

Miskolci Egyetem
Műszaki Anyagtudományi Kar
Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet
Fémteni és Képlékenyalakítási Intézeti Tanszék



Alumíniumhabok hőkezelése

TDK dolgozat

Készítette: Szemán Melinda

BSc IV. évf. MA402

Konzulens: Dr. Babcsán Norbert

Technológiai igazgató, Aluinvent Zrt.

Miskolc, 2014

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Szakirodalmi összefoglaló	3
2.1 Alumínium ötvözetek csoportosítása	3
2.2 Alumíniumhabok és előállításuk	6
2.2.1 Alumíniumhab gyártása az olvadék közvetlen habosításával	7
2.2.2 Porkohászati eljárások.....	9
2.3 Alumíniumhabok szerkezeti és mechanikai tulajdonságai	10
2.4 Alumínium, alumínium mátrixú kompozitok és alumíniumhabok hőkezelése.....	13
2.4.1 Alumíniumötvözetek hőkezelése.....	13
2.4.2 Alumínium mátrixú kompozitok hőkezelése	16
2.4.3 Alumíniumhabok hőkezelése	18
3. Vizsgálati anyagok, kísérleti és vizsgálati módszerek.....	20
3.1 Felhasznált anyagok	20
3.1.1 Alumíniumötvözet	20
3.1.2 Alumínium mátrixú kompozit.....	21
3.1.3 Alumíniumhabok.....	22
3.2 Vizsgálati módszerek.....	23
3.2.1 Keménységmérés	23
3.2.2 Nyomóvizsgálat.....	24
3.3 Hőkezelési módszer	26
3.3.1 Kompozitalapanyag nemesítése.....	26
3.3.2 Kiválasztott habok hőkezelése.....	27
4. Kísérleti eredmények.....	28
4.1 Keménységmérési eredmények.....	28
4.2 Nyomóvizsgálati eredmények	30
5. Diszkusszió.....	32
6. Összefoglalás	34
Felhasznált irodalom.....	35

1. Bevezetés

A mesterséges szilárd habok régóta az anyagtudományi kísérletek fókuszába tartoznak kedvező tulajdonságaik miatt, a fémhabok mégis viszonylag új típusai a szerkezeti anyagoknak így a lehetséges alkalmazási területek kiaknázása még folyamatban van. Jelenlegi legfontosabb alkalmazásai az energiaelnyelő és az építőipari dekoratív elemek, de az autó- és űripár számára is készültek már prototípusok.

A felmerülő alkalmazási lehetőségek vizsgálata során a legfőbb kiválasztási szempont az anyag mechanikai tulajdonsága, mely javítására, változtatására több lehetőség adott, mint például a hab sűrűségének, morfológiájának, alapanyagának változtatása. A hab alapanyagától függően azonban lehetőségünk van hőkezeléssel javítani a szerkezet mechanikai tulajdonságain.

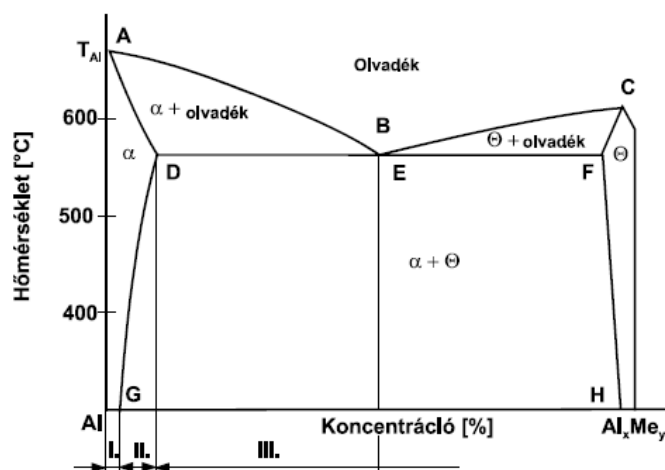
Az elmúlt években számos publikáció született fémhabok területén, azonban igen kevés az az irodalom, mely ezen anyagok hőkezelésével foglalkozik. A csekély mértékű ismeretből adódóan fontos foglalkozni a hőkezelés megvalósíthatóságának problémakörével, az elérhető szilárdságnövekedés mértékével, a fémhabok hőkezelési technológiájának eltéréseivel a tömbanyaguktól.

Tudományos diákköri kutatásom elsődleges célkitűzése egy adott összetételű és struktúrájú alumíniumhab hőkezelési folyamatának előzetes megtervezése, a hőkezelés során felmerülő problémák feltérképezése, a hőkezelés hatásának ellenőrzésére való lehetséges mérési módszerek alkalmazhatóságának vizsgálata, illetve a tömbanyag hőkezelési technológiájának eltérése volt.

2. Szakirodalmi összefoglaló

2.1 Alumínium ötvözetek csoportosítása

Az ötvözetek csoportosítása többféle módon történhet. Lehetséges az ötvözők minősége alapján, például alumínium – lítium, alumínium – cink, alumínium – magnézium stb. ötvözetek. Csoportosíthatóak az ötvözők mennyisége – így az ötvözet tulajdonságai alapján. Felhasználás szempontjából két nagy csoport létezik: az öntészeti alumíniumötvözetek és az alakítható ötvözetek. Ezen két csoport további felosztása főként a korábbi szempontok – ötvözetek minősége, mennyisége – és a kialakuló mechanikai tulajdonságok alapján történik. Az alumínium ötvözőivel alakított fázisdiagramja alapján pedig három csoportot különíthető el.



1. ábra. Alumínium ötvözőivel alkotott általános fázisdiagram

Az 1. ábrán látható fázis diagram tartományai a következők:

- I. tartomány: alakítható ötvözetek egyik csoportja. Szobahőmérsékleten α szilárd oldat van jelen, azaz teljesen homogén a szerkezet. Ezen ötvözetek alakítással keményíthetők, hőkezeléssel nem.
- II. tartomány: alakítható és nemesíthető ötvözetek. Az oldott ötvözők mennyisége a hőmérséklettől függ, így hőkezeléssel változtathatjuk az ötvözetek mechanikai tulajdonságait.
- III. tartomány: nagyobb ötvöző tartalommal rendelkező, heterogén, öntészeti ötvözetek.

Az első két tartomány ötvözeteit, azaz az alakítható ötvözeteket a szabványos jelölésekben nyolc csoportra osztják. A csoportok jelölése négy számmal történik, melynek első tagja a csoportot jelöli egytől nyolcig, a többi szám ötvözetspecifikus. A számok előtt betűjelek

adják meg a szabvány típusát. Az amerikai szabvány AA (Aluminium Association), az európai EN AW (European Aluminium Wrought) betűket alkalmaz. A számozás a két esetben megegyezik, mivel az európai jelölés az amerikai alapján alakult ki. A nyolc csoport főbb ötvözőit az 1. táblázat mutatja:

1. táblázat. Alumíniumötvözetek jelölése

Ötvözetcsoporthoz tartozó jelölés	Ötvözőelemek
1xxx	Színalumínium, Al>99,0%
2xxx	Réz
3xxx	Mangán
4xxx	Szilícium
5xxx	Magnézium
6xxx	Magnézium, szilícium
7xxx	Cink
8xxx	Egyéb elemek

- 1xxx: különböző tisztaságú színalumíniumok, melyeket főként a csomagolóipar és az elektronikai ipar hasznosít. Alakítással keményíthetők.
- 2xxx: rézzel ötvözött, nemesíthető, nagy melegszilárdságú ötvözetek. Főként a repülőgép- és autóiparban használatosak.
- 3xxx: mangánnal ötvözött, nem hőkezelhető ötvözetek, de a szilárdságuk 20%-al jobb, mint az 1xxx csoport tagjaié. Olyan helyen alkalmazzák, ahol fontos a jó alakíthatóság.
- 4xxx: a fő ötvözőelem a szilícium, hegesztőpálcaként, alumíniumok forrasztására alkalmazzák, mivel széles tartományban állítható az olvadáspontjuk.
- 5xxx: jól hegeszthető, jó korróziós tulajdonságokkal rendelkező (tengervízben is), közepesen jobb szilárdságú, jól alakítható ötvözetek.
- 6xxx: magnézium- és szilíciumtartalmú, hőkezelhető ötvözetek. Nincs olyan jó szilárdsága, mint a 2xxx és 7xxx ötvözeteknek, de jól alakítható, hegeszthető, forgácsolható, jó a korrózióállósága közepes szilárdsági tulajdonságai mellett. Felhasználása széleskörű: építészeti célokra pl. hidak, kerékpárvázak, szállítóeszközök, hegesztett szerkezetek alapja.
- 7xxx: cinkötvöztetésű alumínium, melyekben, ha megjelenik a magnézium is, hőkezelés segítségével magas szilárdsági tulajdonságok érhetőek el, ennek köszönhetően repülőgépek szerkezetéhez illetve erősen igénybevett szerkezetekben.

- 8xxx: olyan ötvöző tartalmú – pl. lítium – ötvözetek, melyeket nem tudtak besorolni a többi csoportba. [1][2]

Munkám során a 6xxx csoport egyik tagjával, a 6061-es ötvözetrel foglalkoztam, így a továbbiakban ennek tulajdonságait részletezem.

Az ötvözetben magnézium és szilícium mellett réz is jelentős mennyiségben van jelen. Az ISO jelölése az ötvözetnek: AlMg1SiCu. Likvidusz hőmérséklete 652°C, szolidusza 582°C. Sűrűsége 2,70 g/cm³.

Az iparban elterjedt ötvözet kedvező tulajdonságai miatt.

- Közepes szilárdságú, nemesíthető,
- jól hegeszthető, forgácsolható,
- nagyon jól alakítható, melegkovácsolásra alkalmas,
- jó a korrózióállósága.

