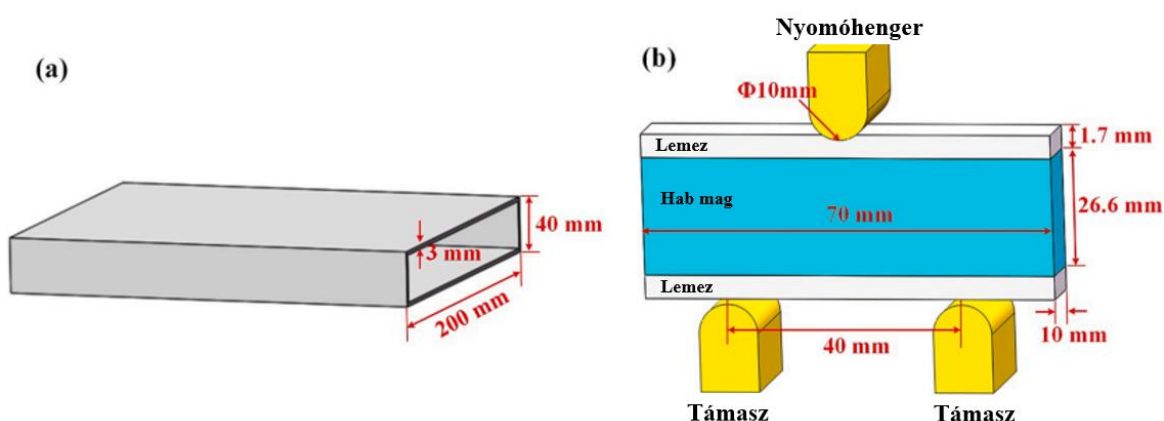
Yang és társai különböző alumínium habbal töltött szendvicsszerkezeteket készítettek, majd vetették őket hárompontos hajlítóvizsgálat alá, emelt hőmérsékleten. A kutatásban három féle szendvicsszerkezetet vizsgáltak, egyik esetében a hab sűrűsége egységes volt (uniform foam core, UAFS), másik esetben a fémhab töltet két félre lett szeparálva gyártás előtt, és azok sűrűsége eltérő volt (density-graded foam core, GAFC), harmadik esetben pedig a fémhab töltet

félúton el lett választva egy alumínium lappal, amit már a habosítás előtt odahegesztettek a tégelybe (interlayer plate, IAFS) [28].



5. ábra Háromféle szendvicsszerkezet a) egységes sűrűségű hab mag (UAFS); b) fémhab mag két fele eltérő sűrűségű (GAFS); c) fémhab mag közepére lemez van hegesztve (IAFS), [28] alapján

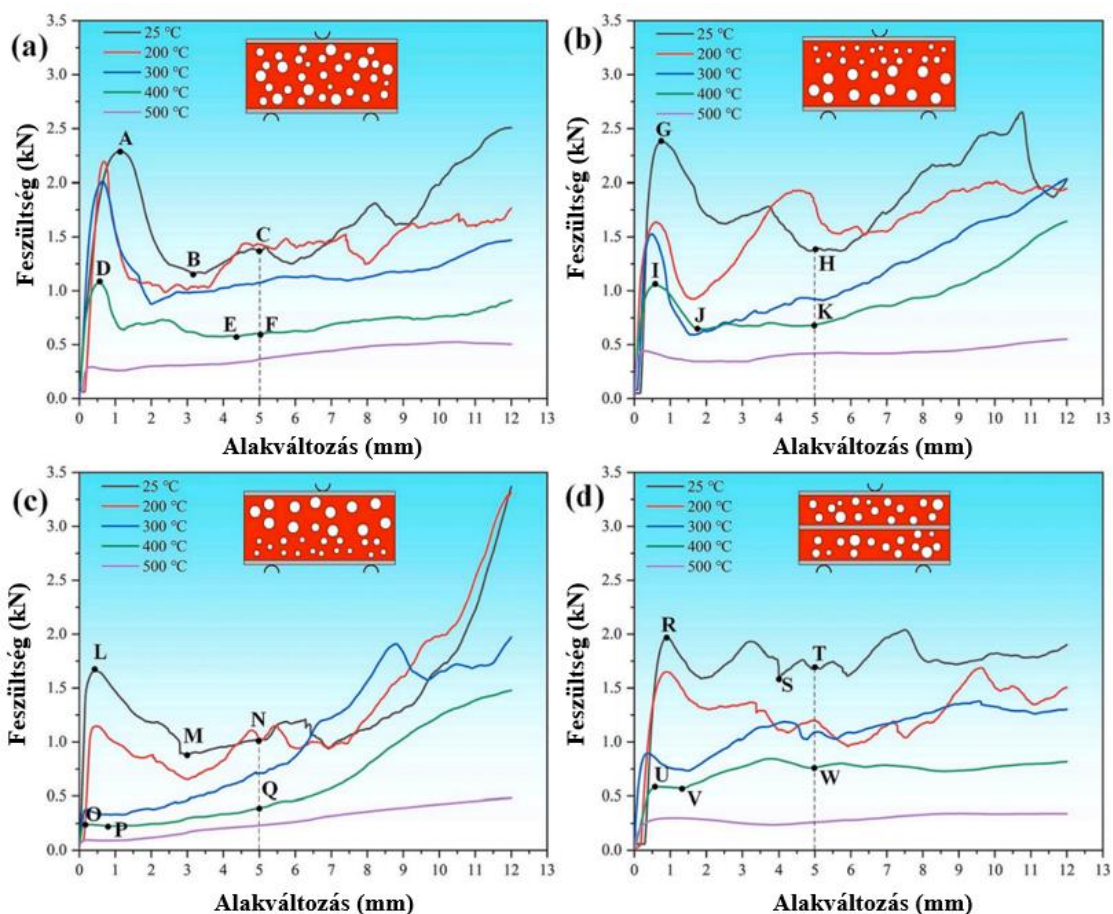
Első lépésként prekursor anyagot gyártottak. Ennek főbb alkotóeleme egy 12 tömegszázalék (t%) szilícium ötvözetű alumínium volt, melyhez 1 t% magnéziumot, 5 t% SiC-t ($\phi 10 \mu\text{m}$) adagoltak egy nagy hőállóságú grafittégelybe. Ezután előmelegítették a tégelyt és a felsorolt elemeket benne 480°C -ra és ezen a hőmérsékleten 3 órán át hőn tartották, majd TiH_2 -t is adagoltak a keverékhez ($\phi 50 \mu\text{m}$), különböző mennyiségekben. A habosítás pontos menete egy korábbi kutatásban került részletes ismertetésre [29]. A szendvicsszerkezet keretét 6063 alumínium adta, ezek hasáb formában lettek megtöltve, majd később, a mechanikai vizsgálathoz felszelelték őket úgy, hogy a szélén ne legyen a keret anyagából. A befoglaló hasáb méretei az alábbi ábrán (6. ábra) láthatóak. Az összes típus esetében ezután egy 4 lépéses megleghengerlés történt, ugyanis a hengerlés előtt 480°C -ra hevítették a darabokat 2 órán keresztül. A hengerlés során, a prekursor, és a zártszelvények közti kötést biztosították, majd ezt követően habosították a prekursor kemencében. Végül a próbatesteket az alábbi ábra jobb oldalán (6. ábra (b)) látható méretben kivágták és 640°C -on 630 másodpercig hűtötték [28].



6. ábra a) a kiindulási zártszelvény befoglaló méretei; b) a hárompontos hajlítóvizsgálat elrendezése és a releváns méretek; [28] alapján

A hárompontos hajlítóvizsgálatok során a GAFS próbatestek elrendezését úgy változtatták, hogy egyszer a kisebb sűrűségű legyen a húzott oldalon, máskor pedig fordítva. A vizsgálatokat

25/200/300/400/500°C-on végezték. Az emelt hőmérsékletű vizsgálatok elvégzése előtt a próbatestek legalább 30 percig voltak az adott hőmérsékleten tartva. A hajlítás során a felső nyomóhenger haladt lefelé, 2 mm/perc sebességgel. A vizsgálat eredményeit mutató feszültség-alakváltozás görbéket a **7. ábra** mutatja [28].

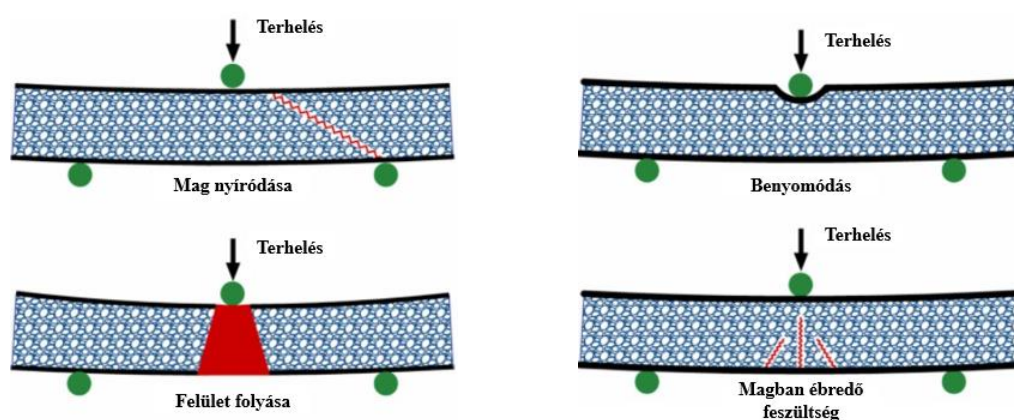


7. ábra A hárompontos hajlítás feszültség-alakváltozás görbéi a) UAFS próbatestek esetében; b) GAFS próbatestek esetében, mikor a kisebb sűrűségű oldal volt a húzott oldalon; c) GAFS próbatestek esetében, mikor a nagyobb sűrűségű oldal volt a húzott oldalon; d) IAFS próbatestek esetében; [28] alapján

A kutatás konklúziója az, hogy a mérés közbeni hőmérséklet növelésével csökkent az elérhető legmagasabb kezdeti feszültség érték, a platófeszültség és a feszültségingadozás mértéke is. Az IAFS próbatestek esetében sokkal kisebb volt a feszültségérték oszcillációja, köszönhetően a fémhab mag középvonalában elhelyezett lemeznek, amely nagyobb stabilitást adott a szerkezetnek és az elért feszültség értékeket még emelt hőmérsékleten is jobban tudta tartani, mint a többi típus. A hőmérséklet emelésével a tönkremenetel módja is megváltozott és a rideg törés és a delamináció helyett, egy szívósabb tönkremenetel volt megfigyelhető [28].

Wang és társai a kutatásukban három különböző sűrűségű (0.25/0.5/0.85 g/cm³) alumínium habot ragasztottak 2 mm vastag acéllemezekhez epoxi ragasztóval, miután megfelelően csiszolva és tisztítva voltak a felületek, majd a ragasztóanyag felvitelét követően, összeszorítást

alkalmazva 60°C-on 2 napig hagyták kötni a ragasztót. A próbatesteket kvázi-statisz hárompontos hajlítóvizsgálatnak vetették alá, az alátámasztó- és nyomóhengerek átmérője 10 mm volt, a terhelésráadás sebessége 2 mm/perc volt. A tönkremenetel nyomonkövetéséhez 3D digitális képpkorrelációs technológiát (DIC) alkalmaztak. Végeztek a próbatesteken dinamikus hajlítóvizsgálatot is, ahol az elforgás megelőzése végett alkalmaztak 4 acél félhengert, amelyek biztosították a próbatest stabilitását. A terhelést átadó nyomó és alátámasztó hengerek méretei megegyeztek a kvázi-statisz esetben ismertetettel. A 0,25 g/cm³ sűrűségű fémhab töltetű próbatest esetén 50 J volt a terhelő energia, a másik két esetben 180 J. A kiválasztott terhelés azon a megfontoláson alapult, hogy a szendvics szerkezet tönkremenetelét valósághűen tudják reprezentálni. A statisz hárompontos hajlítóvizsgálat esetén a tönkremenetel módja különbözött, attól függően, hogy milyen sűrűségű volt a fémhab mag. A legkisebb sűrűségű fémhabok esetében a fémhab mag nyíródott és tört szét, mind a kvázi-statisz, mind pedig a dinamikus vizsgálatokkor, míg a közepes és nagy sűrűségű fémhabok esetén a szendvicsszerkezetben a nyomott oldali lemez ment tönkre kritikusan, olyan mértékben nyomódott be a fémhab maganyagába, hogy teljesen eldeformálta a szerkezetet, átlépve annak folyáshatárát, a vastagabb próbatestek esetén pedig a nyomott lemez el is szakadt, mivel lokálisan nem tudta lekövetni a deformációt. A lehetséges tönkremeneteli módok az alábbi ábrán (8. ábra) láthatók [30].



