

ALUMÍNIUMHAB HEGESZTÉSÉNEK SAJÁTOSSÁGAI

THE PROPERTIES OF ALUMINIUM FOAM WELDING

Kiss Norbert^{1*}, Hareancz Ferenc¹, Weltsch Zoltán¹

¹ Anyagtechnológiai Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

Kulcsszavak:

tömegcsökkentés, alumíniumhab, hegesztés, optimális paraméterek

Keywords:

light weight design, aluminium foam, welding, optimal parameters

Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember 20.

Átdolgozva 2018. október 27.

Elfogadva 2019. március 10.

Összefoglalás

Napjainkban az iparban gyártott szerkezetek, gépelemek, járművek tömegének csökkentésére egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a gyártók. Ehhez, olyan újszerű anyagok felhasználására van szükség, mint például az alumíniumhabok. Ennek az anyagnak a hegesztése számos nehézséget rejt magában. Ahhoz, hogy megismerjük a hegesztés közbeni viselkedését és tulajdonságait, kutatást kell végeznünk, ezáltal következtethetünk az anyag hegesztési paramétereire.

Abstract

In nowadays industry, manufacturers pay more and more attention on reducing the mass of manufactured structures, machine parts and vehicles. For that matter, it is necessary to use advanced materials, such as aluminum foams. Welding of this material can have many difficulties. In order to get to know the properties of this material during the process of welding, we have to do research, from which we can conclude the optimal welding parameters of this material.

* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 30 855 35 87;
E-mail cím: kiss.norbert321@gmail.com

Bevezetés

Napjainkra világossá vált az emberiség számára, hogy a technológiai fejlődése számára elengedhetetlen és szükséges olyan új anyagok létrehozása és felhasználása, melyekkel a fejlődés tendenciája fenntartható. Kiváló példa erre a gépjárműipar ipar mely az utóbbi évtizedekben óriási növekedésen ment keresztül, melyet tükröz az alábbi (1. diagram) diagram is.



1. Diagram
Gyártott gépjárművek száma [1]

Az elmúlt években az iparág olyan irányba kezdett haladni, ami nagy hangsúly fektet a járművek tömegcsökkentésére és ezzel a károsanyag kibocsátás minimalizálására. A károsanyag kibocsátás csökkentésére globális szinten folynak a törekvések. Ezt a tömegcsökkentést főleg az új típusú anyagokkal érték el, mint például AHSS acélok, nagy szilárdságú alumínium ötvözetek vagy celluláris anyagok ezek közül is a fémhabok.

Az olyan fémek, amelyekből celluláris anyagokat, állítanak elő mint a titán, réz, acél és alumínium felhasználási köre egyre inkább bővül. Ez köszönhető kivételes tulajdonságaiknak melyek miatt érdemes lehet az alkalmazásuk: jó alakítási, hővezetési tulajdonságaik, jó ütközésenergia elnyelők, kedvező akusztikus és rezgéscsillapítók. Ezen tulajdonságok révén a fémhabok felé egyre nagyobb figyelem terelődik.

A felhasználás növekedésével egyre nagyobb érdeklődés mutatkozik a lehetséges kötéstechológiák felé, így a hegesztett kötések kialakítás felé is. Jelen irodalomkutatás az alumínium és alumíniumhabok főbb tulajdonságai, alkalmazási területei bemutatása mellett, ezen anyag hegesztési sajátosságainak bemutatását tűzi ki céljául.

1. Alumínium felhasználás a gépjármű iparban

Az üzemanyag fogyasztás és CO₂ kibocsátás csökkentésére irányuló törekvések jelentősen megnövekedtek az utóbbi időben, a növekvő gazdasági és politikai nyomás hatására. A járművek tömegcsökkentésének egy lehetséges útja a könnyűszerkezetes alvázak és karosszériák tervezése és építése. Olyan új koncepciók kerültek kifejlesztésre, mint a „Super Light Car” SLC (Szuper könnyű autó), mely fő tervezési iránya a súlycsökkentés volt. Ennek keretein belül, minden alkatrésze a rendeltetésének legmegfelelőbb anyagból került kialakításra. Ezeknek az alkatrészeknek a legnagyobb arányban az alumínium szolgál alapanyagául [2].