Alkalmazásaira példák:

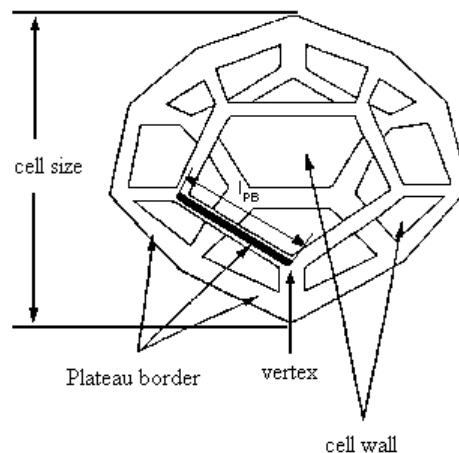
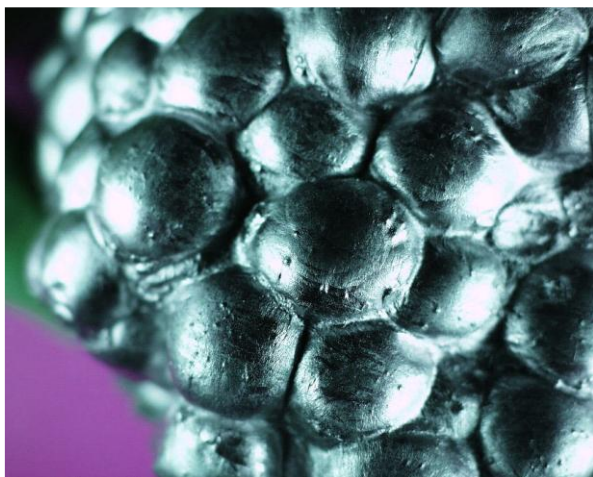
- Repülőgépiparban például a szárnyakhoz, géptörzshöz a korrózióállósága miatt,
- ugyanezen okból jachtok gyártásához,
- gépjármű alkatrészek,
- az élelmiszeriparban csomagolóeszközként (konzervdobozok),
- biciklivázak
- ultranagy vákuumkamrák kialakításánál, stb.

Az ötvözet kedvező tulajdonságai mellett kiválóan alkalmazható habosításra, így az egyik legtöbbet tanulmányozott ötvözet alumíniumhab gyártás tekintetében. Nem utolsósorban, az iparban való népszerűségéből adódóan könnyen hozzáférhető, olcsón beszerezhető alumíniumtípus.

2.2 Alumíniumhabok és előállításuk

A habok meghatározására több definíció is létezik. Hab az az anyag, melynek pórustartalma legalább 50%, és ezek a gázzal telt üregek az anyagon belül egyenletesen eloszlaltva vannak jelen. Másik megfogalmazás szerint: fémhab minden olyan cellás fémes anyag, ami habosítási technológiával állítható elő.

Az alumíniumhab egy fához vagy csonthoz hasonló, cellás szerkezetű anyag, de a fémes struktúrájának köszönhetően nagyobb szilárdsággal rendelkezik.



2. ábra. Alumíniumhab és a cellájának struktúrája

Szerkezetileg két nagy csoport különböztethető meg: a zárt és a nyílt cellás habok. Előbbiek tulajdonképpen csak a vázszerkezetükből állnak, teljesen átjárhatók. Ilyen anyagok leginkább szűrőként alkalmazhatóak. A zárt habokban a pórusokat összefüggő fal veszi körül, elválasztva őket egymástól. Ebből adódóan kiváló energiaelnyelő és szigetelő tulajdonságokkal rendelkeznek, szerkezeti elemként alkalmazhatóak.

Mivel az utóbbi típusú alumíniumhabokat vizsgáltam, így ezek gyártását részletezem a következőkben.

Jelenleg ötféle eljárást alkalmaznak zárt cellás habok előállítására, melyeket különböző szempontok alapján lehet megkülönböztetni. Ezeket a 2. táblázat mutatja be.

2. táblázat. Gyártási eljárások összefoglalása

Alumíniumhabok gyártása					
<i>Habképzés</i>	<i>Közvetlen olvadék habosítás</i>			<i>Porkohászati prekursor habosítás</i>	
Stabilizálás	Nem oldódó részecske	Nem oldódó részecske	Viszkózitás (semiszolid)	Oxidhártya	Oxidhártya
Gáz forrása	Gázinjektálás	TiH ₂	Oldott hidrogén	TiH ₂	Abszorbált víz
Eljárás típusneve	Alcan	Alporas	Gasar	Alulight	TU Berlin

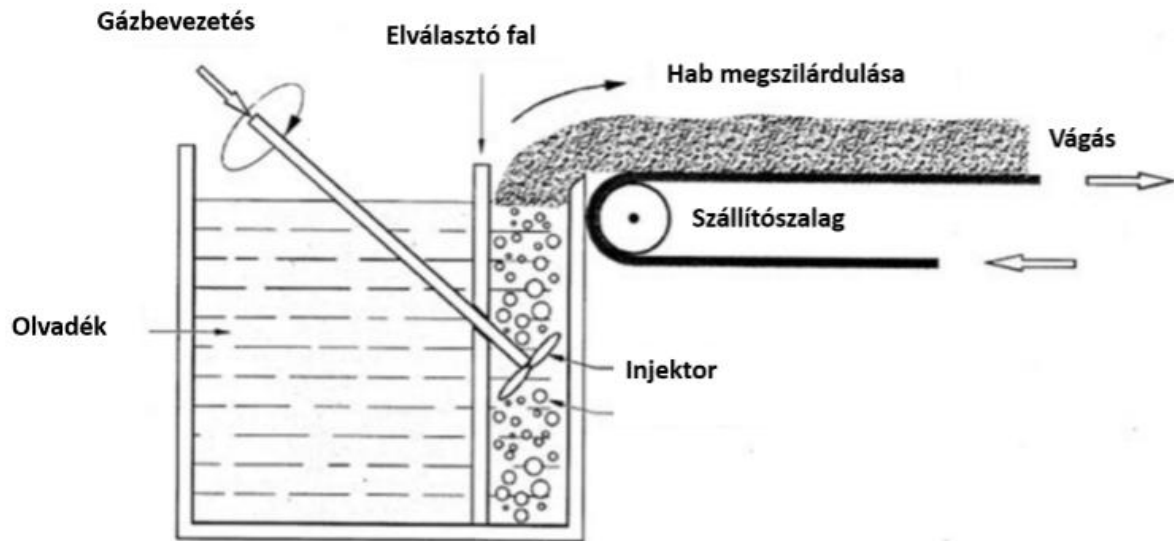
Természetes, hogy az előállítás típusa nagymértékben meghatározza a keletkező hab szerkezeti – ezáltal pedig mechanikai – tulajdonságait, így a következőkben a különböző gyártástechnológiákat részletezem két csoportra bontva: az olvadék közvetlen habosításával járó előállítási módszereket, illetve a porkohászati módszereket.

2.2.1 Alumíniumhab gyártása az olvadék közvetlen habosításával

Három fő típust különböztetünk meg, melyek nevüket az első ily módon gyártó társulatról kapták. A három módszer közös vonása, hogy a habosítás olvadék állapotban történik.

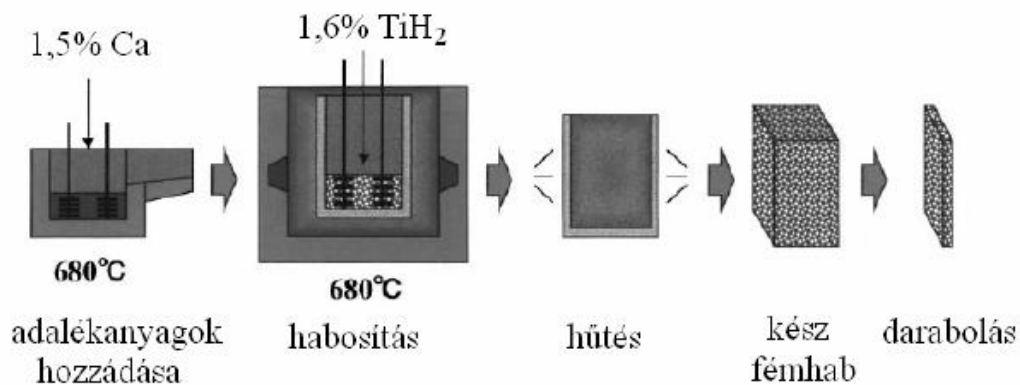
Az Alcan típusú eljárás során az alapötvözetet megolvasztják, majd az olvadékhoz szemcsés erősítő fázist kevernek, mely lehet SiC vagy Al₂O₃. Ennek a feladata, hogy növelje az olvadék viszkozitását, valamint stabilizálja a kialakuló habszerkezetet. Az elkészült olvadékot gázinjektálással habosítják, azaz egy fúvóka vagy forgólapát segítségével gázt juttatnak az olvadékba apró buborékok formájában. A kompozithab a felszínre emelkedik, innen pedig egy szállítószalag segítségével kiemelik. A hab a szállítószalagon megszilárdul, és kerül további feldolgozásra. A módszer előnye, hogy folyamatosan gyártható vele fémhab, hátránya a nehezebb megmunkálhatóság az alkalmazott erősítőfázis miatt. Az eljárást jelenleg a kanadai Cymat Technologies Ltd. és a magyarországi Aluinvent Zrt. alkalmazza.

Az általam vizsgált alumíniumhabok ezzel az eljárással készültek az utóbbi cégnél. A módszer vázlata a 3. ábrán látható.



3. ábra. Stabilizáló szemcséket tartalmazó olvadék gázinjektálásos habosítása

Ettől a gáz forrásában, illetve a stabilizáló szemcsék minőségében tér el az ún. Alporas eljárás. Az alapanyag olvadékához itt kalciumot kevernek, mely arra szolgáltatott, hogy növeltje a viszkozitást. Ezt követően – megfelelő viszkozitás elérése után – titán-hidrid port adagolnak az olvadékhoz, mely termikusan bomlik, és az így keletkező hidrogéngáz fújja fel a fémeket. Ezt a technológiát napjainkban a dél-koreai AnyFoam Cemitech Co. használja gyártásra, melynek lépései a 4. ábrán láthatóak.



4. ábra. Alporas habgyártás vázlata [7]

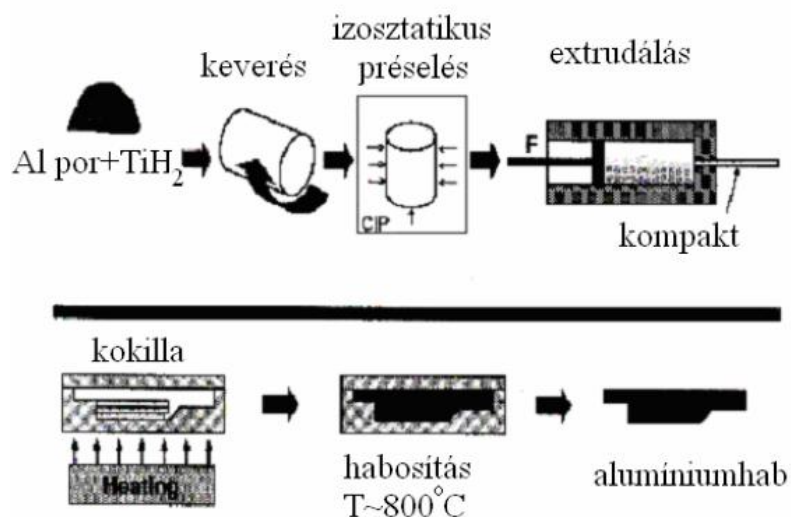
A Gasar eljárás ma már ritkább, mert kevésbé megbízható, mint az előbbi két módszer, hisz a stabilizálás kizárólag az olvadék viszkozitásának – habosítás hőmérsékletének – beállításával történik. A habosító elem itt az olvadékban oldott hidrogéngáz.