8. ábra A próbatestek tönkremeneteli módjai, [30] alapján

A kvázi-statisz hárompontos hajlítóvizsgálat során kapott eredmények azt mutatták, hogy a fémhab sűrűségének növelésével növelhető a csúcsheszültség. A 10 mm vastagságú próbatestek esetében 22% és 47%-os növekedés volt megfigyelhető, míg a 20 mm-es vastagságú próbatestek esetében 114% és 186% volt a növekedés, a 0,5 g/cm³ és 0,85 g/cm³ sűrűségekre növelésnek köszönhetően. A dinamikus hajlítóvizsgálat során még nagyobb volt a növekedés, 10 mm-es próbatesteknél a sűrűség növelése 65% és 158%-os növekedést, míg 20 mm-es próbatestek ese-

tében 132% és 92%-os növekedés volt megfigyelhető a csúcshőfeszültségi értékben. Megállapították, hogy a 10 mm vastagságú próbatestek esetében az elnyelt energia 30 J-ról a sűrűség növelésével 117 J-ra, míg 20 mm vastagságú próbatestek esetén a 35 J-ról 152 J-ra nőtt ez az érték. A sűrűség növelése tehát összességében, tömegre fajlagosítva, a 10 mm-es próbatestek esetén közel 300%, míg a 20 mm-es próbatestek esetén majd 400%-os elnyert fajlagos energiát jelent. Érdekes eredmény, hogy az ejtődárdás vizsgálat során, a tönkremeneteli módok nagyon hasonlóan alakultak, mint a kvázi-statisztikus hajlításkor. Delamináció egyetlen esetben volt megfigyelhető, amely gyártási hibának tudható be [30].

Jun és társai a kutatásukban zártcellás alumínium hab töltetű szendvicsszerkezeteket állítottak elő és vizsgáltak. A hab 71.8% porozitású volt, míg a felső és alsó része a szendvicsszerkezetnek 3003-as alumínium volt, amelyek vastagsága 1 mm. A lemezek egyik oldalán 0,1 mm vastagságú 4045-ös AlSi forrasztóanyag volt. A próbatestek 100×20 mm méretűek voltak. A hab töltőanyag metallográfiailag elő lett készítve, csiszolva és polírozva, majd ultrahangos tisztításon is átesett 5-10 percen keresztül, majd etanollal tisztították a forrasztandó felületet. A teljes száradást követően, szendvics elrendezésben, a képen látható módon rögzítve (9. ábra), vákuum kemencébe helyezték 10^{-3} Pa vákuum alatt [31].

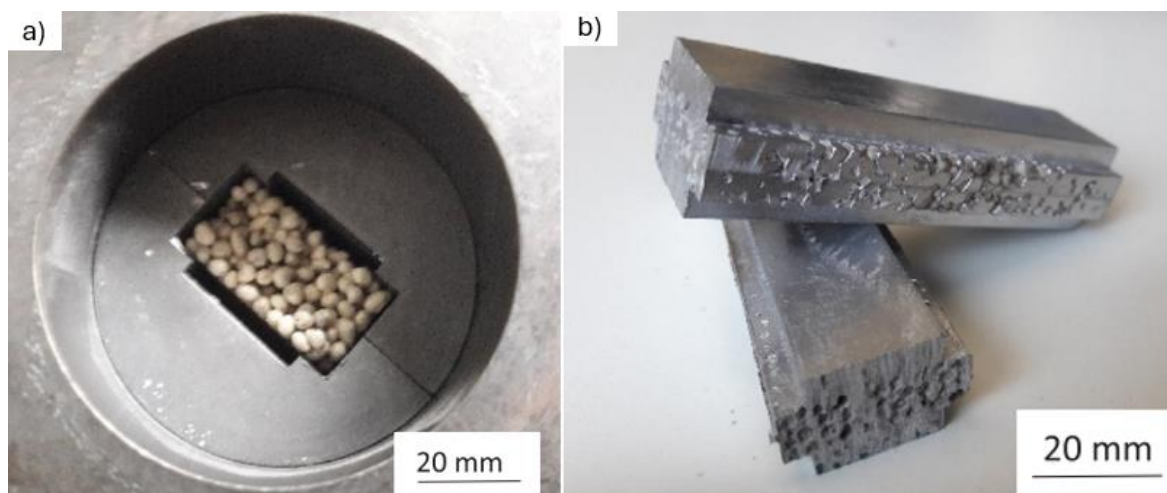


9. ábra A forrasztás során használt szerkezet [31]

A próbatestek 10°C/perc sebességgel lettek 400°C-ig hevítve, majd ott 30 percig hőntartották, a teljes térfogat megfelelő átmelegedése érdekében. Ezután 10°C/perc sebességgel hevítették 605/15/25°C-ra a próbatesteket, majd ezen a hőfokon 20 percig tartották a mintákat. Ezután a kemencéket kikapcsolták, és 150°C-ig kemencében hűltek a próbatestek, majd kivették őket onnan, és levegőn hűltek tovább. A próbatesteket ezt követően hárompontos kvázi-statisztikus hajlítóvizsgálatnak vetették alá, és a lemeztől való szétválást, valamint a fémhab törését vizsgálták. A 625°C-ra felmelegített próbatestek esetén bizonyult a kötés a legjobbnak, valamint a hajlítószilárdság csúcserőértéke is ezesetben volt a legnagyobb, 67,97 MPa értékű [31].

Cheneler és társai olyan szintaktikus fémhab szendvicsszerkezeteket készítettek, amelyek egy lépésben lettek előállítva, egyszerre a hab és a próbatestek felső- és alsó felén levő tömör részt, így kialakítva egy lépésben a szendvicsszerkezeteket. A lemezek és a fémhab mag más-

rixanyaga ugyan abból az anyagból készült, amely AlSi12 volt. A töltőanyag üveghab (expanded glass particles-EGP) volt, amelynek sűrűsége $0,35 \text{ g/cm}^3$ és átmérője $\varnothing 2\text{-}3 \text{ mm}$ volt. Alakjuk szerint ezek a kavicsok nem gömb, inkább ellipszoid alakúak voltak. A tégely, amelybe a habszerkezet létrejött, $28 \times 10 \times 90 \text{ mm}$ befoglaló méretű volt. A szendvicsszerkezet úgy készült, hogy az erősítőanyag közé nátrium-szilikátot kevertek, majd ezt CO_2 gázzal járatták át, ezzel rögzítve egy előformát, hiszen a szilikát reakcióba lép a CO_2 -vel és merev szerkezetté alakítja, amivel addig össze volt keverve. Ezt a merev előformát, ami 10 mm vastag volt és a szendvicsszerkezet magját jelentette, behelyezték a tégely közepére, $2\text{-}4 \text{ mm}$ -re a faltól. Az alábbi ábrán (10. ábra) látható a berendezés, elrendezés [32]:



10. ábra a) A gyártáshoz használt berendezés és b) az elkészült darab, amely még lemunkálás előtt áll, [32] alapján

Az ilyen tégelyeket 300°C -ra hevítették elő, illetve vákuum alá helyezték, hogy levegő ne maradjon a töltőanyagok közt. A vákuum $0,9 \text{ bar}$ volt. A tégelybe 700°C -os AlSi12-t öntöttek vákuum alatt, az olvadt alumínium a töltőanyagok közt és körül áramlott, ezzel létrehozva a habot és a két oldalán a lemezeket. A végső próbatestek 20 mm szélesek 80 mm hosszúak voltak, magasságuk attól függött, hogy a fix 10 mm vastag fémhab mag alatt és fölött milyen vastagok voltak a kialakult lemezek. Ezek minden esetben $2\text{-}4 \text{ mm}$ közt voltak és egymással megegyező méretűek, de próbatestenként eltérőek. Később hárompontos hajlítási teszteket végeztek $0,1 \text{ mm/s}$ elmozdulási sebességgel, 64 mm -es alátámasztó henger távolsággal. Az elmozdulást precíz lineáris változó differenciál transzformátorral (LVDT) mérték. Az eredményeket első sorban nem a számszerű eredményekre összpontosították, hanem arra, hogy megmutassák, milyen összefüggés van a szerkezet sűrűségének növelése és az elbirt teher közt, ugyanis a sűrűséget a lemezek vastagságának növelésével tudták növelni. A szendvicsszerkezetek mechanikai tulajdonságai, különösen a hajlítószilárdság, a mag EGP-töltöttségének, valamint a fedőlemezek vastagságának függvényében változtak. A maximális tömegcsökkentés 31% , 21% és 11%

az 1 mm, 2 mm és 3 mm vastagságú lemezek esetén, a merevség és a magvastagság ezeknél a maximumoknál növekszik a lemezek vastagságának növekedésével. Ezeknek a kompozit szendvics szerkezeteknek a tömegcsökkentése és az elérhető szilárdsági értékek mértéke azonban jelentősen meghaladja a csak a maganyagra vonatkozó adatokat, ami jól szemlélteti a szendvics szerkezetek használatának előnyeit [32].

Az ismertett kutatások alapján belátható, hogy a fémhab szerkezetek létrehozása egy kiforratlan kutatási terület, azok kötéstechnológiája nagy odafigyelést és innovációs eljárásokat igényel. Fémhab szerkezetek hegesztésére az eddig kutatott hegesztési eljárások nem tűnnek ipari alkalmazásra célszerűnek, így mindenképpen egy eddig nem kutatott eljárás kivitelezésére és optimalizálására teszek kísérletet. A fémhab szendvicsszerkezetek létrehozására több kutatásban is tettem kísérletet, ezekből ötletet merítve, a magam részéről kivitelezhetőnek megítélt módszerrel, kemencés keményforrasztással hozok létre szendvicsszerkezeteket és vizsgálom a forrasztott kötés minőségét, a gyártási paramétereket és mechanikai tulajdonságukat.

4. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

4.1. Felhasznált anyagok

A kutatásom során alumínium mátrixú (AlSi12) szintaktikus fémhabokat öntöttem AlMgSi0.5 ötvözetű, kör keresztmetszetű zártszelvényekbe, valamint 99.7%-os tisztaságú alumínium mátrixú fémhabokat gyártottam és forrasztottam alumínium ötvözetű forrasztólemezekhez, amelynek a habbal találkozó része (liner-4147) megolvadt, míg a mag része (3117) nem. Folyósítószerként Technolit GmbH gyártású, AL-100 típusú folyósítószerrel használtam. A mátrixanyag és a zártszelvények anyagának kémiai összetételét a következő táblázat foglalja össze (1).

1. táblázat A felhasznált alumínium ötvözetek kémiai összetétele

Alkotóelemek (t%)								
Ötvözet	Al	Si	Mg	Fe	Mn	Zn	Ti	Egyéb
AlSi12	86,6	12,5	<0,001	0,50	0,15	0,01	0,14	0,08
AlMgSi0,5	99,2	0,42	0,19	0,014	<0,001	<0,001	0,01	0,09
3117	98,2	0,33	<0,001	0,15	1,18	0,005	0,13	<0,005
4147	87,9	11,6	0,16	0,23	0,014	0,007	0,008	<0,005

Töltőanyagként a Liapor GmbH & Co. KG által forgalmazott duzzasztott agyagkavics (DAGY) gömböket alkalmaztam, amelyek kémiai összetétele az alábbi táblázatban látható (2) [33], valamint a dörzshegesztéshez gyártott próbatestek esetén lokálisan, az agyagkavicsokkal mérettartományban megegyező NaCl sószemcséket használtam, nyílt cellás szerkezet létrehozásához, amely később vízzel kioldható a szerkezetből.