Az alumínium kezdeti felhasználása a járműiparban csak a luxus kategóriájú autókra terjedt ki. Az első sorozatgyártású autó, mely teljes alumínium vázzal rendelkezett 1994-ben debütált, Audi A8 volt. Ezt a trendet követni kezdte a többi nagy autógyártó vállalat is [2].



1. Kép
Audi A8 karosszériája [3]

Ennek köszönhetően 2014-re az alumínium felhasználás a tömegpiacra szánt modellekben is egyre nagyobb részarányt tett ki. Sikerült elérni néhány autó esetében a 39 %-os tömegcsökkenést is [2].

Az alumínium mellett szól a könnyű súlya ezen kívül az a tulajdonsága is, hogy remek energiaelnyelőként funkcionál. Emiatt rendszeresen készítenek belőle életvédelmi elemeket, lökhárítókat, ütközőelemeket és gyakran fordul elő a karosszéria ütközészónájában is. A forradalmi elektromos autókat gyártó Tesla modelljei akkumulátor csomagjait alulról 8 mm vastag golyóálló alumíniumötvözet lemez védi, mely garantálja a biztonságát és védelmét az akkumulátoroknak[4].

Az európai gépkocsikra jutó átlagos alumínium felhasználás 2012-ben 140 kg/db volt. Eloszlása a következők alapján alakul:

- Hajtáslánc (motor, üzemanyag rendszer, hűtőrendszer): 69 kg található a motor blokkban, hengerfejben, váltóházban és radiátorokban.
- Váz és felfüggesztés (bölcső, keréktengelyek): 37 kg található a kerekben, lengőkarokban és kormányműben.
- Karosszéria elemek (autó karosszéria, motorháztető, ajtók, csomagtartó, lökhárítók, és belsőtér): 26 kg a motorháztetőben és ajtóknál, első felépítésben és hátsó lökhárítóban [3, 4].

Ezzel lényegesen csökkenteni tudták a káros anyag kibocsátást és üzemanyag fogyasztást [3].

Az alumínium ilyen nagymértékű elterjedését a járműiparban hozzásegítette, az új és jobb minőségű alumínium ötvözetek fejlesztése mellett megjelent, új formája az alumíniumnak. Ez a forma nem más, mint a celluláris szerkezetű alumíniumhab. Ez a szerkezet tovább fokozza az alapanyag könnyedségét, emellett megtartja szilárdságát.

2. Celluláris anyagok

Ugyan az emberiség csak a 20. században kezdett el mesterségesen celluláris anyagokat előállítani, elsőként polimerekből, kerámiákból, üvegekből és fémekből előtte is megtalálhatók voltak ezek az anyagok a természetben. A legalapvetőbbek a fa a szivacs és korall, de ilyen szerkezetű az emberi koponya és combcsont is. Manapság a legelterjedtebb mesterséges

celluláris felépítésű anyagok a polimer habok. Ezeknek az anyagoknak bevezetésben is említett csekély szilárdságuk, alacsony olvadáspontjuk és fokozott tűzveszélyességük szab határt.[5]