2.2.2 Porkohászati eljárások

A habosítható anyag elkészítése porkohászati úton történik, majd ezt melegítik, mely során a hozzáadott különböző vegyületekből adódóan felhabosodik az anyag.

Az ilyen eljárások fő képviselője az ECKA Granules Germany GmbH, mely Alulight termékeket gyárt. A folyamat első lépéseként alumíniumötvözetet és titán-hidridet por alakban összekevernek, majd extrudálással, izosztatikus préseléssel vagy hengerléssel tömörítik a keveréket a kívánt alakra. Ezt az anyagot hevítik kokillában, ahol az Alcan eljáráshoz hasonlóan a habosítást a TiH_2 bomlásából felszabaduló hidrogéngáz végzi az olvadt fémben. A hab stabilizálása az alumínium oxidhártyájának köszönhető, melyet a tömörítés során összetörnek, így megfelelő kis méretben oszlik el az olvadékban. Az eljárás előnye, hogy bonyolult alakú fémhabok is készíthetőek, azonban a mechanikai tulajdonságok reprodukálhatósága alacsony, ugyanis a folyamat nehezen szabályozható.

A módszer elvi ábrája az 5. ábrán látható. [5][7]



5. ábra. Alulight eljárás lépései [7]

2.3 Alumíniumhabok szerkezeti és mechanikai tulajdonságai

A fémhabok tulajdonságai – szerkezetüktől függően – igen széles skálán mozoghatnak, kivéve azon tulajdonságok, melyek kizárólag az alapanyagtól függenek, mint például a kristályszerkezet, hőtágulási együttható, olvadáspont stb. Egyéb fizikai tulajdonságok, mint például a hőkapacitás lineáris összefüggésben áll a sűrűséggel. (Ennek oka, hogy még az alacsony sűrűségű habok esetén is igen kicsiny a bezárt gáz tömege, így nem kell figyelembe venni a hőkapacitását.)

A legtöbb tulajdonság azonban nem csak a sűrűségtől és az alapfém tulajdonságaitól függ, hanem a hab felépítésétől, makroszerkezetétől is. Ilyen a keménység, nyomószilárdság, elektromos- és hővezetés, de ilyen módon változnak az akusztikai tulajdonságok is.

Összefoglalva a fémhabok tulajdonságait az alábbi paraméterek befolyásolják (fontossági sorrendben):

- az alapanyag tulajdonságai,
- relatív sűrűség,
- habszerkezet típusa (nyílt-, zártcellás),
- a habszerkezeten belül a szilárd anyag eloszlása a cellák csomópontjaiban, éleiben és falaiban,
- az átlagsűrűség változása a nagyobb mintán belül,
- cellaméret és méreteloszlása (beleértve a hibának tekinthető, kivételesen nagy, egyedi cellákat is),
- cellák alakja és anizotrópiája (habtextúra),
- cellaélek folytonossága,
- hibák, amelyek a deformálódott, megrogyott, eltört cellafalakból adódnak. [5][6]

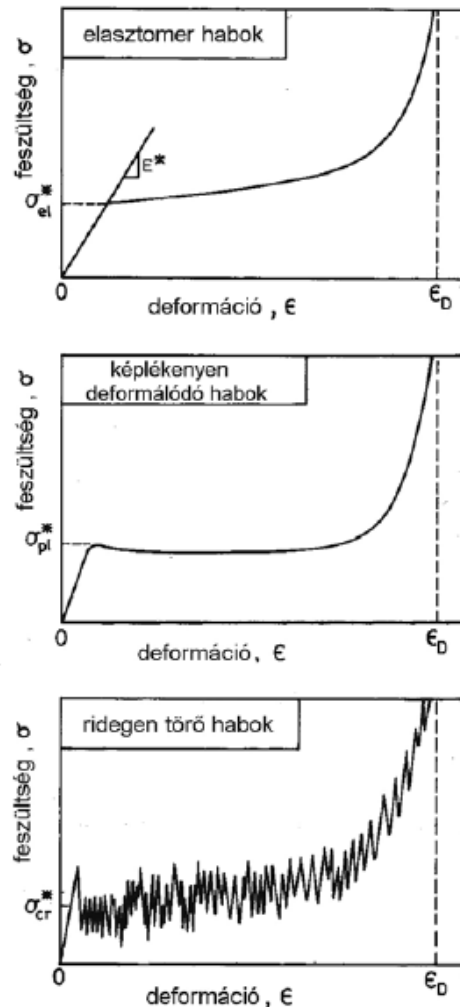
A felsorolásból látható, hogy az alapanyag tulajdonságai elsődleges fontosságúak, a tömbanyag térfogata meghatározó paraméter a kialakuló mechanikai tulajdonságok szempontjából. Ebből következik, hogy a habok jellemzésének legfontosabb eszköze a relatív sűrűség, mely megmutatja, hány százaléka a hab sűrűsége a tömbanyag sűrűségének.

A habstruktúra jellemzése tehát a relatív sűrűség, átlagos cellaméret, cellaméret eloszlás megadásával történik.

Jelen dolgozatban az alumíniumhabok mechanikai tulajdonságait nyomóvizsgálatok végrehajtásával vizsgáltam, így a továbbiakban a vizsgálat során lejátszódó folyamatok habszerkezetből adódó jellegzetességeit részletezem.

A nyomóvizsgálat eredményeként kapott nyomószilárdság – alakváltozás görbe egy jellegzetes típusait mutatja be a 6. ábra. A jellemző szakaszok mindhárom esetben megegyeznek:

- kvázi-lineáris,
- plató,
- tömörödési vagy denzifikációs szakasz.



6. ábra. Különböző viselkedésű fémhabok nyomógörbéi [7]

Az első szakaszban a hab rugalmas alakváltozása következik be, kis terhelés esetén. Hogy mekkora terhelésig viselkedik így az anyag, a szakasz adataiból számítható rugalmassági modulus jellemzi.

A második szakasz csaknem párhuzamos az x tengellyel, azaz az alakváltozás mértéke jelentősen növekszik, a feszültség azonban nem, vagy csak alig. Ez a szakaszt tér el leginkább a tömbanyagokétól, ugyanis, míg azok esetében az anyag teljes egészében deformálódik, itt ez a gyenge, túlterhelt cellákban megy végbe. További terhelés hatására ez a deformáció

továbbterjed a közeli cellákra, egészen addig, amíg össze nem roppannak. Így jut el az anyag a harmadik szakaszba, ahol az összeroppant cellák tovább tömörödnek, ez a diagramokon a feszültség – előző szakaszhoz képest – meredek emelkedésével jelenik meg.

A 6. ábra alapján látható, hogy háromféle cellás szerkezet különböztethető meg:

- elasztomer,
- képlékenyen alakváltozó,
- ridegen törő habokét.

Elasztomer habok esetén a plató szakaszban a cellafalak rugalmas kihajlása (reverzibilis) megy végbe. Képlékeny alakváltozó szerkezet esetén a cellaélek találkozásánál plasztikus csomópontok jönnek létre. A ridegen törő habok esetében pedig a cellák tönkremenetele közben a cellaszerkezet ridegtörése következik be. [7]

Az általam vizsgált cellás szerkezetű anyagok képlékeny alakváltozó szerkezetet mutattak. A felvett nyomószilárdság – alakváltozás görbéjük az Eredmények (4.) fejezet Nyomószilárdsági eredmények (4.2) alpontjában láthatóak.

2.4 Alumínium, alumínium mátrixú kompozitok és alumíniumhabok hőkezelése

Alumíniumok hőkezelésére céltól függően több eljárás létezik, például képlékenyalakítás lépései között alkalmazzák a lágyítást, mely során a szilárdsági tulajdonságokat csökkentik, hogy lehetővé tegyék a további alakítást. Kutatásom célja azonban a mechanikai tulajdonságok javítása volt, mely nemesítő hőkezeléssel érhető el. A folyamat lépéseit a 2.4.1 fejezetben részletezem.

A munkám során olyan alumíniumhabok hőkezelése volt a cél, melyek anyaga adott alumíniumötvözetből és a benne diszpergált alumínium-oxid részecskékből áll, azaz egy alumínium mátrixú kompozit. A folyamat lépcsőinek meghatározása során – mivel konkrét alumíniumhabok hőkezelésére nincs kidolgozott eljárás – a kiindulási pont az alapötvözet hőkezelési adatai voltak. Emellett vizsgáltam a kompozit hőkezelési módszerét is, így a kísérleteket mind habokon, mind az adott hab tömbanyagán elvégeztem, majd az eltéréseket, annak okait vizsgáltam.

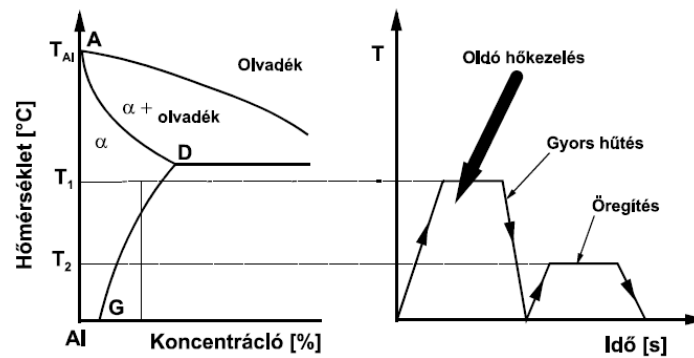
2.4.1 Alumíniumötvözetek hőkezelése

A nemesítő hőkezelés célja a mechanikai tulajdonságok javítása apró kiválások létrehozásával az alapmátrixban, melyek akadályozzák a diszlokációk mozgását. Három fő lépésből áll:

- homogenizálás / oldó hőkezelés: célja az egységes szövetszerkezet létrehozása, a meglévő kiválások (ötvözők) feloldása,
- edzés: gyors hűtés alkalmazásával a homogén szövetszerkezet megőrzése, kiválások idő előtti megjelenésének megakadályozása,
- megeresztés / öregítés: kiválások szabályozott körülmények között történő létrehozása.

Homogenizálás

A cél az ötvözők teljes mértékű feloldása, homogén szövetszerkezet létrehozása. Ez úgy érhető el, ha az anyagot olyan hőmérsékletre hevítik, ahol – fázisdiagram alapján – szilárd oldatot képez az ötvözőivel. Ez azt a tartományt jelenti, mely a szolvusz görbe felé esik, de az eutektikus hőmérséklet alatt marad 5-10°C-kal a helyi megolvadások elkerülésének érdekében.