2. táblázat Duzzasztott agyagkavics töltőanyag kémiai összetétele [33]

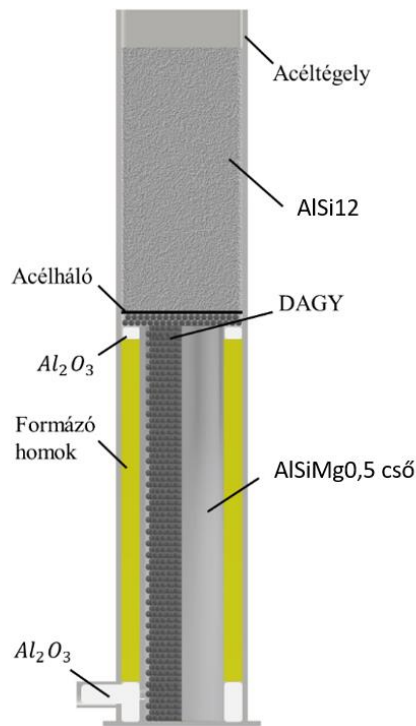
SiO ₂ (t%)	Al ₂ O ₃ (t%)	Fe ₂ O ₃ (t%)	Egyéb oxidok (t%) (CaO, MgO, Na ₂ O, K ₂ O)
60±5	17±3	14±2	Egyensúly

4.2. Gyártási eljárás

4.2.1. Zártszelvénybe infiltrált fémhab szerkezetek

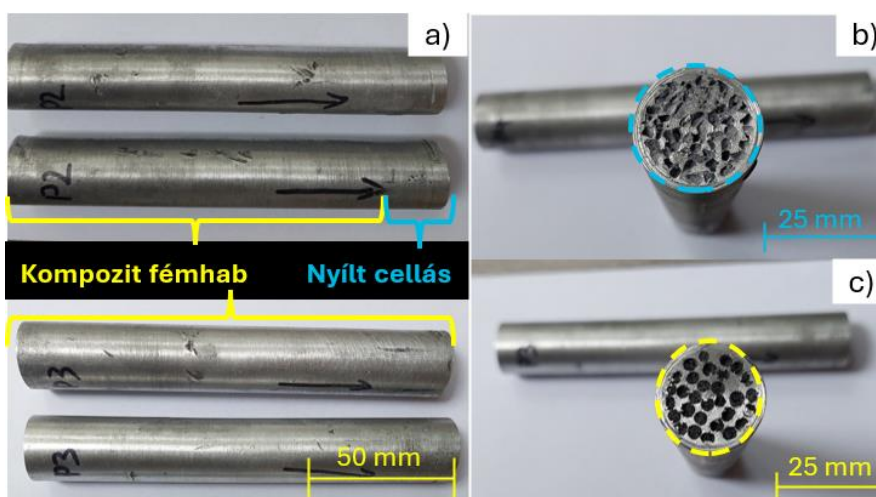
A hibrid kompozit fémhabbal töltött zártszelvényeket egy lépéses (*in-situ*) kisnyomásos infiltrálással állítottam elő. Ezzel az eljárással korábbi kutatásomban már sikeresen állítottunk elő a

szerzőtársaimmal, egy lépésben, kis falvastagságú, habttöltésű acélcsöveket [2]. A gyártási folyamat az előre legyártott, acélból készült tégelyek felhasználásával történt. Az acéltégelyek 60×60 mm négyzet keresztmetszetűek és 240 mm magasak voltak. Az üreges hasábtégely oldalán egy kivezető nyílás is helyet kapott. A gyártási folyamatot az acéltégely belső falának és a később belehelyezett vékonyfalú alumínium csövek külsejének grafitemulzióval való kikenésével kezdtem, majd az acéltégely oldalán lévő kilevegőztető-nyílást és az acéltégely legalját belülről alumínium-oxid paplannal kitömtem. Ennek szerepe az olvadék átfolyásának megakadályozása volt úgy, hogy a gáz távozását azonban biztosította a kisnyomásos öntés során. Ezután négy darab, 160 mm hosszú, 1,5 mm falvastagságú AlMgSi0,5 anyagú, $\varnothing 25$ mm átmérőjű csövet helyeztem el a tégelybe. Ezt követően a vastag alumínium-oxid paplan fölött, a csövek, illetve a tégely közti területet öntőforma homokkal töltöttem fel, amely homok, víz és bentonit elegyből tevődött össze, ezzel biztosítva a megfelelő tapadást, amely a formázó homok fő funkcióját segíti elő, ugyanis, öntés közben az olvadékarom ezzel a megoldással nem tud a cső külső feléhez folyni az infiltrálás során. A csövekbe a megfelelő mennyiségű $\varnothing 3,0 - 3,5$ mm méretű töltőanyagot helyeztem, egyik esetben úgy, hogy a csövek aljától számítva, 15 mm magasságig sószemcséket, majd fölé duzzasztott anyagkavicsot helyeztem el, míg másik esetben a teljes hosszában agyagkavics töltőanyagot alkalmaztam (**12. ábra**). A csövek tetején rozsdamentes acélháló volt, amelynek szerepe a töltőanyag olvadékban való felúszásának megakadályozása volt. A tégelyt az alábbi ábrán látható módon készítettem elő (**11. ábra**).



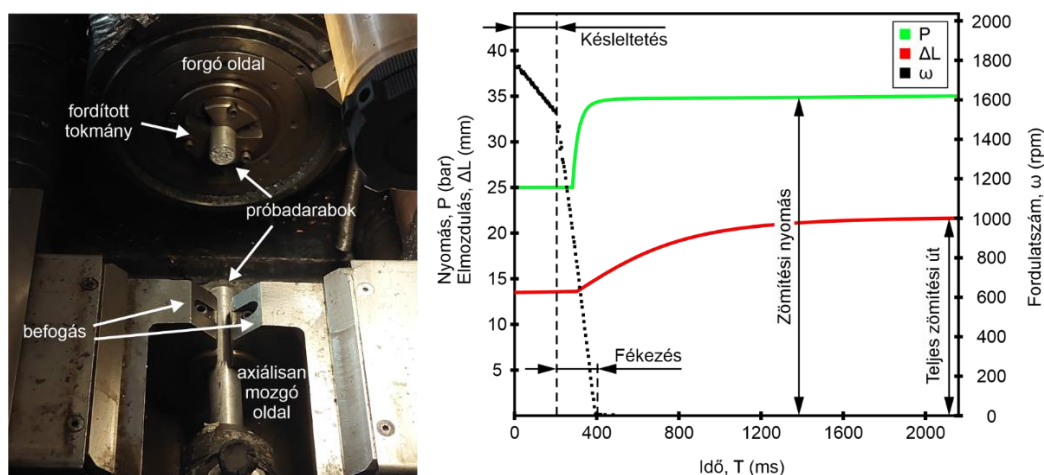
11. ábra Vékonyfalú csőbe töltött fémhab gyártásának sematikus ábrája [2] alapján

Az előkészített formát egy ProThermo Hofmann B-70 típusú kemencében 530°C-ra előmelegítettem, ahol 1 órán át hőntartottam. Ez idő alatt az AlSi12 kvázi-eutektikus mátrixanyag ötvözetet egy IND IF-10 indukciós olvasztókemencében hevítettem fel ~700°C-ig, majd a berendezést lekapcsolva, hűlés közben mértem az olvadék hőmérsékletét. Az infiltrálást 680°C-os olvadék hőmérsékletnél kezdtem meg. Az infiltráláshoz szükséges 350 kPa nyomást egy nagynyomású argon palackból nyertem ki, és egy jól szigetelt pipán keresztül adtam rá a tégelyre, 5 másodpercig, hogy az olvadék biztosan elérjen a csövek aljáig. Infiltrálás után a tégelyt folyó víz alatt hűtöttem le. Miután teljesen kihűlt a gyártott darab, a tégelyt eltávolítottam róla, és megkezdtem a sószemcsék kioldását a csövek végéből, ezzel elérve a nyílt cellás szerkezetet ott, ahol a kötést létre akartam hozni. A teljes hosszában agyagkavics töltőanyagú szerkezetek esetében ezt a lépést természetesen nem kellett véghez vinni. A darabok dörzshegesztési kívánt felületét ezt követően le kellett munkálni síkra.



12. ábra Dörzshegesztéshez egylépéses infiltrálással előállított fémhab szerkezetek. Fotó a belső szerkezeti arányokról (a), valamint a nyílt cellás (b), és szintaktikus/kompozit fémhab végekről (c)

A próbatestek közötti kohéziós kötést forgó dörzshegesztési eljárással (421-es eljárás) hoztam létre a Harlo Kft.-nél. A cég egyedi DHL-100-3 típusú berendezéssel dolgozik. A kötést a hevített oldalak között az egyik fémhabrészforgása és a fémhabrészen keresztül kifejtett nyomás okozta lokális képlékeny alakváltozás hozta létre. A külső cső segített a megfogásban, és részt vett a hegesztési varrat kialakításában is. A hegesztés során minden esetben $\varnothing 25$ mm átmérőjű szerkezeteket kötöttünk össze egymással, 1800 fordulat/perc forgási sebességgel. A szerszámban az álló fél egy fix, oldalról megnyomó satuval fogja be a próbatest adott felét, míg a forgó szerszámfél, egy egyedi gyártású és a Harlo Kft. saját szabadalmaztatású, körben, egyenletesen nyomó, tokmány volt alkalmazva. A tokmányzáró nyomás 37 bar, a satu zárónyomása ezzel szemben 120 bar volt. A próbadarabok elrendezése a dörzshegesztő szerszámban, valamint a paraméterek valós időbeli változása az alábbi ábrán látható (13. ábra):



13. ábra A próbatestek elrendezése a hegesztőberendezésben (balra), valamint a paraméterek valós időbeli változása a dörzshegesztés során (jobbra)

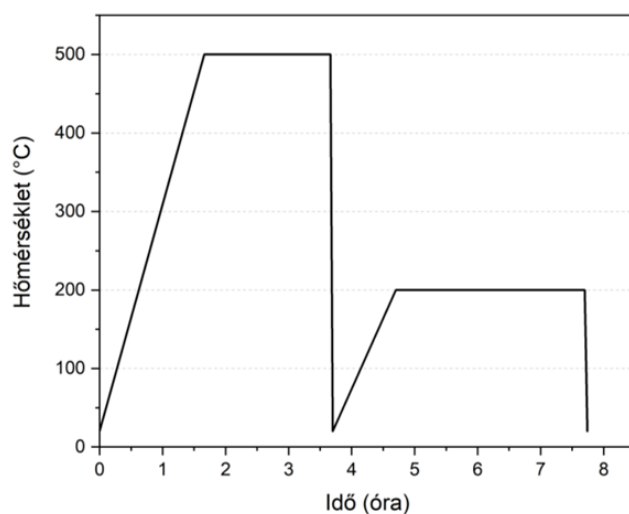
A K1-K2 jelű próbatestek, habár ugyan olyan paraméterrel voltak hegesztve, mint a P2 és P4 jelű próbatestek, mégis elkülönítve kezelném őket, hiszen a sószemcsék még alapos kimosás ellenére is fellelhetőek voltak a P jelű próbatestek varratában, így a K jelűeknél a só kimosására fokozott figyelmet szenteltem, csak úgy, mint az N jelűek esetében. A hegesztés során alkalmazott egyéb paraméterek az alábbi táblázatban láthatók (**3. táblázat**):

3. táblázat A forgó dörzshegesztés során alkalmazott paraméterek

Sorszám	Hossz	Előmelegítési nyomás	Zömítési nyomás	Előmelegítési út
P1 (DAGY)	160 mm	25 bar	35bar	7,5 mm
P2		25 bar	35 bar	7,5 mm
P3 (DAGY)		30 bar	40 bar	7,5 mm
P4		25 bar	35 bar	7,5 mm
K1-K2	150 mm	25 bar	35 bar	7,5 mm
N1	150 mm	25 bar	35 bar	8,5 mm
N2		25 bar	40 bar	8,5 mm