2.1. Fémhabok tulajdonságai

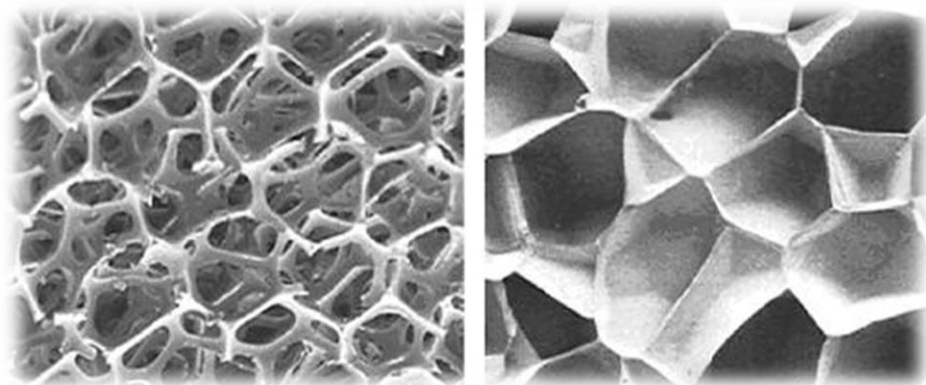
A fémek habosításával nagy fajlagos szilárdságú, könnyű, jó energiaelnyelő anyagokhoz juthatunk, amelyek magas hőmérsékleten is stabilak maradnak, ráadásul száz százalékban újrahasznosíthatók, így környezetbarátok is. További jó tulajdonságaik a jó rezgéscsillapító képesség, hangelnyelés és elektromágneses árnyékoló képesség. A fémhabok nagy energiaelnyelő képességét a porozitásuk biztosítja. A cellákat határoló gömbhéjak nem egy időben omlanak össze és, így a fémhabok nagymértékű alakváltozásra képesek azonos feszültség szinten. A fémhabok főbb tulajdonságait az alábbi (1. Táblázat) táblázat mutatja [5,6].

1. Táblázat. Fémhabok fizikai tulajdonságai [5]

Fémhabok legfőbb fizikai tulajdonságai	
Cellaméret	20 nm - kb. 20 cm
Relatív sűrűség	0,003 - 0,5
Rugalmassági modulus	0,02 - 15 GPa
Rugalmasság határa	0,02 - 50 MPa
Hővezetési tényező	0,3 - 35 W/m · K
Fajlagos ellenállás	$9 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-5} \Omega\text{m}$

A sejtes felépítésű anyagokat tömör rudak és/vagy lemezek hálózataként lehet elképzelni. A tömör rudakat cella élnek, a lemezeket cellafaloknak hívjuk. A háromdimenziós celluláris anyagokat haboknak nevezzük, ha a bennük található szilárd anyag térfogati hányada más néven relatív sűrűsége nem haladja meg az 50%-ot [5].

Ezt a relatív sűrűséget meghaladó háromdimenziós anyagokat porózus anyagoknak nevezzük. A fémhabokat két fő szerkezeti felépítésük szerint osztályozhatjuk: lehetnek nyitott cellásak vagy zárt cellásak is, melyet az alábbi kép (2. Kép) szemléltet [5].



2. Kép.

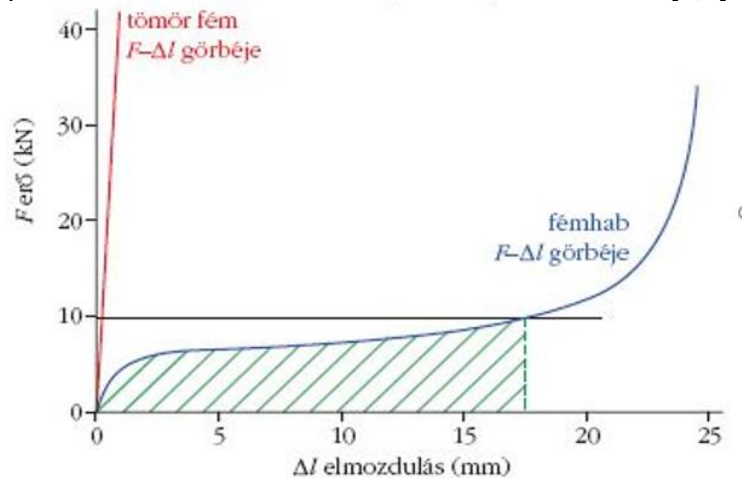
Nyitott (balra) és zárt (jobbra) cellás szerkezet [7]