7. ábra. Nemesítés folyamatának sematikus ábrája

Figyelembe kell venni azt is, hogy a homogenizálás hőmérsékletének függvényében a tulajdonságok maximumos görbe szerint változnak. Ennek oka a fokozódó oldódás, szemcsedurulás, illetve az esetleges helyi megolvadások megjelenése. A szemcsenagyságot befolyásolja a hevítés sebessége, így ajánlatos a gyorsítása.

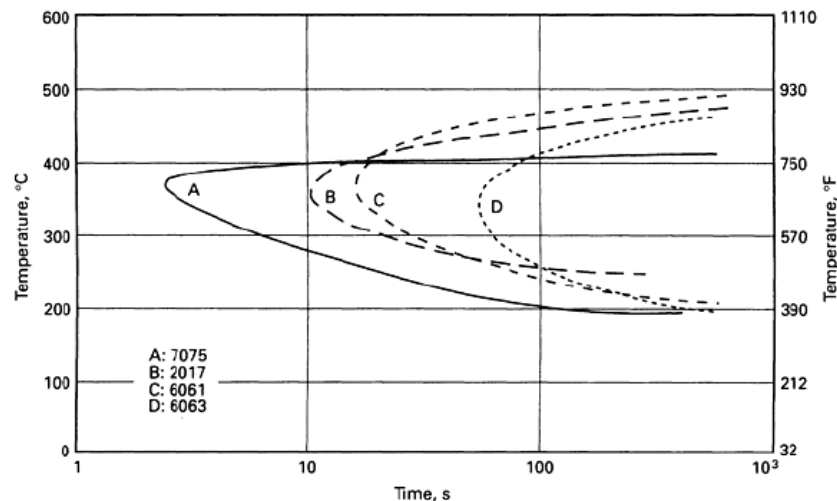
Az oldó hőkezelés ideje függ a darab méretétől illetve az anyagban végbemenő diffúziós folyamatoktól is – az anyag tulajdonságaitól.

Edzés

Edzéskor a darabot olyan gyorsan hűtik, hogy ne hagyjanak időt az ötvöző atomoknak a potenciális nukleációs helyekre diffundálni, így nem indul meg a kiválás. Eredményül egy túltelített szilárd oldat keletkezik, ami a megeresztési folyamat optimális kiindulási szerkezete.

A kiválások legnagyobb valószínűséggel egy ún. kritikus hőmérsékletközben jelennek meg, így itt kell biztosítani a legnagyobb hűtési sebességet. (Ez a legtöbb alumíniumra 400 – 290°C közötti tartomány.) A szükséges magas hűtési sebességből adódóan vízben való hűtéssel lehet a legjobb tulajdonságokat elérni.

A hűtés kritériumait az ötvözetre vonatkozó izotermás átalakulási görbék jellege alapján határozzák meg. Ezek mutatják meg, hogy adott hőmérsékleten mennyi idő alatt indul el a kiválások megjelenése, azaz mennyire érzékeny az adott anyag a hűtési sebességre. A vizsgált ötvözet átalakulási görbéje a 8. ábrán látható. Ha összehasonlítjuk a 6061-es (C) és a 7075-ös (A) ötvözetek átalakulási görbéit, látható, hogy utóbbi lényegesen érzékenyebb a hűtési sebességre. A szakirodalomban található edzésre vonatkozó adatok és a görbe alapján a homogenizált darabnak teljes térfogatában el kell merülnie a vízben, mielőtt elérné a 400°C-ot, míg 6061-es ötvözetre nincs ilyen kitétel, a kiválások megindulásához lényegesen hosszabb idő kell.

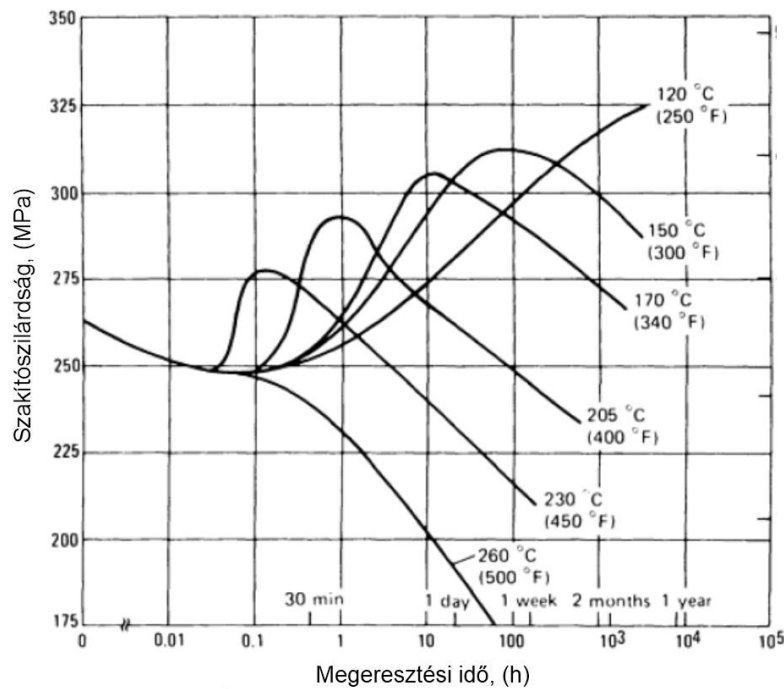


8. ábra. 6061 (C) és egyéb ötvözetek izotermás átalakulási görbéi [8]

Megeresztés

A nemesítés utolsó lépése a megeresztés, mely során létrejönnek az anyag szilárdsági tulajdonságait javító, apró kiválások. Egyes ötvözetekben ez a folyamat már szobahőmérsékleten is megindul és 1-2 hét alatt végbe is megy, de hőmérséklet emelésével ez órákra csökken. Ennek megfelelően alkalmaznak természetes és mesterséges öregítést. Előbbi jelölése T6, utóbbié T4 az anyag hőkezelt állapotára vonatkozó adatok megadása során.

Természetes öregítés esetén edzés után a darabokat meghatározott ideig „pihentetik”, ez az idő általában 1-2 nap, vagy akár hét. Mesterséges öregítés során a darabok újra kemencébe kerülnek, és megadott hőmérsékleten hőtartják őket. A kiválások megjelenése, a kívánt keménység elérése így órák alatt végbemegy. Ezen okokból kifolyólag mesterséges öregítést választottam a darabokhoz. Ez egy alacsony hőmérsékletű, hosszabb idejű hőkezelési folyamat. A tulajdonságok maximumosan változnak az idő függvényében, különböző hőmérsékleten eltérő maximumértékekkel. A 6061-es ötvözet öregítési görbéi a 9. ábrán láthatóak. A diagram a hőmérséklet és idő függvényében mutatja a szakítószilárdság változását. Ebből látható, hogy mely hőmérsékleten érhető el nagyobb érték, de figyelembe kell venni az ehhez szükséges időtartam nagyságát is. Magasabb hőmérsékleten hamarabb éri el a maximális szakítószilárdságot, de ez elmarad attól az értéktől, mely alacsonyabb hőmérsékletű megeresztés alkalmazásával érhető el. [1][8]



9. ábra. 6061-es ötvözet szakítószilárdságának változása [8]

2.4.2 Alumínium mátrixú kompozitok hőkezelése

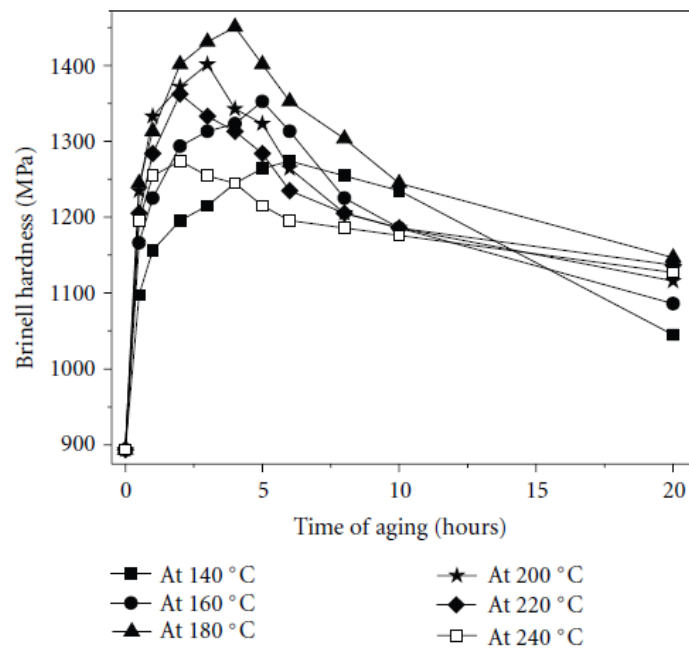
Az általam vizsgálat alumíniumhabok az Alcan típusú eljárás alapján készülnek, azaz az olvadékban kerámiaszemcsék, pontosabban alumínium-oxid szemcsék vannak diszpergálva. Ezen okból kifolyólag kompozithabról beszélhetünk, fontos tehát vizsgálni az alumínium mátrixú kompozitok hőkezelésével kapcsolatos kritériumokat, eltéréseket.

Munkám során, mint korábban említettem, alumíniumhabokat és kompozitokat is hőkezelttem. A szakirodalmi kutatás során olyan publikációkat is vizsgáltam, melyek azonos mátrixú kompozitok hőkezelésével foglalkoznak.

A 10. ábrán egy 6061 mátrixú, 15% SiC tartalmú ötvözet különböző hőmérsékleteken és időtartamú megeresztések utáni keménységmérési eredményeinek összefoglaló diagramja.

A [9] szócikket a megeresztési mátrix meghatározása során használtam fel.

A cikkben tehát 140°C, 160°C, 180°C, 200°C, 220°C és 240°C-on történtek a megeresztések, a vizsgált időtartamok pedig: fél óra, majd egytől hatig óránként, nyolc óra, valamint tíz és húsz óra után.



10. ábra. Keménység – idő diagram különböző megeresztési hőmérsékletek esetén [9]

A diagram alapján látható, hogy 140 és 240°C számottevő keménységnövekedés nem tapasztalható, illetve, hogy a maximális szilárdságot 180°C-on 4 óra után érték el. [9]

A homogenizálás vizsgálata során a [10] irodalom volt segítségemre, melyben az erősítő fázis megegyezik az általam vizsgált kompozitával, azaz Al_2O_3 szemcséket használtak. Az általuk meghatározott oldó hőkezelési hőmérséklet megegyezik a mátrix oldó hőkezelési hőmérsékletével (530°C), az időtartam pedig 6 óra. Ettől a későbbiekben kis mértékben tért el az általam végrehajtott hőkezelési módszer.