4.2.2. Dörzshegesztés utáni hőkezelés

A dörzshegesztett fémhab szerkezetek AlMgSi0,5 ötvözetű, alumínium csövekbe voltak infiltrálva, amely egy kiválóan keményíthető ötvözet, hiszen az alumínium, az ötvözőkkel szilárd oldatot alkot, az oldódás korlátozott és a szilárd állapotban való kiválás vegyület formájában történik. A hőkezelés első lépéseként oldatba vittem az ötvözt, majd a kiválást egy kritikusanál gyorsabb hűtéssel akadályoztam. Így a megeresztés során a vegyület, a túltelített szilárd oldatból, egy finomabb formában válik ki, amely képes hatékonyan növelni a szilárdságot. A hőkezelés lépései az alábbi ábrán (**14. ábra**) láthatók:



14. ábra A dörzshegesztett próbatestek hőkezelése

4.2.3. Szintaktikus alumíniumhab szendvicsszerkezetek

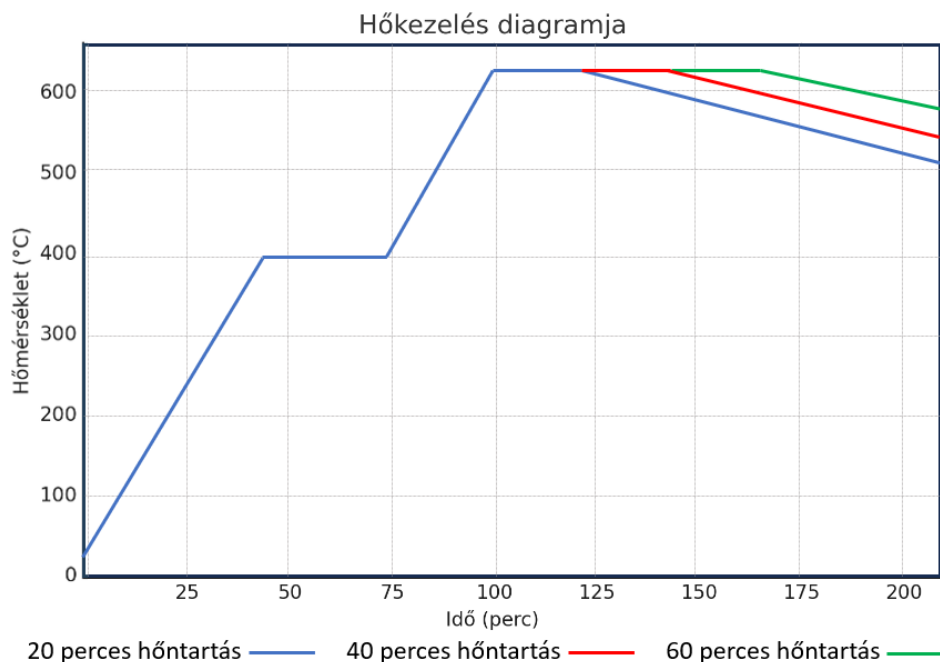
A gyártási folyamat, hasonlóan az előzőekben ismertetetthez, az öntéshez használt acéltégelyek ($60 \times 60 \times 240$ mm magas négyzet alapú hasábtégely) belső felének grafitemulzióval való kikészítésével kezdődött. Ezt követően, a tégely oldalán található kilevegőztető-nyílás ez esetben is, alumínium-oxid paplannal kellett kitömni, hogy a gáz távozását biztosítsa, de az olvadékot ne engedje ki a kisnyomásos öntés során. Ezt követően a megfelelő mennyiségű (~300 ml) előzőekben ismertetett töltőanyag került betöltésre a tégelybe, amelyek infiltráláskor való felszínre úszását egy rozsdamentes acélháló akadályozta. Az előkészített tégelyeket ProThermo Hofmann B-70 típusú kemencébe helyezve hevítettem elő, 550°C -ra, ahol legalább fél órát voltak tartva, a teljes geometriában való átmelegedés érdekében. Mindeközben, a 99.7%-os tisztaságú alumínium mátrixanyagot egy IND IF-10 típusú indukciós olvasztóberendezés segítségével olvadék állapotba hoztam, amelynek hőmérsékletét Maxthermo MD.3003 K digitális hőmérővel lett mérve. Az öntés akkor kezdődhetett el, amikor az olvadék $\sim 750^\circ\text{C}$ hőmérsékletű volt. Az infiltráláshoz Ar gázt és 500 kPa nyomást alkalmazva, sikeresen előállítottam a fémhab tömböt. A lehűlést és az acéltégely eltávolítását követően a forrasztáshoz $\sim 15 \times 58 \times 100$ mm befoglaló méretű hasábokat munkáltam ki, szalagfűrész segítségével, amelyek két felét folyó víz alatt P120-P600 minőségű SiC csiszolópapírral készítettem elő, majd folyósítószerrel kenve mind a fémhab felületét, mind pedig a forraszlemezek felületét, egy, az alábbi ábrán (**15. ábra**) látható, leszorítást biztosító szerkezetbe helyeztem a darabot, amely tetejére összesen 27 N súlyt tettem, ezzel biztosítva a szorítóerőt, a csavarkötés hőre történő lazulása esetén is.



15. ábra Szintaktikus fémhab szendvicsszerkezetek forrasztása közben alkalmazott, leszorítást biztosító szerkezet

A forrasztás a 921-es eljárás szerint, kemencés keményforrasztás útján történt, amely során a darabokat kemencébe helyezés után egységesen, az adott kemence szabad felfűtési módjában 400°C -ig, ahol hőn lettek tartva 30 percig, majd a darabok hasonló hevítési sebességgel lettek 630°C -ra hevítve, ahol 20, 40 vagy 60 percig voltak hőntartva, mielőtt a kemencét kikapcsolva,

azzal együtt hűltek volna le. A változó paraméter tehát a maximális hőmérsékleten való hőntartás ideje volt. A forrasztás pontos diagramja az alábbi ábrán (**16. ábra**) látható. Az elkészült darabok ezután a végső méretre lettek munkálva (~24×17×100 mm).



16. ábra A forrasztási folyamat hőkezelési diagramja

4.3. Vizsgálatok

4.3.1. Sűrűségmérés

Sűrűségmérés során először egy Mitutoyo CD-15DC Absolute Digimatic típusú digitális tolómérővel lemértem a mechanikai vizsgálattal vizsgálni kívánt próbatestek befoglaló méreteit, mindegyik esetén, három különböző ponton mértem. Mind a forrasztott szendvicsszerkezeteknél, mind pedig a hegesztett szerkezeteknél. A mért értékekből átlagot számítottam, majd egyszerű geometriai számítások segítségével meghatároztam a térfogatukat ((1)–(2)). A térfogat meghatározása után egy Denver Instrument APX 200 típusú precíziós digitális mérleg segítségével mértem meg az összes próbatest tömegét külön-külön. Ezt követően a mért adatokból látszólagos sűrűséget tudtam számolni, amely a fajlagosított tulajdonságok számításához is fontos, illetve a fémhabbal töltött szerkezetek elengedhetetlen jellemzője. A számításhoz szükséges méretek táblázatos formában megtalálhatók a mellékletben (**1. Melléklet-2. Melléklet**).

$$V_{hasáb} = a \cdot b \cdot l \text{ [mm}^3\text{]} \quad (1)$$

$$V_{henger} = d^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot l \text{ [mm}^3\text{]} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{g}{\text{mm}^3} \right] \quad (3)$$

4.3.2. Makroszerkezeti vizsgálatok

A dörzshegesztett darabok egy részén roncsolásmentes szerkezetvizsgálatot végeztem, számítógépes tomográfia (CT) segítségével, egy YXLON FF35 berendezéssel (YXLON International, Hamburg, Németország) a Miskolci Egyetem 3D laborjában. Ezenkívül több darabot hosszirányban két részre vágtam, hogy a varratot és annak környezetét vizsgálni tudjam. A vágáshoz Struers Discotom-10 vízhűtéses vágógépet és 10S25 vágótárcsát alkalmaztam, valamint a vágás során $0,5 \frac{mm}{s}$ vágási sebességet alkalmaztam. A vágási folyamat után a keresztmetszet felületét metallográfiai vizsgálatra készítettem elő, először folyó víz alatt P80 – P4000 minőségű SiC csiszolópapírral csiszoltam 2 – 2 percig a különböző minőségeken, majd 1 μm -es Topol oldattal políroztam 10 percig. A szerkezet előkészítése jelentős odafigyelést igényel, mert a duzzasztott agyagkavics töltőanyagrészekéből kisméretű szemcsék válhatnak le, amelyek az előkészítés közben mély karcokat hozhatnak létre a mintán. Emiatt minden előkészítési lépés között bő víz alatt lemostam a mintákat. A felületet ezt követően nem volt szükséges marni, hiszen a Topol egy Al_2O_3 tartalmú szuszpenzió, amely nem csak kiváló polírozásra, de az alumínium ötvözetben lévő szilíciumot is megmarja kellően ahhoz, hogy nincs szükség további marószer alkalmazására. A makroképek elkészítését Olympus SZX16 típusú sztereomikroszkóppal végeztem.

4.3.3. Mikrokeménységmérés

A keménységmérést Buehler IndentaMet 1011 mikrokeménységmérő géppel végeztem, ahol az alkalmazott terhelés 200 g volt (HV0,2). Ennél a mérési eljárásnál kiemelten fontos, hogy a minta sík legyen, így a polírozott mintán végeztem el a mérést, illetve, hogy a vizsgált felület párhuzamos legyen a minta aljának felületével, ami miatt be kellett ágyaznom már a felületelőkészítést megelőzően Duracryl plus kétkomponensű gyantába.

4.3.4. Mikroszerkezetvizsgálat

A mikroszerkezet vizsgálatához a vizsgálni kívánt felületet nem volt szükséges újracsiszolni, sem maratni, hiszen megfelelő minőségben lettek előállítva, már a makroszkópikus vizsgálatokra. A mikroképeket Olympus PMG-3 típusú fémmikroszkóppal készítettem különböző nagyításokon.

A forrasztott szendvicsszerkezetek határréteg vizsgálatához Zeiss EVO MA 10 pásztázó elektronmikroszkópot (SEM) használtam. A mérésekhez csiszolt és polírozott mintákat készítettem, hogy nagy nagyítással tudjam vizsgálni a forrasztólemez és a fémhab találkozását. A

vizsgálatok során a berendezés szekunderelektron módban, valamint EDS térképet is készítettem, amely során 20 kV gyorsítófeszültséget, 10000 pA mintaáramot, és 512×400 pixeles felbontást alkalmaztam. Az amplifikációs idő 0,96 s volt. Az EDS detektor Al, Si, Fe, Mn és O-t érzékelt. Az általános képek készítéséhez visszaszórt elektronokat használtam, illetve azokat detektáló detektort, valamin 1000 pA mintaáramot.

4.3.5. Mechanikai vizsgálatok

A forrasztott darabokon, a végső méretre vágást követően, kvázi-statisztikus hárompontos hajlítóvizsgálatot végeztem, hogy megállapíthassam a kötés minőségét. A hajlítóvizsgálat során MTS810 hidraulikus, illetve Instron 5965 elektromechanikus univerzális anyagvizsgáló berendezést használtam, előbbi 250 kN-, utóbbit 5 kN erőmérő cellával. Az alátámasztások közti távolság minden esetben 80 mm volt, az alátámasztó- és nyomóhenger átmérője pedig $\varnothing 10$ mm volt. A berendezés 5 mm/perc sebességgel mozdult el, 15 mm elmozdulásig. A kisebb erőmérő cellás berendezés alkalmazását a maximálisan felvett erő értéke indokolta, hiszen az egyik esetben sem közelítette meg az 5 kN-t, így az utolsó méréseknél elegendő volt a kisebb berendezést alkalmazni.

A dörzshegesztett darabokon szintén végeztem kvázi-statisztikus hárompontos hajlítóvizsgálatot, a kötés minőségének vizsgálata végett. Az alkalmazott berendezés megegyezett, az előzőekben ismertetettekkel. A berendezés 5 mm/perc sebességgel mozdult el, ~ 7 mm elmozdulásig.