2.4.3 Alumíniumhabok hőkezelése

A témában igen csekély számú irodalom született eddig, annak ellenére, hogy kiváló módja lehet az alumíniumhabok szilárdságának növelésére.

Az alapanyag hőkezelési technológiája nem alkalmazható közvetlenül a belőle készült habszerkezetre a következő eltérésekből, szerkezeti tulajdonságokból kifolyólag:

- A jelenlévő oxidok befolyásolhatják a homogenizálás közben lejátszódó folyamatokat.
- A habok hővezetési együtthatója egy nagyságrenddel kisebb, mint a tömbanyagé, ezt figyelembe kell venni mind a homogenizálás mind pedig az edzés során.
- A vízben való edzés problémás lehet zárt cellájú habok esetén. A kis sűrűségű habok nem süllyednek le a vízbe. Másrészt, az esetleges repedéseken keresztül befolyhat a víz edzés közben a habszerkezet belsejébe. A hirtelen lehűlés 530°C -ról 20°C -ra ronthatja a helyzetet.
- A cellába belépő víz befolyásolhatja hűlési metódust edzés közben. [11]

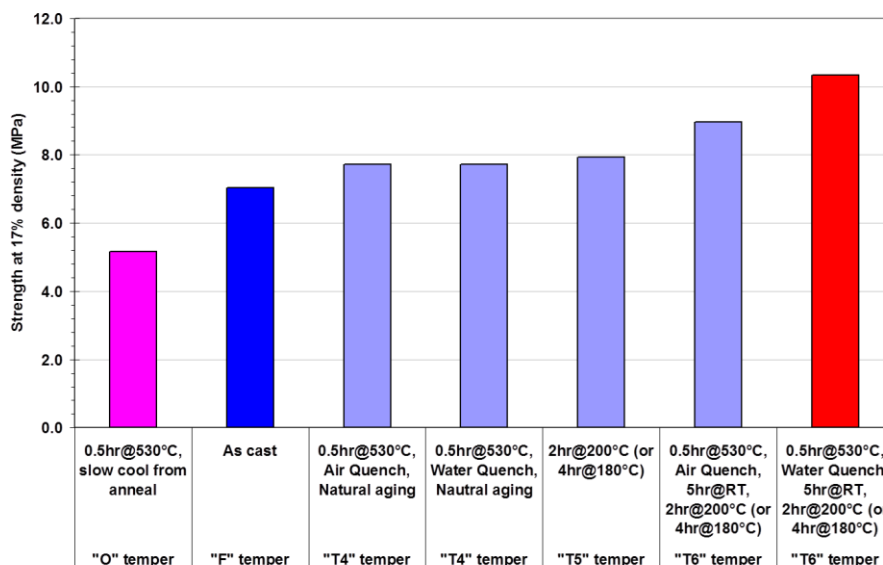
Ezen befolyásoló tényezőket figyelembe kell venni a hőkezelési folyamat tervezése során. Az első teljes nemesítés végrehajtásával megfigyeltem a lehetséges hibaforrásokat, azokat a folyamatokat, melyek esetleg különleges eszközöket vagy technikát igényelnek, illetve melyek lényegesen eltérnek a tömbanyagok hőkezelési folyamataitól.

A kísérletek előkészülete során fontos megvizsgálni a várható szilárdságnövekedési értékeket, ennek keretein belül pedig az elérni kívánt célt. Ez több publikált kísérleti eredmény alapján történt.

A 11. ábra egy Alcoa típusú, 17%-os relatív sűrűségű alumíniumhab elérhető szilárdságváltozásait mutatja a különböző hőkezelési eljárások esetén [12]. A hab alapanyagának összetétele eltérő az általam vizsgált alapanyagétól, de megfelelő alapot nyújt a kísérleti célok meghatározásához.

Az ábrán „As cast” felirattal látható az öntött hab szilárdsági tulajdonsága, viszonyítási alapként. Az O jelölésű oszlopban a lágyított állapotú hab látható, mely 25%-os csökkenést mutat.

A T4 hőkezelés esetén kétféle hűtési módszert alkalmaztak – levegő és víz hűtést. Ezek 10-15%-os szilárdságnövekedést idéztek elő. A T6 típusú hőkezelés esetén szintén kétféle módon hűtötték a homogenizált darabokat, majd a megeresztés egy 200°C -on 2 órán keresztül tartó és egy 180°C -os 4 órás hőntartásból állt.



11. ábra Alcoa alumíniumhab szilárdságának változása
különböző hőkezelési eljárások hatására [12]

A legjobb eredményt – ahogy az ábrából is látható – azon hőkezeléssel érték el, mely során vízben való edzést és mesterséges öregítést alkalmaztak. Eredményül 50%-os szilárdságnövekedés tapasztalható. [12]

Ezen eredmények alapján az elsődleges cél a habok nyomószilárdságának 50%-al való növelése volt.

3. Vizsgálati anyagok, kísérleti és vizsgálati módszerek

A kísérletek célja a hőkezelési metódus meghatározása adott összetételű alumíniumötvözetből készült alumíniumhabokra. Ennek kivitelezésére első lépésben a hőkezelés hatásának ellenőrzésére szolgáló mérési módszerek kerültek kiválasztásra. Az alumíniumhabok esetén ez a nyomóvizsgálat volt, a tömbanyagok esetén pedig a keménységmérés.

Ezt követően szakirodalom alapján meghatározásra került egy általános hőkezelési technológia a felhasznált alumíniumötvözet alapján, mely az elvégzett hőkezelések eredményei alapján módosult.

3.1 Felhasznált anyagok

A kísérletek során a gyártáshoz kapcsolódó anyagok mindegyikét vizsgáltam. A kiinduló ötvözet a habosítás során a már említett EN AW6061, melyhez alumínium-oxid szemcséket adagolva készítik el a kompozitot, ami a habgyártás alapanyaga.

3.1.1 Alumíniumötvözet

Az EN AW6061-es alumíniumötvözet összetételét a 3. táblázat mutatja.

3. táblázat. EN-AW6061 ötvözet kémiai összetétele [8]

<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Cr</i>	<i>Zn</i>	<i>Ti</i>	<i>Egyéb</i>	
0,40	max	0,15	max	0,80	0,04	max	max	egyen.	össz.
0,80	0,70	0,40	0,15	1,20	0,35	0,25	0,15	0,05	0,15

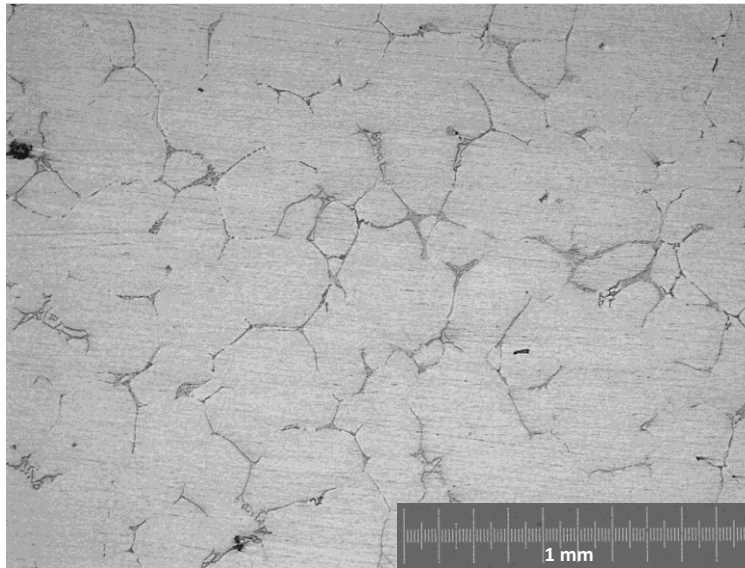
A jellemző mechanikai tulajdonságai – különböző hőkezelt állapotokban – a 4. táblázatban láthatóak: O – lágyított, T4 – természetesen öregített, T6 – mesterségesen öregített.

4. táblázat. EN AW6061 ötvözet mechanikai tulajdonságai lágyított, T4 és T6 állapotban [8]

<i>Hőkezelés típusa</i>	<i>Szakítószil. [MPa]</i>	<i>Folyáshatár [MPa]</i>	<i>Nyúlás [%]</i>	<i>Nyírószil. [MPa]</i>	<i>Keménység [HB]</i>
O	124	55	30	83	30
T4	241	145	25	165	65
T6	310	276	17	207	95

Fontos tudni, hogy milyen a kiinduló szövetszerkezete az ötvözetnek, így megfelelő előkészítés után felvételeket készítettem az alapanyagról optikai mikroszkóp segítségével. A szövetszerkezet a 12. ábrán látható, 50x-es nagyításban.

Mivel öntött szerkezetről készült a kép, azon a dendritek, határain sötétebb szürkével kis mennyiségű eutektikum található, mely ezen ötvözet esetében Mg_2Si vegyületből és alumíniumból áll.



12. ábra. A használt EN AW6061 ötvözet szövetszerkezete öntött állapotban

Az alapanyag vizsgálatának célja a dolgozatomban a kompozit erősítő fázisának hatásának megfigyelése volt, melyet a keménységmérési eredmények összehasonlításával végeztem el.

3.1.2 Alumínium mátrixú kompozit

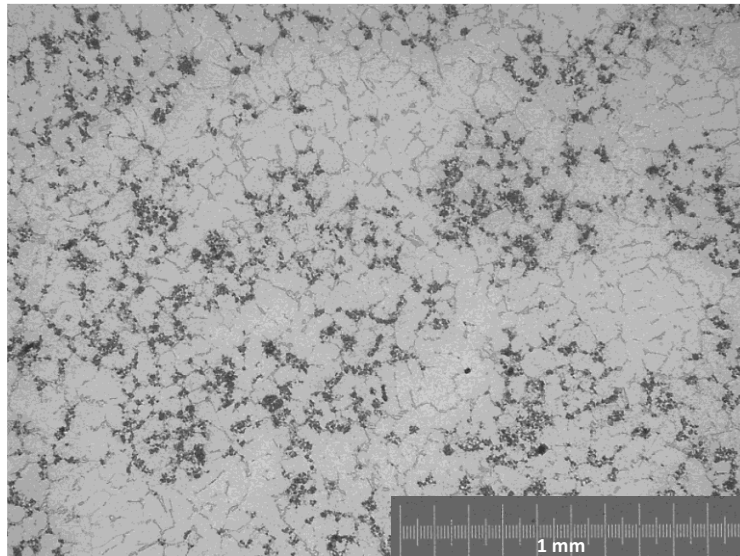
A felhasznált kompozit egy ún. szemcseerősítésű kompozit, azaz a hozzáadott erősítő fázis gömbszerű alakban van jelen a mátrixon belül. Készítése során az említett ötvözet olvadékához adott szemcseméretű alumínium-oxid port adagolnak meghatározott mennyiségben.