5. EREDMÉNYEK

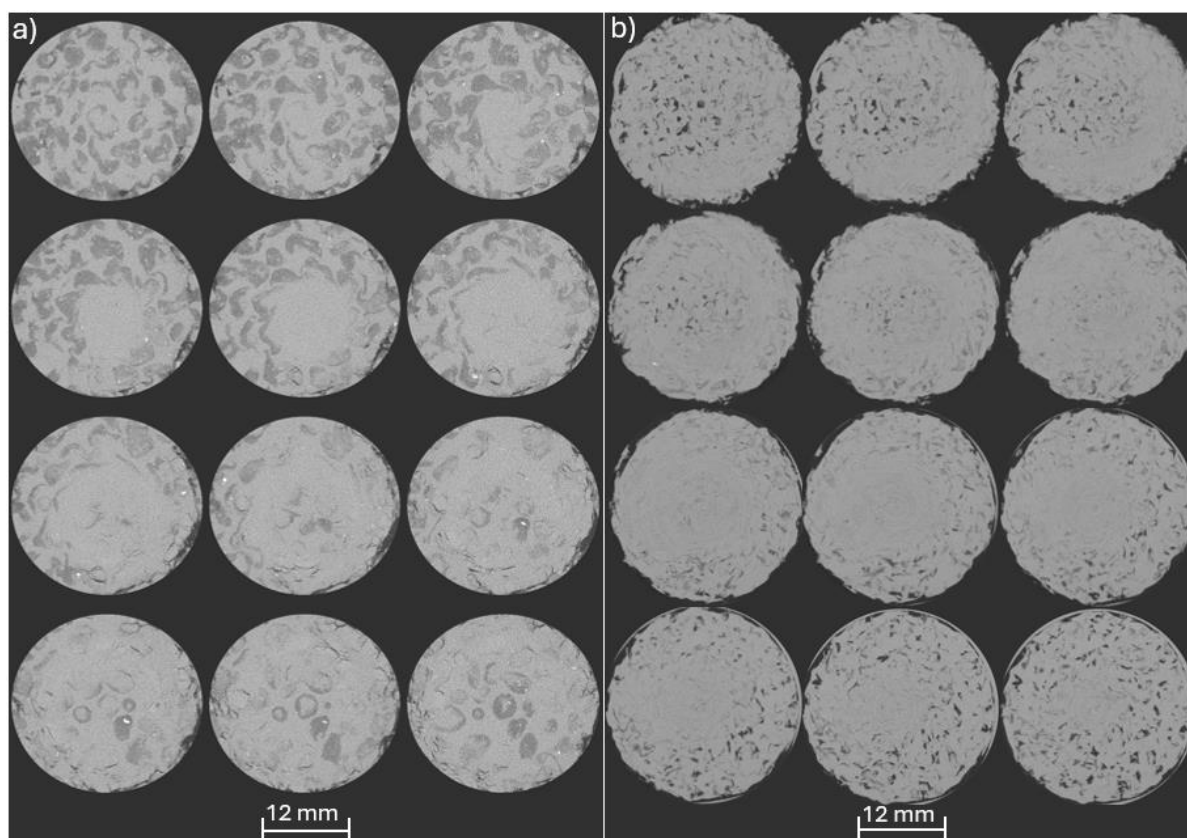
5.1. Sűrűségmérés eredményei

A kutatás során vizsgált próbatestek látszólagos sűrűségét geometriai- és tömegmérési eredményekből határoztam meg az előzőekben ismertetett képletek szerint. A csőbe töltött fémhab szerkezetek hegesztés előtti sűrűsége $1,71 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ volt, míg hegesztést követően, a névleges átmérőre történő lemunkálást követően, $1,73 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$, tehát nem növekedett jelentősen a szerkezet sűrűsége. Ebből következtethető, hogy a kötés kis térfogatban keletkezett és a cellás szerkezet alapvetően megmaradt.

A forrasztott szendvicsszerkezetek esetében, tekintve, hogy a forrasztás még más méretű szendvicsszerkezet létrehozását eredményezte, így előtte-utána mérést csak nagy hibával tudtam volna mérni, így csak a már kész próbatestek sűrűségét mértem. Az átlagos sűrűségük $1,58 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ volt.

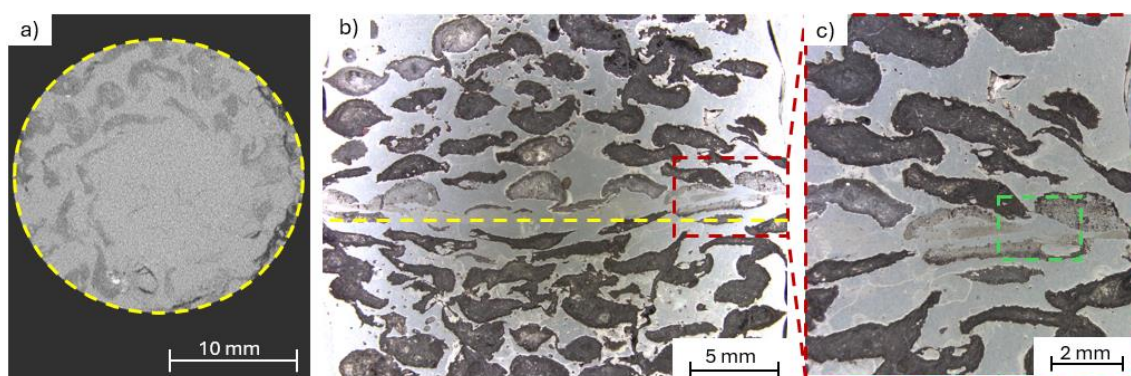
5.2. Makroszerkezeti vizsgálatok eredményei

A csőbe töltött kompozit fémhabok szerkezetét dörzshegesztést követően első lépésben CT vizsgálattal elemeztem, amely alapján megállapítható, hogy a kötés közvetlen közelében, örvényszerű a szerkezet jellege, azonban a kötésen belül, egy szűk keresztmetszetben, közel homogén a keresztmetszet (**17. ábra**). Ez a jelenség mind a lokálisan nyílt-, mind pedig a teljes hosszban zárt töltőanyagú próbatesteknél megfigyelhető, azonban a töltőanyagok jelenléte miatt, utóbbinál látványosabb. A paraméterek megválasztásának helyességére már a CT felvételekből is lehet következtetni, az N1-es próbatest rétegenkénti felvételein látható, hogy a kötés nagyobb keresztmetszetben és több rétegen keresztül létrejött, ebből annak sikerességére is lehet következtetni (**3. Melléklet**).



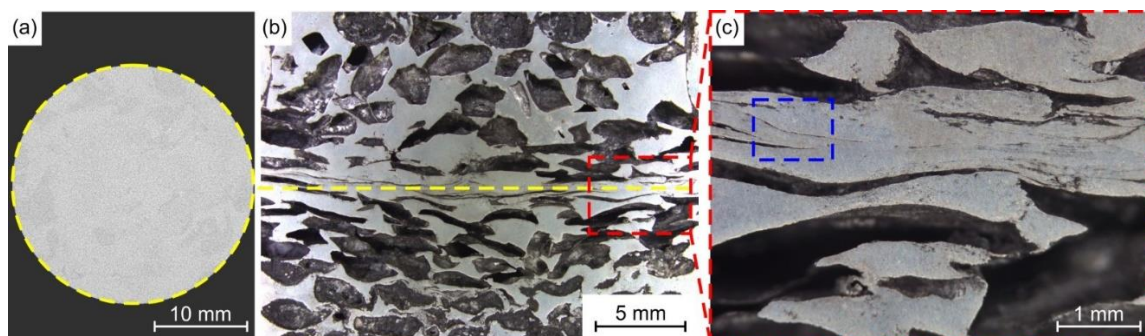
17. ábra A hegesztett próbatest varratának CT felvétele, rétegenként fotózva, a) P3-as próbatest esetében; b) K1-es próbatest esetében

A későbbi vizsgálatokhoz axiálisan félbevágtam a „P” jelű próbatesteket, ahol szintén megfigyelhető a szűk tartományban létrejött kötés. A „K” és „N” jelű próbatestek vizsgálata a jövőbeli tervek közt szerepel. A nyílt- és a zárt cellás szerkezetek esetében is jól látható a kötéshez közeli cellák deformációja. A zárt cellás esetben jól látható (**18. ábra**), hogy a varratban levő töltőanyagok összenyomódtak, porként valamelyest elkenődtek az örvényben, valamint a távolabbi töltőanyagok is tönkremenetelig deformálódtak.



18. ábra Duzzasztott agyagkavics töltőanyagú próbatestek dörzshegesztett kötésének a) CT felvétele; és b-c) a sztereomikroszkópos felvételek az axiális metszetről eltérő nagyításban

A nyílt cellás szerkezeteknél még jobban megfigyelhető, ahogy a nyílt, és zárt cellák is deformálódtak, valamint, hogy a kötés nem teljesen homogén (**19. ábra (c)**), hiszen a képlékenyen alakváltozott cellafalak, nem minden pontjában jött létre kohéziós kapcsolat.



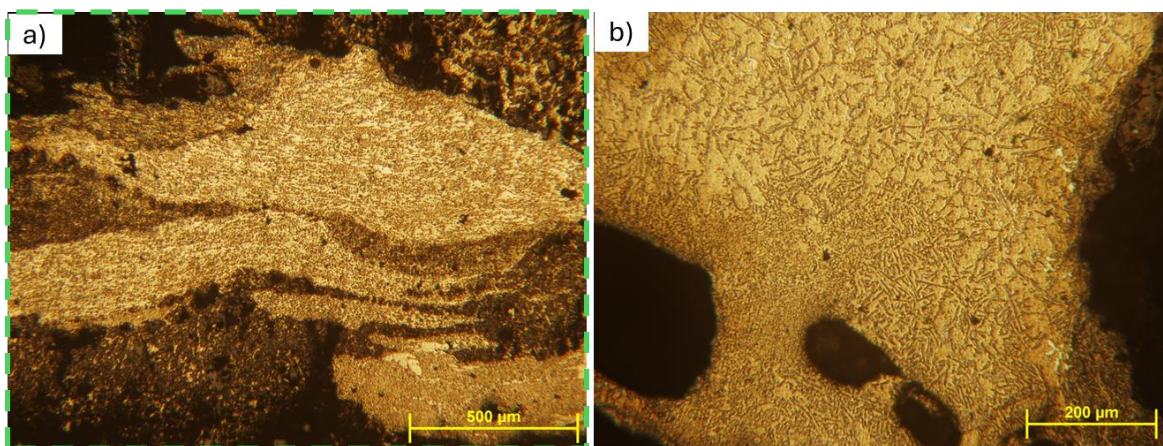
19. ábra Lokálisan nyílt cellás próbatestek dörzshegesztett kötésének a) CT felvétele; és b-c) a sztereomikroszkópos felvételek az axiális metszetről eltérő nagyításban

5.3. Mikrokeménységmérés eredményei

A mikrokeménységmérés során csak a P3-as próbatestet vizsgáltam egyelőre, amelynek egyik felét hőkezelttem, másikat nem. A hőkezeletlen esetben a mátrixanyag keménysége, a varrattól ~15 mm távolságra, 74 ± 1 HV0.2, míg a kötés vonalában 69 ± 3 HV0.2 keménységet mértem, tehát az anyag kismértékben kilágyult hegesztés közben, ennek oka a lokális újrakristályosodás lehet. A mátrixban mért pontok viszont már elegendő távolságra voltak, hogy ne lágyuljanak ki. A cső már az infiltrálás során kilágyult (55 ± 4 HV0.2), azonban a cső szilárdsága az előzőekben részletezett okok miatt, kiválásosan keményíthető (T6), ezáltal növelhető a keménysége. A hőkezelés után, a cső keménysége valóban megnőtt, (60 ± 1 HV0.2), azonban a mátrix (67 ± 2 HV0.2) és a varrat (66 ± 1 HV0.2) keménysége is csökkent. A hőkezelés hőmérséklet-értékei és a hőtartási idők a cső kiválásos keménységére voltak tervezve, így ezek az értékek a mátrixanyag kilágyulásához vezethettek.

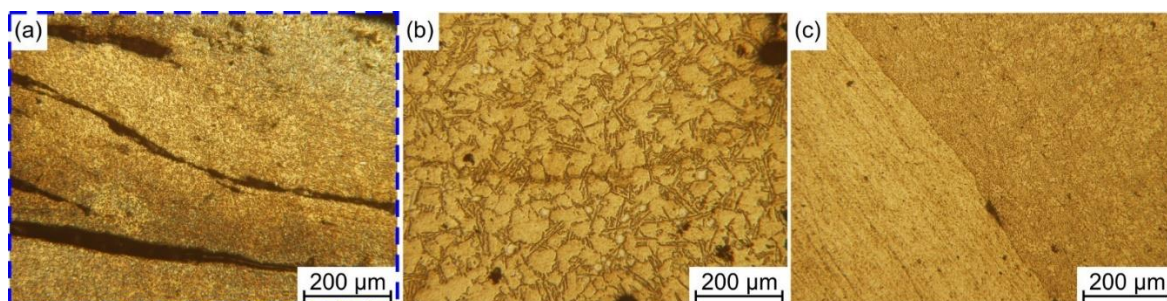
5.4. Mikroszerkezeti vizsgálatok eredményei

A mikroszerkezeti vizsgálatok során a **18. ábra** által is mutatott kötés homogenitásbeli problémája látható, zölddel bekeretezve. A töltőanyag a kötésben deformációt, tönkremenetelt szenved, a forgás hatására elkenődik, így a kötésben az agyagpor hullámszerűen jelentkezik. A kötéstől távolabb, a mátrixanyagban, jól látható a szilícium tús szerkezete, illetve néhány helyen a primer szilícium dúsulás is jelen van (**20. ábra**).



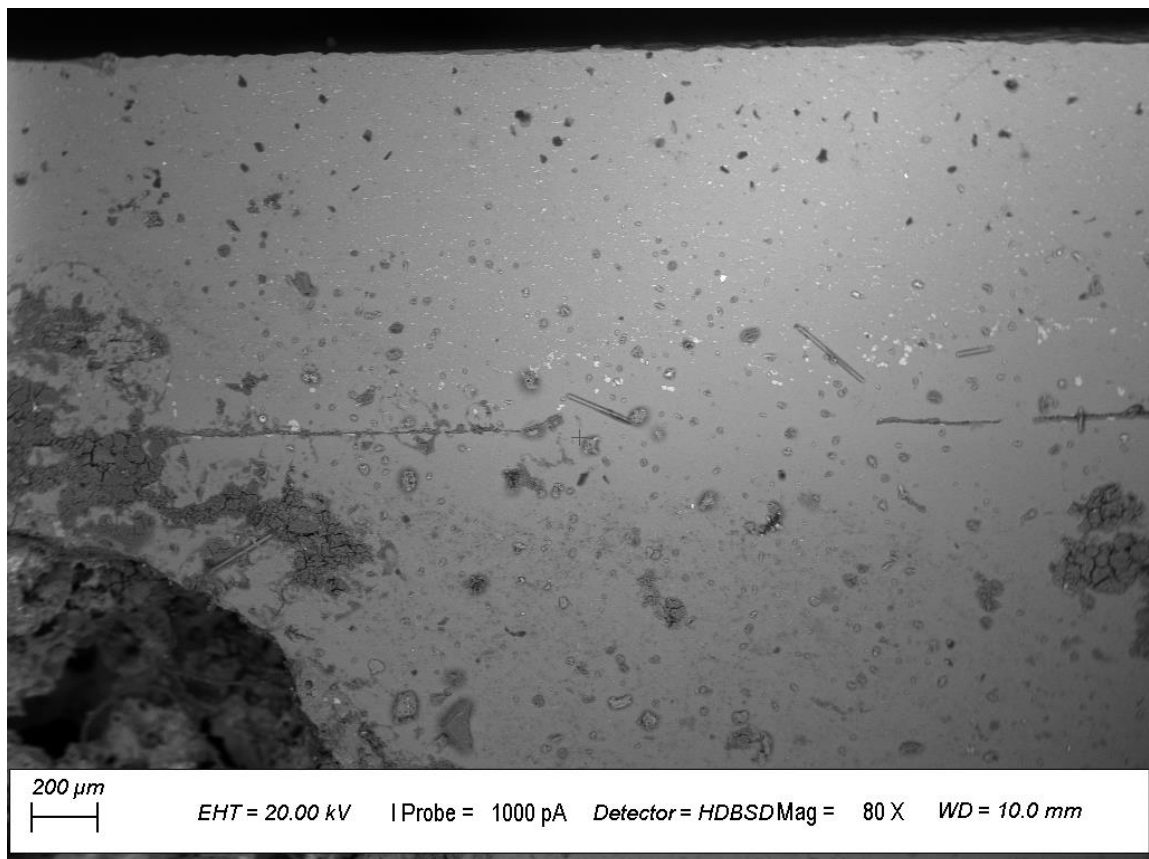
20. ábra A dörzshegesztett, csőbe töltött, szintaktikus fémhab mikroszerkezete a) kötésben, valamint a b) mátrixban

A **19. ábra (c)** tovább nagyítása látható kéken szaggatott kerettel az alábbi ábrán (**21. ábra**), valamint a hibrid kompozit fémhab mátrixanyagáról készült mikroszkópi kép. A kötésben látható vékony hézagok mikroszerkezeti képen is jól láthatók, tehát a kötés a nyílt cellás „P” jelű próbatestek esetén sem mutatkoztak mindenhol homogénnek, erről a nem elégséges paraméterek, és/vagy a nem megfelelően kioldott sószemcsék tehetnek. Ennek javítása, habár megtörtént a „K” és „N” jelű próbatesteknél, de azokról egyelőre még nem készült mikroszerkezet vizsgálat. A mátrixanyagban ez esetben is megfigyelhető a szilícium szép tűs elrendezése, illetve a néhány primer szilícium dúsulás.



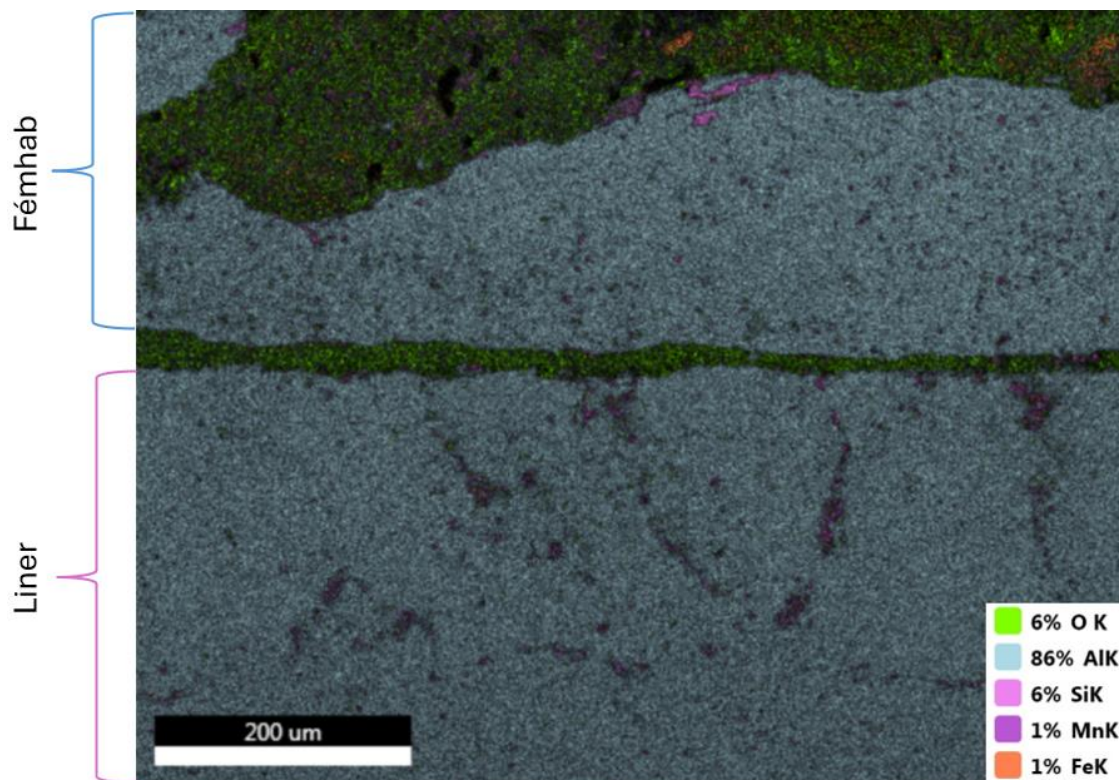
21. ábra A dörzshegesztett csőbe töltött hibrid kompozit fémhab mikroszerkezete a) kötésnél; b) a mátrixban, a kötéstől távol; valamint c) a cső és a mátrix határvonalán

A forrasztott szendvicsszerkezeteket SEM segítségével vizsgáltam, és az alábbi ábrán (**22. ábra**) jól látható, hogy habár a kötés megfelelőnek tűnik, és ezt később a mechanikai eredmények is alátámasztják, mégsem jött létre folytonos kohéziós kötés a lemez és a fémhab között. A két anyag közt egy jól látható oxid-réteg található, amely lehet az alumínium felületén lévő oxid, és/vagy a töltőanyag porózus szerkezete is megülhetett a repedésekben, a próbatest vágása és előkészítése során.



22. ábra Az F1-es próbatest SEM-mel, visszaszórt elektron módban készített képe (felül a forrasztólemez, alul a fémhab)

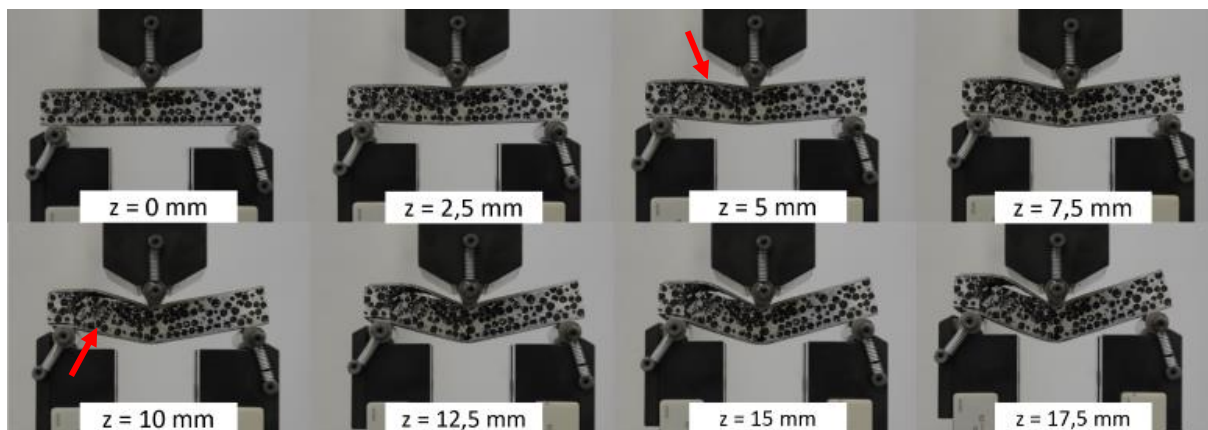
Az EDS térképet az F5-ös próbatesten csináltam, amely szintén jól megmutatta, hogy habár a kötés erősnek és kohéziósnek tűnik, biztosan nem folytonos, hiszen a lemez és a fémhab között egy jól látható oxidréteg van (**23. ábra**). A szilícium, habár a mátrixanyagban közel 12% van, mégis, mintha a linerben, dúsulna, így a két anyag között biztosan valamilyen diffúzió történt.