A munkám során vizsgált habok alapanyagául szolgáló kompozitban 6 térfogatszázaléknyi, 6 mikron nagyságú Al_2O_3 szemcsék találhatók.

A kompozitról hőkezelés előtt, öntött állapotban szintén készítettem optikai mikroszkóp felvételeket, 50x-es nagyításban, mely a 13. ábrán látható.

A szövetképen a legvilágosabb szürke az alumíniumötvözet dendritei láthatóak. A dendritek határain az alapötvözethez hasonlóan az eutektikum található, a legsötétebb szürke pedig az alumínium-oxid szemcséket mutatja.

A két kép azonos nagyításban látható, így szembevetendő, hogy a kompozit dendrites szerkezete lényegesen finomabb, mint az alapanyagé. Ez a kompozitgyártás során bekövetkező újraolvasztásnak tudható be.



13. ábra. Kompozit szövetszerkezete hőkezelés előtt

3.1.3 Alumíniumhabok

A kísérleteket megelőzően kiválasztásra került a hőkezeln kívánt alumíniumhabok típusa. Ezek alapanyagát a tárgyalt kompozittípus adja, és a már említett Alcan típusú eljárással készültek. A kísérletek során különböző gyártási számú habokat használtam fel, de azok relatív sűrűsége, cellamérete, kiinduló mechanikai tulajdonságai is hasonlóak voltak.

A kiválasztásnál az alapanyag típusa, a rendelkezésre álló előzetes mérési eredmények mennyisége – a vizsgálatok megkönnyítésének érdekében – és a cellaszerkezet homogenitása játszott szerepet. A dolgozatban két habtípus hőkezelési eredményeit említem, így a következőkben ezek tulajdonságait mutatom be.

Az F116 és F137 hab főbb tulajdonságai:

- alapanyaguk 6061-es mátrixú, 6 térfogatszázaléknyi, 6 mikron szemcseméretű alumínium-oxidot tartalmazó kompozit
- sűrűségük megközelítőleg $0,8 \text{ g/cm}^3$
- relatív sűrűség: $\sim 29\%$
- átlagos cellaméret: $\sim 0,85 \text{ mm}$

3.2 Vizsgálati módszerek

Ahhoz, hogy a hőkezelés eredményét ellenőrizhessük, a paramétereket a tulajdonságok változásának megfigyelésével beállíthassuk, megfelelő mérési módszereket kell meghatározni, mely elég pontos információt ad az anyag mechanikai tulajdonságairól.

A vizsgálatok főképp két méréssel történtek: keménységmérés és nyomóvizsgálat. Előbbit a tömbanyagok esetén alkalmaztam, utóbbit pedig habmintákon végeztem.

3.2.1 Keménységmérés

A keménységmérés egyszerű, de kiváló módja a hőkezelés hatásának nyomon követésére. Alumínium mátrixú kompozitok esetében is a leggyakrabban alkalmazott keménységmérési módszer a Brinell keménységmérési eljárás.

A mérés során adott terhelőerővel, adott átmérőjű acélgolyót nyomnak a darabba 15 másodpercen keresztül, majd a nyom átmérőjéből a következő képlet alapján számítják a Brinell-keménységet.

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

ahol:

HB	az anyag Brinell-keménysége	[HB]
F	a terhelőerő	[kg]
D	az acélgolyó átmérője	[mm]
d	a nyom átmérője	[mm]

Lágyfémek esetén a szabvány meghatározza a terhelőerőt és a golyóátmérőt. Ez alapján készültek a mérések, azaz a terhelőerő 62,5 kg volt, a golyó átmérője pedig 5 mm. A mérést elvégeztem az alapötvézeten, annak érdekében, hogy látható legyen az erősítő fázis alkalmazásának hatása a szilárdsági tulajdonságokra.

A hét darab kompoziton hőkezelés előtt és után is 3-3 mérést végeztem el. A mérések után számítottam az eredmények szórását, hogy megtudjam megfelelő-e a mérési módszer.

A mérések eredményei a 4.1 fejezetben találhatóak.

3.2.2 Nyomóvizsgálat

A vizsgálatot elvégeztem az adott típusú hab hőkezelés nélküli és hőkezelt mintáin is a nemesítés hatásának ellenőrzésére.

A nyomóvizsgálat menetét a következőkben ismertetem.

A vizsgálandó darabot a befogás után fokozatosan növekvő nagyságú erővel terhelik addig, amíg a darab el nem törik – vagy adott mértékű alakváltozásig. A mérések Instron 5982 típusú mérőberendezéssel készültek a Miskolci Egyetemen. A vizsgálati sebesség 10 mm/s volt.

Az eredmények alapján ábrázolunk egy erő – elmozdulás (alakváltozás [mm]), illetve – az erőt osztva az eredeti keresztmetszettel – egy nyomófeszültség – alakváltozás [%] diagramot.

A két diagram alapján az alábbi értékeket határozzuk meg:

1. Nyomószilárdság

A nyomófeszültség – alakváltozás [%] görbéből leolvassuk az első maximumhoz tartozó feszültségértéket. Amennyiben nincs egyértelmű maximum, úgy az első meredek szakasszal úgy húzunk párhuzamos egyenest, hogy az az 1% alakváltozásból induljon. Ahol ez az egyenes el metszi a görbét, leolvassuk a feszültségértéket, mely megadja a nyomószilárdságot MPa mértékegységben.

Az egyik összehasonlítási alap a nemesített és öntött habok esetén ez a tulajdonság volt.

2. Átlagfeszültség

Az átlagfeszültség meghatározása a 20 és 40%-hoz tartozó alakváltozásokhoz tartozó feszültségértékek átlagából történik. A két értéket a nyomófeszültség – alakváltozás diagramból kell leolvasni. Mértékegysége szintén MPa.

3. Határfeszültség

Határfeszültségnek az átlagfeszültség 130%-át vesszük.

4. Tömörödési alakváltozás

A nyomófeszültség – alakváltozás diagramból leolvassuk a határfeszültség értékéhez tartozó alakváltozási értéket. Amennyiben két ilyen érték is van, akkor a nagyobb alakváltozást vesszük tömörödési alakváltozásnak. A tömörödési alakváltozást százalékos értékben adjuk meg.

5. Energiaelnyelődés

A meghatározáshoz leolvassuk a terhelőerő – alakváltozás [mm] diagramból a határfeszültséghez tartozó alakváltozást, és az ehhez tartozó terhelőerőt [kN]. E két érték szorzata adja az energiaelnyelődés nagyságát. Ez egy közelítő érték, nagyobb, mint a valóságban, így pontosításához a görbe alatti területet határozzuk meg integrálással. Mértékegységek: [kN]·[mm] = [J]

6. Fajlagos energiaelnyelés (határfeszültségnél, 20%-nál, 50%-nál)

Az energiaelnyelődés és a minta tömegének hányada adja a fajlagos energiaelnyelést. Meghatározzuk még 20% és 50%-os alakváltozáshoz, mely során az 5. pont szerint járunk el, csak nem a határfeszültséghez tartozó alakváltozást nézzük, hanem a 20 és 50%-osat. Integrálás esetén a görbét ezen értékekig integráljuk.

Mértékegységek: $[J/g] = [kJ/kg]$

7. Térfogati energiaelnyelés

Két módon számítható: az energiaelnyelődést $[J]$ elosztjuk a minta térfogatával $[cm^3]$, illetve a fajlagos energiaelnyelést $[kJ/kg]$ megszorozzuk a minta sűrűségével $[kg/m^3]$.

$[J/cm^3] = [MJ/m^3]$

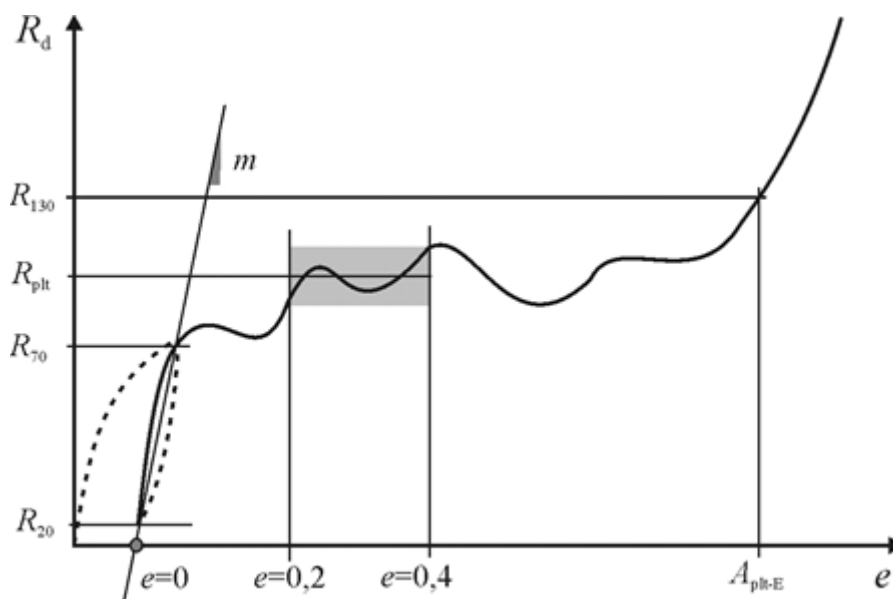
$[kJ/kg] \cdot [kg/m^3] / 1000 = [MJ/m^3]$

8. Rugalmassági modulus

A rugalmassági moduluszt a nyomószilárdság – alakváltozás $[\%]$ diagram kezdeti meredek szakaszának tangense határozza meg. Első lépésben kiszámítjuk az átlagfeszültség 20 és 70%-át, majd a diagramból megkeressük az ezekhez tartozó alakváltozásokat, melyet nem százalékos értékben, hanem törtértékben veszünk.

A rugalmassági modulus $[MPa]$ meghatározásához a 70 és 20%-os feszültségek különbségét elosztjuk a hozzájuk tartozó alakváltozások különbségével.

Amennyiben ezek az értékek nem esnek az első meredek részre, a nyomószilárdság 70 és 20%-ához tartozó alakváltozási értékeket olvassuk le.