23. ábra Az F5-ös próbatestről készített EDS térkép

5.5. Mechanikai vizsgálatok eredményei

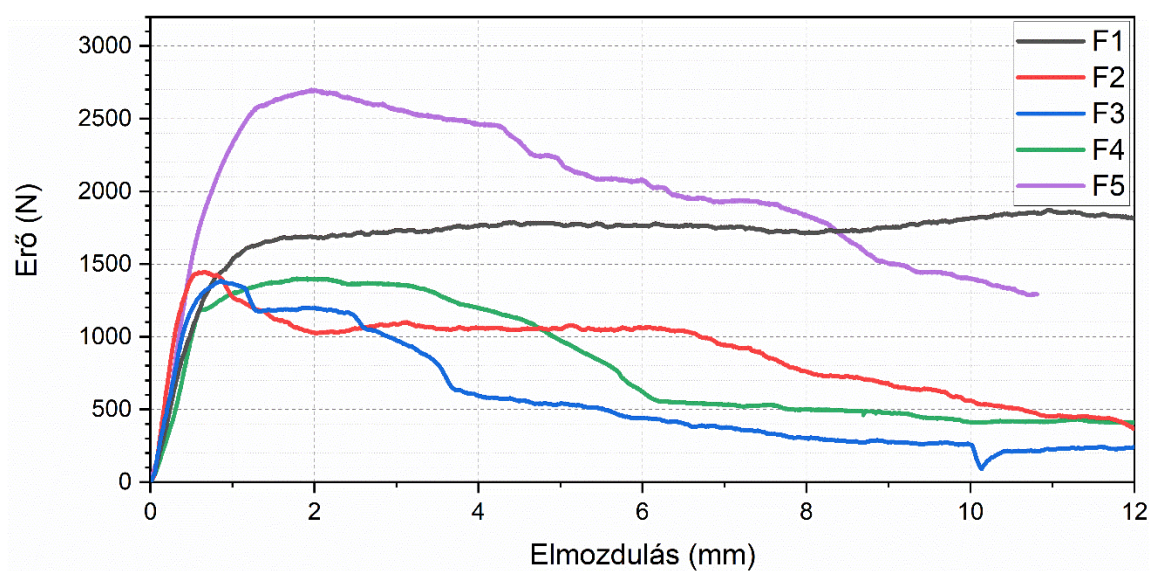
A forrasztott szendvicsszerkezetek hajlítóvizsgálata esetén, többenél is megfigyelhető volt delamináció, ahogyan az, az alábbi ábrán (24. ábra) is megfigyelhető, kiemelve piros nyilakkal:



24. ábra A maximális hőmérsékleten 20 percig hőntartott, forrasztott szendvicsszerkezet hajlítás közben. A piros nyilak jelölik a delamináció kezdetét az adott helyeken

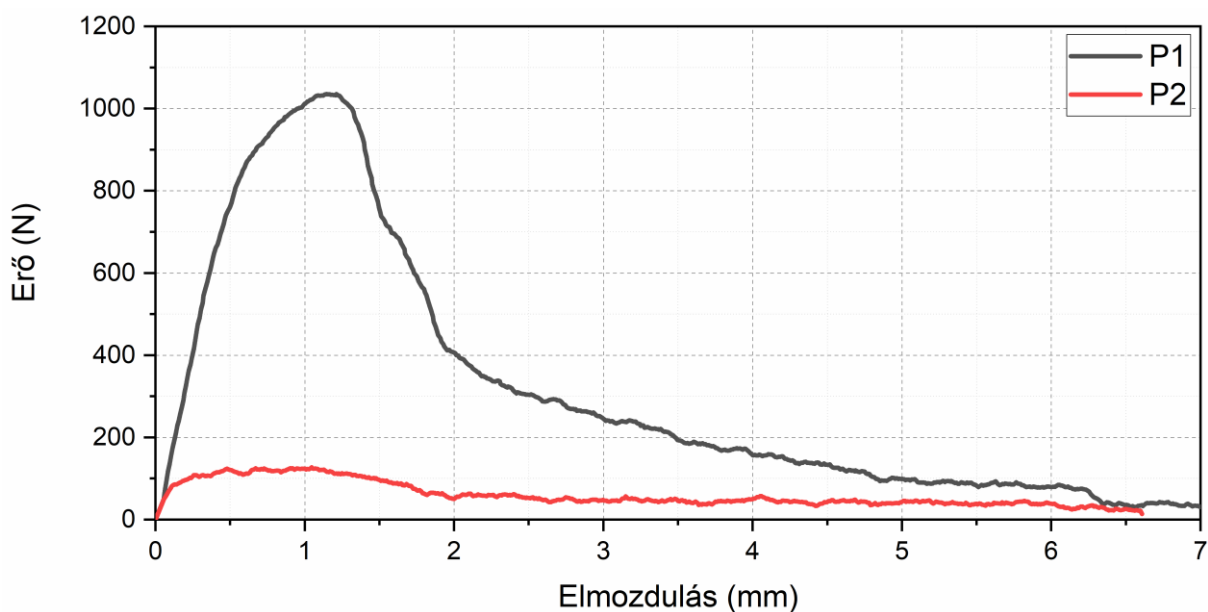
A F1-es próbatest nagy elmozduláson át képes volt felvenni a terhelést, még azt követően is, hogy a fémhab mag eltört benne. A delamináció ebben az esetben nem volt megfigyelhető, ezáltal a szerkezet, a vizsgálat végéig képes volt terhelést felvenni. Ezzel szemben a F2-es és F3-as próbatest esetében, delamináció jelensége volt látható, tehát a kötés nem volt megfelelő.

Ebből adódik, hogy a fémhab mag törését követően, mind a kettő szerkezet, már csak kisebb mértékű terhelés felvételére volt képes. A felső és az alsó lemez delaminációja külön-külön is erőesésben mutatkozik meg a görbéken. A F4-es próbatest esetében szintén megfigyelhető volt delamináció, azonban ez esetben már csak nagyobb elmozdulásnál kezdődött meg az erőleesés. A kötés ennek ellenére nem nevezhető megfelelőnek, hiszen a mag el tudott kezdeni kicsúszni a lemezek közül. Az összes próbatest közül, a legnagyobb erőterhelést, az F5-ös próbatest volt képes felvenni (2699 N), valamint 7 mm elmozdulásig 2 kN feletti erőterhelést bírt. Habár az F5-ös próbatest magjának jobb oldala a vizsgálat közben elrepedt, majd elvált a magtól, a kötés alapvetően megfelelő volt, hiszen a lemezek nem váltak el a fémhabtól. A kötés minőségét az is alátámasztja, hogy a felső nyomóhenger, a nyomott oldalon, minimálisan képlékeny alakváltozást okozott a felső lemezben. A próbatestek erő-elmozdulás görbéi az alábbi ábrán (**25. ábra**) láthatóak:



25. ábra A kvázi-statisztikus, hárompontos hajlítóvizsgálattal elhajlított szendvicsszerkezetek erő-elmozdulás görbéi

A dörzshegesztett próbatestek közül csupán kettőt tudtam vizsgálni kvázi-statisztikus hárompontos vizsgálattal, hiszen némelyiket hosszában felvágtam és hőkezelttem, hogy mikroszerkezeti- és mikrokeménységi méréseket végezhessek, míg a próbatestek másik fele CT vizsgálatra várt, így mechanikai vizsgálatukra ebben a kutatásban nem maradt kellő idő. A görbéken jól látszik, hogy jelentős erőt a P2-es próbatest nem volt képes felvenni, míg a P1-es próbatest bár a kezdetben képes volt értékelhető erő felvételére, alig több, mint 1 mm elmozdulást követően végigrepedt, és lezuhant a felvett erő értéke. A dörzshegesztett próbatestek erő-elmozdulás görbéi, az alábbi ábrán láthatóak (**26. ábra**):



26. ábra A kvázi-statisztikus, hárompontos hajlítóvizsgálattal elhajlított dörzshegesztett próbatestek erő-elmozdulás görbéi

Fontos megjegyezni, hogy ezek a próbatestek, az első hegesztés eredményei, így sem a megfelelő paramétert, sem pedig a mintaelőkészítést nem volt alkalmam kitapasztalni előtte, hiszen ilyen típusú testek előállítására sem található érdemi forrás, nem, hogy azok dörzshegesztésére. A lokálisan nyílt cellás esetben (P2-P4) a sószemcsék nem megfelelő kioldása okozhatta a kis keresztmetszet-kiterjedésű kötést, míg a teljes keresztmetszetben szintaktikus (P1-P3) próbatesteknél, a töltőanyag jelenléte. Ezek a próbatestek a túl sok, nem kívánatos anyagpor következtében, nem is voltak képesek, vagy csak nagyon kicsi részen, kohéziós kötést létrehozni. A későbbiekben gyártott – már mindegyik esetben lokálisan nyílt cellás - próbatestek esetén nagyobb figyelmet szenteltem a sószemcsék kioldására, valamint a hegesztési paramétereket is változtattam, annak megfelelően, hogy a hőeloszlás a darabban megfelelőbb legyen, valamint, hogy az érintkező oxidréteg az anyaglehordás növelésével fokozottan eltűnjön a varratból. Ezek az intézkedések azt kell eredményezzék, hogy egyenletesebben oszoljon el a hő, valamint, hogy ebben a nem kívánatos só/kerámia szemcsék se legyenek hátráltató tényezők. A CT felvételek arról árulkodnak, hogy ez így is történt és a varrat kiterjedése nagyobb lett, ezáltal ígéretesebb eredmények várhatóak a mechanikai vizsgálatok során.

EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE, KÖVETKEZTETÉSEK

A kutatásom során kapott eredményekből a következő következtetésekre jutottam. Teljes keresztmetszetben szintaktikus, illetve hibrid fémhab szerkezetek is létrehozhatóak, az általam kifejlesztett gyártási eljárással, valamint ezeknek a kötésére, a forgó dörzshegesztés, megfelelő eljárásnak bizonyult. A hibrid szerkezetek esetén, a nyílt cellás struktúra, megkönnyítette a kötés létrejöttét, nagyobb keresztmetszetű varratokat eredményezve, azonban a sószemcsék kioldása kritikus. Habár a mechanikai tulajdonságokat tekintve nem túl előnyösek ezek a próbatetek, de a hajlítás az alumíniumra és az ilyen rideg, cellás szerkezetekre egyébként sem túl előnyös. A sűrűségük ezeknek a szerkezeteknek nem nőtt számottevően a hegesztés során, valamint a varrat sem lágyult ki túlzottan, azonban a csövek kiválósos keményítése során bár a csövek keménysége növelhető, a mátrixanyag és a képlékenyen alakváltozott varrat újrakristályosodni, és így lágyulni fog a hőkezelés során. Ennek ellenére egy egységesebb, összességében növelt keménységű szerkezetet eredményezett a hőkezelés.

A kutatás során sikerült kemencés keményforrasztással, szendvics szerkezetű próbatesteket előállítsak, sőt, azok közül sikerült jó mechanikai eredményeket mutató próbatesteket is gyártani, azonban a pásztázó elektronmikroszkópon megvizsgált képek azt mutatták, hogy a forrasztólemez és a fémhab között oxidréteg van, így kohéziós kötés nem folytonosan jöhetett létre. A legmagasabb hőmérsékleten tartási idő hatása, forrasztás esetén, azonban nem bizonyult kritikusnak, sokkal inkább a megfelelő leszorítás és a lemezek precíz vágása játszik szerepet az eredményekben.

5.6. Jövőbeli tervek

A jövőbeli terveimet az alábbi pontokba szedtem össze:

- A további, meglévő hegesztett szerkezetek hőkezelése és hárompontos hajlítóvizsgálatuk elvégzése;
- Hibrid szerkezetek létrehozása, azonban a nyílt cellákat nem sóval, hanem kalciumkoriddal létrehozva, hiszen azok vízben való oldhatósága kedvezőbb;
- A vizsgált szendvicsszerkezetek mikroszkópi vizsgálatainak elvégzése;
- További szendvicsszerkezetek gyártása, kiemelt figyelmet fordítva a leszorításra és a lemez vágására, valamint azok zömítővizsgálatának elvégzése;
- Olyan szendvicsszerkezetek gyártása, amelyek a kötésnél nyílt cellások, ezzel növelve a kötés sikerességének esélyét.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Kemény A, Pados G, Májlinger K, Orbulov IN. TIG welding of in-situ produced syntactic metal foam-filled tubes TIG welding of in-situ produced syntactic metal foam-filled tubes 2024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1313/1/012001>.
- [2] Pados G, Kemény A, Szovák B, Károly D, Orbulov IN. Fabrication of In-situ Syntactic Aluminium Foam-Filled Steel Tubes. *Acta Mater Transylvanica* 2023;6:38–41. <https://doi.org/10.33924/amt-2023-01-07>.
- [3] Kemény A, Leveles B, Károly D. Functional aluminium matrix syntactic foams filled with lightweight expanded clay aggregate particles. *Mater Today Proc* 2020;45:4229–32. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.164>.
- [4] Orbulov IN, Szlancsik A. On the Mechanical Properties of Aluminum Matrix Syntactic Foams. *Adv Eng Mater* 2018;20:1–12. <https://doi.org/10.1002/adem.201700980>.
- [5] Weltsch Z. Járműipari kötéstechológiák. *Járműipari Kötéstechológiák* 2019:8–9. <https://doi.org/10.1556/9789634543305>.
- [6] Min D. Ultrasonic semi-solid soldering 6061 aluminum alloys joint with Sn-9Zn solder reinforced with nano/nano+micron Al₂O₃ particles. *Ultrason Sonochem* 2019;52:150–6. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.11.009>.
- [7] MSZ ISO/TR 25901:2020 Hegesztés és rokon eljárások. Szakszótár. 1. rész: Általános kifejezések. Welding and allied processes. Vocabulary. Part 1: General terms Soudage et techniques connexes — Vocabulaire — Partie 1: Termes généraux Schweissen und verwand 2023:1–4.
- [8] Varbai B, Dobranszky J. A hegesztés és a rokon gyártási eljárásai a fémek technológiájában. 2021.
- [9] MSZ EN ISO 15620:2000. Hegesztés. Fémek dörzshegesztése MSZ EN ISO 15620. Magy SZABVÁNY 2019.
- [10] Hegesztés , forrasztás és termikus vágás . Magy SZABVÁNY MSZ EN ISO 4063 2023.
- [11] Hangai Y, Ando M, Ohashi M, Amagai K, Suzuki R, Matsubara M, et al. Compressive properties of two-layered aluminum foams with closed-cell and open-cell structures. *Mater Today Commun* 2020;24:101249. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101249>.
- [12] Xue XB, Wang LQ, Wang MM, Lü WJ, Zhang D. Manufacturing, compressive behaviour and elastic modulus of Ti matrix syntactic foam fabricated by powder metallurgy. *Trans*

- Nonferrous Met Soc China (English Ed 2012;22:s188–92. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61707-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61707-5).
- [13] Xia X, Wang J, Peng Y, Wang N, He X, Qiu C, et al. Temperature-time superposition effect on compressive properties of AZ31B magnesium composite foams. *Metals (Basel)* 2018;8. <https://doi.org/10.3390/met8060434>.
- [14] Su MM, Wang H, Li KY, Hao H. Microstructure and compressive properties of AL/AL₂O₃ syntactic foams. *Mater Sci Forum* 2018;933 MSF:174–81. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.933.174>.
- [15] Májlínger K. Wear properties of hybrid AlSi12 matrix syntactic foams. *Int J Mater Res* 2015;106:1165–73. <https://doi.org/10.3139/146.111290>.
- [16] Katona B, Szebényi G, Orbulov IN. Fatigue properties of ceramic hollow sphere filled aluminium matrix syntactic foams. *Mater Sci Eng A* 2017;679:350–7. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.061>.
- [17] Fiedler T, Al-Sahlani K, Linul PA, Linul E. Mechanical properties of A356 and ZA27 metallic syntactic foams at cryogenic temperature. *J Alloys Compd* 2020;813:152181. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152181>.
- [18] Anantharaman H, Shunmugasamy VC, Strbik OM, Gupta N, Cho K. Dynamic properties of silicon carbide hollow particle filled magnesium alloy (AZ91D) matrix syntactic foams. *Int J Impact Eng* 2015;82:14–24. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.04.008>.
- [19] 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>.
- [20] Kemény A, Pados G, Károly D, Orbulov IN. The Effects of Various Adhesives on Multiple Types of Quasi-Static Mechanical Properties of Rectangular and Square Aluminum Hollow Sections Filled with Composite Metal Foam Cores. *Adv Eng Mater* 2024;26. <https://doi.org/10.1002/adem.202302066>.
- [21] Pados G, Kemény A, Károly D, Orbulov IN. Investigation of the Bending Properties of Ex situ Functional Metal Foams. *Period Polytech Mech Eng* 2024;68:63–9. <https://doi.org/10.3311/PPme.23707>.
- [22] Bitay E. Hegesztési alapismeretek. Erdélyi Múzeum Egyesület- Műszaki Tudományos Füzetek - 16. Kötet; 2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.36242/mtf-16>.
- [23] Rabiei A, Cance J, Chacko Z. A Study on Welding of Porous Metals and Metallic Foams. *Adv Eng Mater* 2024;26:1–26. <https://doi.org/10.1002/adem.202301430>.
- [24] Liang X, Mu Y. Preparation of aluminum foam sandwich with metallurgical bonding using friction stir welding. *Mater Lett* 2024;368:136692.

- <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.136692>.
- [25] Ubertalli G, Ferraris M, Bangash MK. Joining of AL-6016 to Al-foam using Zn-based joining materials. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2017;96:122–8. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.02.019>.
 - [26] Li Z, Zheng Z, Yu J, Qian C, Lu F. Deformation and failure mechanisms of sandwich beams under three-point bending at elevated temperatures. *Compos Struct* 2014;111:285–90. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.005>.
 - [27] Peng P, Wang K, Wang W, Huang L, Qiao K, Che Q, et al. High-performance aluminium foam sandwich prepared through friction stir welding. *Mater Lett* 2019;236:295–8. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.10.125>.
 - [28] Yang S, Luo H, Wang L, Mu Y, Wu L. Effect of core structure on the quasi-static bending behaviors and failure mechanisms of aluminum foam sandwiches at elevated temperatures. *Mater Charact* 2024;208:113638. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113638>.
 - [29] 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. *Mater Lett* 2020;265:127427. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127427>.
 - [30] Wang Z, Hong B, Xian G, Xin M, Huang S, Shen H. Quasi-static and low-velocity impact behaviors of steel-aluminum foam sandwich beams. *Structures* 2024;64:106549. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106549>.
 - [31] Zhang J, Cheng H, Huang X, Sun D. Microstructure and properties of aluminum foam/aluminum sandwich prepared by brazing. *Hanjie Xuebao/Transactions China Weld Inst* 2019;40:144–9. <https://doi.org/10.12073/j.hjxb.2019400223>.
 - [32] Cheneler D, Kennedy AR. Measurement and modelling of the elastic deflection of novel metal syntactic foam composite sandwich structures in 3-point bending. *Compos Struct* 2020;235:111817. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111817>.
 - [33] Rashad AM. Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview. *Constr Build Mater* 2018;170:757–75. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009>.

7. MELLÉKLET

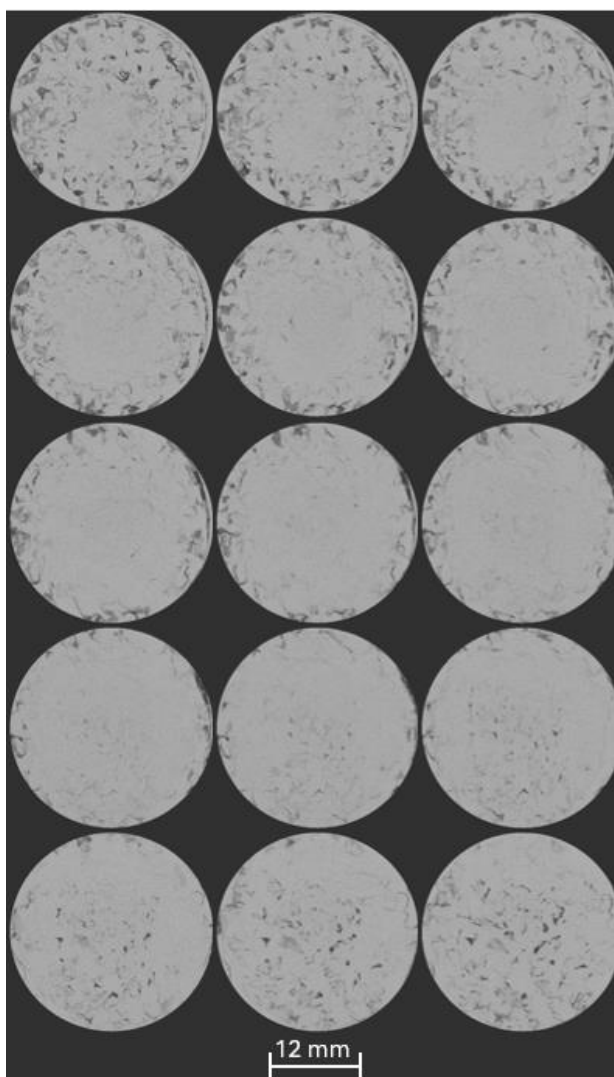
1. Melléklet A forrasztott szendvicsszerkezetek geometriai és tömegmérés eredményei

Próbatestek sorszáma	Hossz (mm)			Átlag hossz (mm)	Szélesség (mm)			Átlag szélesség (mm)	Magasság (mm)			Átlag magasság (mm)	Tömeg (g)	Sűrűség (g/cm ³)
F1	98,61	98,67	98,72	98,67	24,96	24,97	24,98	24,97	16,80	16,59	16,37	16,59	66,9601	1,64
F2	98,58	98,86	98,64	98,69	24,38	24,47	24,55	24,47	17,61	17,59	17,66	17,62	64,6477	1,52
F3	98,07	98,35	98,38	98,27	24,42	25,11	25,02	24,85	18,01	17,71	17,53	17,75	68,8790	1,59
F4	98,69	98,62	98,63	98,65	24,38	24,41	24,30	24,36	17,89	17,91	17,93	17,91	68,7028	1,60
F5	98,62	98,68	98,64	98,65	25,01	24,96	24,88	24,95	17,61	17,59	17,67	17,62	67,5945	1,56

2. Melléklet A dörzshegesztett szerkezetek sűrűsége hőkezelés előtt és után

Próbatestek sorszáma	Tömeg (g)	Hossz (mm)			Átmérő (mm)			Átlag hossz (mm)	Átlag átmérő (mm)	Térfogat (cm ³)	Sűrűség (g/cm ³)
P1 (LECA)	110,4145	133,58	133,77	133,70	25,10	25,02	24,55	133,68	24,89	65,05	1,70
P2 (só)	109,3975	128,31	128,41	128,40	25,02	25,01	24,24	128,37	24,76	61,79	1,77
P1 (T6)	116,0892	133,83	133,89	133,72	25,07	25,10	25,04	133,81	25,07	66,05	1,76
P2 (T6)	113,3765	128,36	128,27	128,42	25,24	24,38	25,27	128,35	24,96	62,82	1,80

3. Melléklet N1-es próbatest kötésének CT vizsgálati képei, rétegenként fotózva



4. Melléklet A hőkezeletlen, illetve a hőkezelt P3-as próbatest keresztmetszetének Vickers-keménységértékei

Felvett referenciaponttól mért távolság (mm)	LECA hőkezeletlen			LECA hőkezelt		
	Cső keménysége (HV0,2)	Mátrix keménysége (HV0,2)	Varrat keménysége (HV0,2)	Cső keménysége (HV0,2)	Mátrix keménysége (HV0,2)	Varrat keménysége (HV0,2)
0,5	46,4	74,7	69,2	58,4	67,4	66,0
1	57,2	73,6	63,7	60,4	63,8	65,9
1,5	58,0	73,2	72,7	61,0	66,9	66,2
2	56,5	74,7	70,7	59,7	69,8	67,4
2,5	54,5	74,1	69,7	61,0	68,0	66,5
Átlag	54,5	74,1	69,2	60,1	67,2	66,4
Szórás	4,2	0,6	3,0	1,0	2,0	0,5