14. ábra. Feszültség – alakváltozás diagram a jellemző értékek meghatározásához

3.3 Hőkezelési módszer

A hőkezelési folyamat kidolgozása során két vonalon indultam el: az egyik a kompozit alapanyag hőkezelése, a másik pedig a kiválasztott habtípusok hőkezelése volt. Erre azért volt szükség, hogy megfigyelhessem, mennyiben térnek el a paraméterek tömbanyag és cellás szerkezet esetén.

3.3.1 Kompozitalapanyag nemesítése

A kiindulási pont itt egy azonos mátrixú, de eltérő erősítő fázist, és egy azonos mátrixú és azonos erősítő fázist különböző mértékben tartalmazó kompozit nemesítéséről szóló publikáció volt, melyeket a 2.4.2 fejezetben ismertettem.

A hőkezelések elvégzésére hét darab kompozit állt a rendelkezésemre, így a cikkhez képest lényegesen kevesebb variációt végeztem el. Ezek megválasztásakor a szélső értékeket, illetve a maximális értékeket vettem figyelembe.

A homogenizálást a habok hőkezelési eredményeivel való összehasonlíthatóság miatt szintén 5 órának és 530°C-nak választottam, eltérően az említett cikkben szereplő 6 órától.

Megeresztés tekintetében a másik cikkben maximális szilárdságot 180°C-on, 4 óra után érték el. 140°C-on nem tapasztalható lényeges szilárdságváltozás, illetve a habok megeresztését 160°C-on végeztem el, így a második kiválasztott hőmérséklet 160°C volt. A szélső értékek vizsgálatának érdekében végeztem megeresztést még 240°C-on is. A habokon végzett első hőkezelési kísérlet folyamán kiderült, hogy a 18 óra túl hosszú megeresztési idő, így azt 10 órára csökkentettem, ezért választottam a kompozitok esetén is 10 órás megeresztési időt.

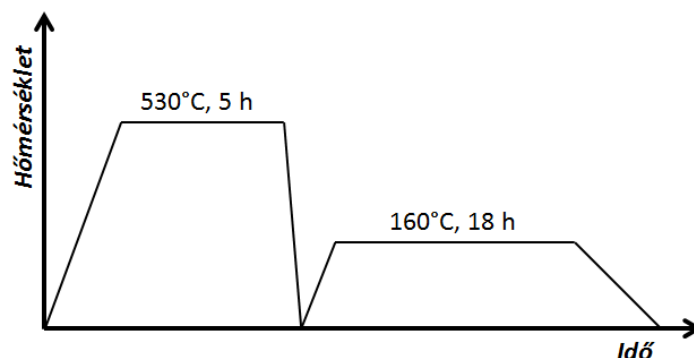
Az így kialakult hőkezelési mátrix:

- minden darab homogenizálása 530°C-on, 5 órán keresztül,
- megeresztés 160°C-on 4 és 10 órán keresztül,
- 180°C-on 1, 4 és 10 óráig,
- 240°C-on 4 és 10 óráig.

A darabokon hőkezelés előtt és után is keménységmérést végeztem, illetve vizsgáltam a szövetszerkezetet. Az eredmények a 4.1 fejezetben találhatók.

3.3.2 Kiválasztott habok hőkezelése

A hőkezelési folyamat lépései elsőként szakirodalom alapján kerültek meghatározásra az EN AW6061-es ötvözetre. Az itt meghatározott hőmérsékletek és hőntartási időket a 15. ábra mutatja be.



15. ábra. Kiinduló hőkezelési folyamat hőmérséklet- idő diagramja

Az első hőkezelések e paraméterekkel lettek végrehajtva. Három darab, előzetesen kimunkált 3 cm élhosszúságú habkockát 5 órán keresztül, 530°C-on homogenizáltam.

Az edzés szobahőmérsékletű vízben történt, ügyelve arra, hogy a minták a lehető leggyorsabban kerüljenek a kemencéből a hűtőfolyadékba. Az edzés után a minták tömegét lemértem, így – a kiinduló tömegadatok birtokában – számítható, hogy mekkora tömegű, illetve százalékos arányban mennyi vizet fész fel a hőkezelt habtípus. A vízfelvételi tulajdonságokat a jövőben további mérések elvégzésével vizsgálom, így a dolgozatomban e témakör nem kerül kibontásra.

Az edzést követően a darabokat mesterségesen öregítettem 18 órán keresztül, 160°C-on.

A hőkezelt darabokat nyomóvizsgálatnak vettem alá, melynek eredménye a 4.2 fejezetben látható. Ez a módszer nem eredményezett lényeges szilárdságváltozást, melyet a megeresztési folyamat időtartamának tudtam be a kompozit megeresztési idejének függvényében [9]. Így a következő lépésben a homogenizálás folyamatán és a megeresztés hőmérsékletén sem változtattam, utóbbi idejét azonban lényegesen, 10 órára csökkentettem. Az így nemesített habokat szintén nyomóvizsgálatnak vettem alá, melynek eredménye a 4.2 fejezetben található. Ezen módszerrel már lényeges változást értem el, elsődlegesen elfogadtam, azonban a jelen munka után további hőkezelési vizsgálatokat végzek majd el.

A hőkezelés célja a felmerülő problémák, eltérések vizsgálata is volt, melyeket az 5. fejezetben részletezek.

4. Kísérleti eredmények

4.1 Keménységmérési eredmények

Első lépésben az alapötvözet keménységmérését végeztem el, melynek eredményei az 5. táblázatban láthatóak.

5. táblázat. EN AW6061 ötvözet keménységmérési adatai öntött állapotban
62,5 kg terhelőerő és 5 mm golyó

Nyom száma	Átmérő [mm]	Átmérő [mm]	Átlag [mm]	Keménység [HB]
1	1,30	1,32	1,31	46
2	1,41	1,40	1,41	40
3	1,47	1,46	1,47	36
4	1,3	1,29	1,30	47
5	1,34	1,35	1,35	43
6	1,35	1,35	1,35	43
7	1,36	1,34	1,35	43

A méréseket ugyanazon a darabon végeztem el. Az átlagkeménység 43, az eredmények szórása pedig 3,7.

A következő, 6. táblázat a kompozitokon, öntött állapotban végzett mérési eredményeket foglalja össze. Minden mintán három mérést végeztem el.

6. táblázat. Kompozit keménységértékei hőkezelés előtt
62,5 kg terhelőerő és 5 mm golyó

Minta száma	1	2	3	4	5	6	7
Átlagkeménység [HB]	58	71	598	65	60	54	61
Szórás	2,5	8,7	1,2	6,0	2,9	7,7	0,6

A hőkezelés utáni keménységeket a 7. táblázatban foglaltam össze a megeresztés idejének és hőmérsékletének feltüntetésével. A mintákon szintén 3-3 mérést végeztem el, így feltüntettem a mért értékek szórását is.

7. táblázat. Hőkezelési utáni keménységmérési eredmények

62,5 kg terhelőerő és 5 mm golyó

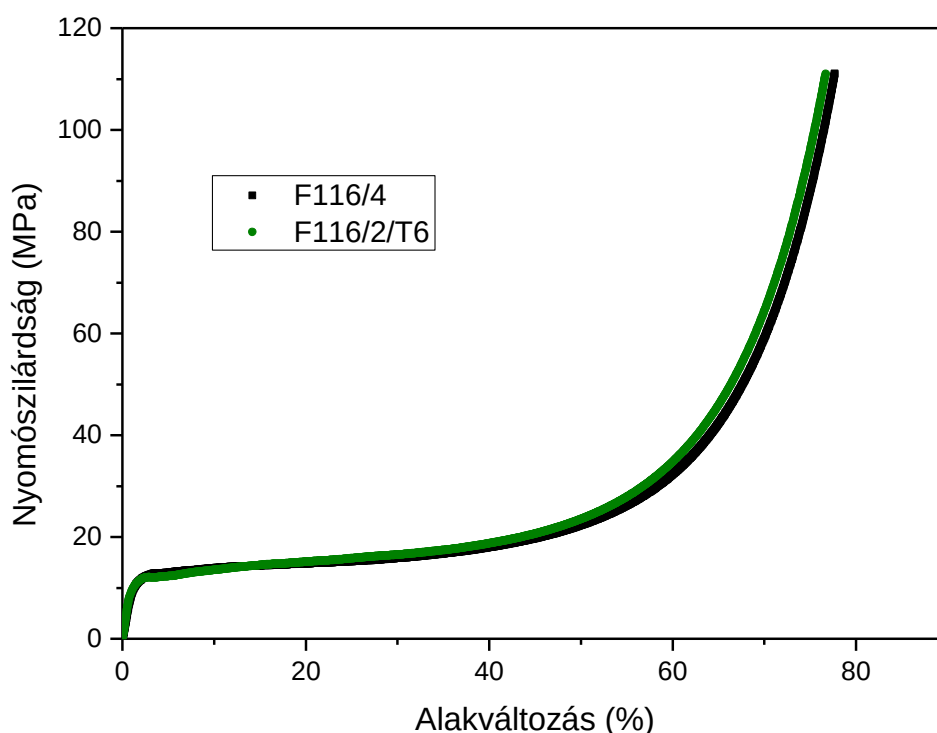
<i>Minta száma</i>	1	2	3	4	5	6	7
Megeresztés ideje és hőmérséklete	1 óra 180°C	4 óra 160°C	4 óra 180°C	4 óra 240°C	10 óra 160°C	10 óra 180°C	10 óra 240°C
Átlagkeménység [HB]	82	102	96	79	89	83	67
Keménység szórás	5,0	2,3	2,2	1,7	3,6	4,3	1,3
Növekedés [%]	40,6	44,0	60,8	20,9	49,0	54,8	10,6
Növekedés szórás	10,5	14,6	4,3	11,2	8,9	19,4	3,0

A növekedési értékekből látható, hogy a legnagyobb javulást az alkalmazott paraméterek közül 180°C-on 4 óra után érte el az anyag. Az öntött szerkezetű alapanyag és kompozit értékeinek összevetésénél látható az adagolt erősítőszemcsék szilárdságnövelő hatása is.

A mérési eredmények szórásának értékei alapján a keménységmérés paraméterei nem megfelelőek sem a kompozit, sem az alapötvözet esetében.

4.2 Nyomóvizsgálati eredmények

A szakirodalom alapján meghatározott paraméterek alapján hőkezelt (F116/2 (T6)) és hőkezeletlen (F116/4) darabok nyomódiagramjai a 16. ábrán láthatók. A homogenizálási idő 5 óra, hőmérséklete 530°C, a megeresztés 160°C-on 18 órán keresztül történt. A diagramokból egyértelműen látszik, hogy ez a megeresztési idő túl hosszú, a darabok nyomószilárdságában számottevő növekedés nem következett be.



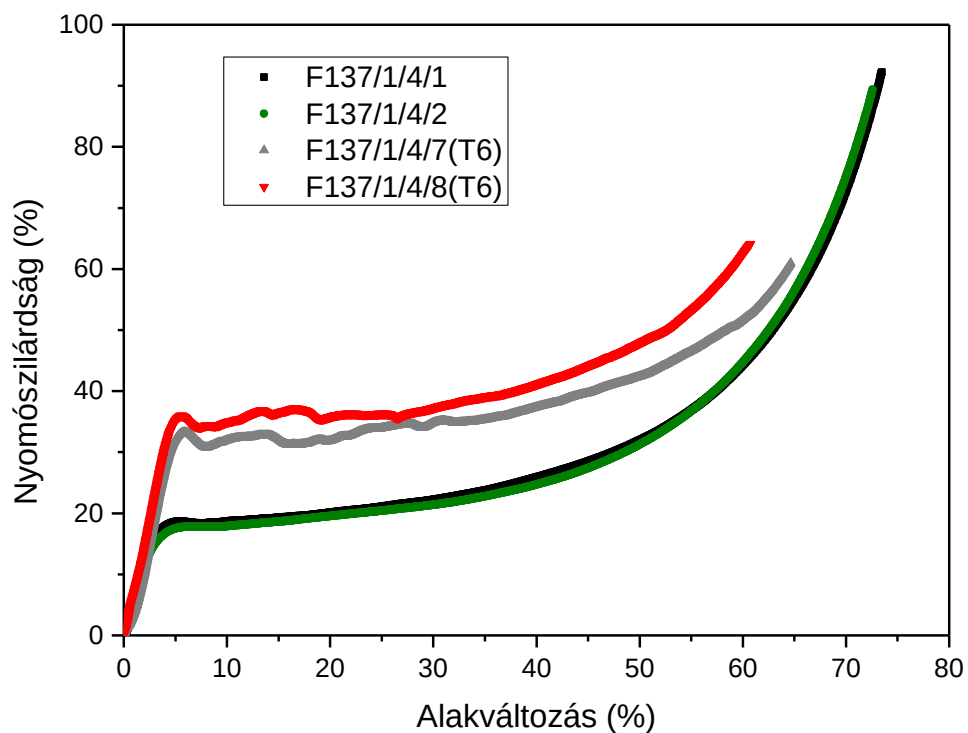
16. ábra. Nyomószilárdság – alakváltozás görbe F116 hab esetén

A következő lépésben módosított paraméterekkel – 18 óra helyett 10 órás megeresztés – nemesített, és az ugyanezen típusú hőkezelés nélküli habok felvett nyomószilárdság – alakváltozás görbéi a 17. ábrán láthatóak. A minták jelölései a cégen belüli azonosítószám, a hőkezelt és hőkezelés nélküli habok nyomóvizsgálatai páronként párhuzamos mérések voltak.

Az F137/1/4/1 és F137/1/4/2 hőkezelés nélküli, az F137/1/4/7(T6) és F137/1/4/8-as minták hőkezelt állapotúak.

Mivel ez esetben jelentős szilárdságnövekedést értem el, a görbékből 3.3.2 fejezetben leírt módszerekkel meghatározott értékeket a 8. táblázatban foglaltam össze.

Az eredményekből látható, hogy a kitűzött 50%-os szilárdságnövelés helyett 90%-os értéket értem el az alkalmazott hőkezelési folyamattal. Ily mértékben nőtt a hab nyomószilárdsága, rugalmassági modulusa és fajlagos energia elnyelése is.



17. ábra. Nyomószilárdság – alakváltozás görbe F137 hab esetén

8. táblázat. F137 típusú habok szilárdsági tulajdonságai hőkezelés előtt és után

	F137/1/4/1	F137/1/4/2	F137/1/4/7(T6)	F137/1/4/8(T6)
Nyomószilárdság [MPa]	18,7	17,8	33,3	36,0
Határfeszültség [MPa]	29,9	28,7	48,0	50,0
Tömörödési alakváltozás [%]	47,3	47,0	53,2	52,6
Rugalmassági modulus [MPa]	438,6	443,9	847,9	804,5
Fajlagos energia elnyelés [J/kg]	12,0	11,6	22,5	21,5

5. Diskusszió

Az elvégzett kísérletek és a szakirodalmi adatok összehasonlítása alapján az alábbi következtetésekhez jutottam, melyeket a felhasználtam továbbiakban szükséges mérések meghatározásához.

- Az alapötvözet keménységmérési eredményeit összehasonlítva a különböző hőkezelési állapotban szakirodalom alapján talált keménységmérési eredményekkel látható, hogy a lágyítottól nagyobb értéket, a T4 állapotútól kisebb értéket mutat, azaz megfelel egy öntött szerkezetű ötvözet keménységének. Összehasonlítva a kompozit keménységével, látható a hozzáadott alumínium-oxid szemcsék szilárdságnövelő hatása.
- A kompozitok hőkezelése során a kiindulási állapot nyújtó SiC fázist tartalmazó cikkben a maximális keménységnövekedés 62%-ot ért el 180°C-on 4 óra után. Az általam hőkezelt kompozitminták maximális szilárdságát szintén ekkor értem el, 60%-os növekedéssel. Azonban a mérési eredmények szórásából, illetve az egyes darabok átlagos keménységének nagy eltéréseiből arra lehet következtetni, hogy az alkalmazott keménységmérés nem volt megfelelő. Ennek oka abban valószínűsíthető, hogy nem volt elég nagy az alkalmazott golyóméret, nem fedett le elég nagy területet a kompozit szerkezetéből. A további mérések során nagyobb golyót, illetve nagyobb terhelőerőt kell alkalmazni. Ugyanez a probléma áll fenn az alapötvözet keménységmérési értékeinek szórásából adódóan.
- Az alumíniumhab minták hőkezelése előtt számba vettem az esetleges felmerülő problémákat a nemesítés különböző lépéseiben. Mivel a hővezetési tényező számottevően alacsonyabb haboknál, mint a tömbanyagoknál a hőntartási időtartamok meghatározásánál ezt figyelembe kell venni. Így a további hőkezelések elvégzése előtt mérni kell a hőkezelt kívánt habok hővezetési tényezőjét a pontosabb hőntartási idők meghatározásához, ennek függvényében pedig vizsgálni a homogenizálási idő megfelelőségét.
- Az edzés során fontos vizsgálni a habszerkezet vízfelvevő képességét, ugyanis a maradó víz befolyásolhatja a megeresztés során lejátszódó folyamatokat.

- A megeresztési hőmérsékletet nem változtattam, csak a megeresztési időtartam hosszát. 18 óra után a minták szilárdsági tulajdonságai nem változtak, a darabok túl lettek öregítve. A 10 órára való csökkentés után a szakirodalomban talált 50%-os szilárdságnövekedést lényegesen meghaladva, 90%-ot sikerült elérni. Így e paraméterekkel elsődlegesen alkalmazható hőkezelési folyamatot határoztam meg, azonban a továbbiakban fontos vizsgálni a homogenizálási és öregítési idők, illetve öregítési hőmérsékletek változtatásával fellépő szilárdsági változtatásokat.

6. Összefoglalás

Jelen dolgozatban alumíniumhabok hőkezelési technológiájának kidolgozásával foglalkoztam. Munkám során szakirodalmi adatok alapján meghatároztam a nemesítés folyamatainak kiinduló paramétereit, mind habokra, mind pedig a hab alapanyagául szolgáló kompozitra.

A méréseket megelőzendően azonosítottam a habok hőkezelése során esetlegesen felmerülő problémákat, melyekre a mérések során fokozott figyelmet fordítottam.

A kiinduló paraméterek alkalmazásával végrehajtott hőkezelés után az elvégzett nyomvizsgálatok eredményei alapján módosítottam a megeresztési folyamat időtartamát. A módosítással elvégzett nemesítés 90%-os nyomószilárdság növekedést eredményezett, mely lényegesen meghaladja az előzetes szakirodalom alapján kitűzött célt. Így meghatároztam egy alkalmazható hőkezelési metódust az adott paraméterekkel rendelkező alumíniumhab típusra.

Keménységmérést végeztem az alapötvözetből és a kompozitból készült mintákon, melynek mérési eredményei alapján vizsgáltam az erősítő fázis szilárdságnövelő hatását.

A kompozitokon végzett hőkezelések eredményét szintén keménységméréssel követtem, majd a kapott értékeket összevetettem a vizsgált publikációkban elért értékekkel, illetve a habszerkezet hőkezelési paramétereivel, majd azonosítottam az eltérések lehetséges okait.

A dolgozatom eredményei alapján meghatároztam a továbbiakban módosítandó paramétereket, illetve a vizsgálatok folytatásához szükséges méréseket mind habok, mind kompozitok esetében.

Felhasznált irodalom

- [1] Dr. Köves Elemér: Alumínium kézikönyv
Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1984
- [2] Lucio F. Mondolfo: Metallography of Aluminium Alloys
John Wiley and Sons Inc., London, 1943
- [3] J. Banhart, D. Wearie, On the road again: metal foams find favor
Physics Today 55, 37-42, 2002
- [4] Hans-Peter Degischer, Brigitte Kriszt: Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications
Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2002
- [5] M. F. Ashby T. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, H. N. G. Wadley: Metal foams: A design guide
Society of Automotive Engineers Inc, 2000
- [6] William D. Callister, David G. Rethwisch: Materials Science and Engineering: An Introduction
John Wiley and Sons, Egyesült Államok, 2010
- [7] Wiener Csilla: Fémhabok szerkezeti és mechanikai vizsgálata
Doktori disszertáció, Eötvös Lóránt Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Anyagfizikai Tanszék, Budapest, 2006
- [8] Asm Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials
ASM International, Egyesült Államok, 1990
- [9] S. Rajasekaran, N. K. Udayashankar, J. Nayak: T4 and T6 Treatment of 6061 Al-15 Vol.%SiC_p Composite
ISRN Materials Science, Volume 2012, Article ID 374719, 2011
- [10] A. Saigal, G. Leisk: Heat treatment optimization of alumina/aluminium metal matrix composites using the taguchi approach
Scripta Metallurgica et Materialia, Volume 26, Issue 6, Pages 871–876, 1992
- [11] D. Lehmhus, J. Banhart: Properties of heat-treated aluminium foams
Materials Science and Engineering Volume 349, Issue 1-2, Pages 98-110, 2003
- [12] D. Bryant, D.E. Hunter, M.D. Crowley, J.A. Kallivayalil: Structure and Properties of Aloca Aluiminium Foam
ICAA 11, Aachen, 2008. 09. 22-26.