Nyitott cellás a szerkezet, ha a cellák nyitott cellaoldalakon keresztül érintkeznek. Zárt cellás a szerkezet, ha a sejtek üregeit szilárd cellafalak határolják. Ezen felül előfordulhatnak félig nyitott és félig zárt celluláris felépítésű szerkezetek is, de ezek a szerkezetek csekély jelentőséggel bírnak.[5,6]

2.2. Fémhabok felhasználása

A fémhaboknak a fentebb említett előnyös tulajdonságaik révén több alkalmazási területük is van és ezek folyamatosan bővülnek. Az egyik legnagyobb előnyük révén, ami a nagy energiaelnyelő képesség beépíthetők gépjárművekbe. Például ütközésvédelmi elemekbe, mint

ütközők, bukókeretek és lökésállapítók vagy éppen lökhárítók. Felhasználhatók még ajtók, küszöbök belsejében merevítésként. Ezzel növelhető az utasok védelme és elérhető a tüzelőanyag fogyasztás csökkenése is. Jelenleg alumínium habokat használnak például az Audi A8-ban, a Ferrari F430 sportautóban és a Siemens Combino villamosaiban [5,6].



2. Diagram.

Fémhabok és tömör fémek erő-elmozdulás diagramja [5]

A jó hangszigetelő tulajdonsága miatt alkalmazzák Japánban felüljárók, viaduktok alját borítják be, ilyen anyagból készült „lemezekkel”. Hőszigetelő tulajdonsága miatt épületek mennyezetét és külső falaira is szerelnek, fémhabból készül táblákat ezzel javítva az épület szigetelését és egyben esztétikai szempontokat is szem előtt tartanak [5].

Tovább növeli a felhasználási területeket a szintaktikus habok javított tulajdonságai. Ezeknek a haboknak a mátrixa fém, erősítő anyaga pedig fém vagy kerámia, a hő és kémiai stabilitásuk jó. A felhasznált könnyűfémek (alumíniumötvözetek) olvadáspontja, a polimer habok degradációs hőmérsékletét lényegesen meghaladja, korrózióval való ellenállásuk ugyancsak megfelelő. Ezzel a felhasználásuk köre kiterjedhet a nagy hőmérsékletű, nedves, erősen korrozív környezetekre is [6].

3. Az alumíniumhegesztés sajátosságai

Az alumínium szerkezetek hegesztése során, az anyag sajátosságai révén nagyobb felkészülést és szakmai tapasztalatot igényel, mint a szénacél esetében. Több hátráltató tényező is van a hegesztés során, melyek nagyban kihatnak az elkészített hegesztett kötés minőségére.

3.1. Kilágyulás

Az alumínium hegesztése során a kötést alkotó varratfém mechanikai tulajdonságai rendszerint elmaradnak az alapanyagétól. Ez a jelenség a hegesztési hő hatására bekövetkező kilágyulás, mértéke a hőhatásövezetben a legnagyobb. Viszont azt, hogy ez mégis mekkora mértékben lép fel nagyban meghatározza a hegesztési eljárás és technológia [19].

Minél kisebb szakaszenergiával, vagyis minél nagyobb hegesztési sebességgel dolgozunk annál inkább kisebb lesz a hőhatásövezet szélessége. Fontos a minél koncentráltabb hőbevitel, ömlesztő eljárások közül a legkoncentráltabb és legelterjedtebb eljárás az AFI hegesztés [8].

3.2. Repedési hajlam

Az alumínium repedési hajlama igen magas lehet, emiatt ez a hegesztés egyik legfontosabb kritériuma. Létrejöhetnek a repedések a kristályosodás közben, illetve az olvadáspont alatti hőmérsékleten is, szilárd állapotban. A legnagyobb esély a repedés kialakulására a dermedés során van, ekkor a legkisebb az alumínium szilárdsága, képlékenysége és szívóssága viszont a belső feszültségek ekkor ébrednek az anyagban. A repedéseket létrehozó belső feszültségek forrása mindig az akadályozott alakváltozás [8].

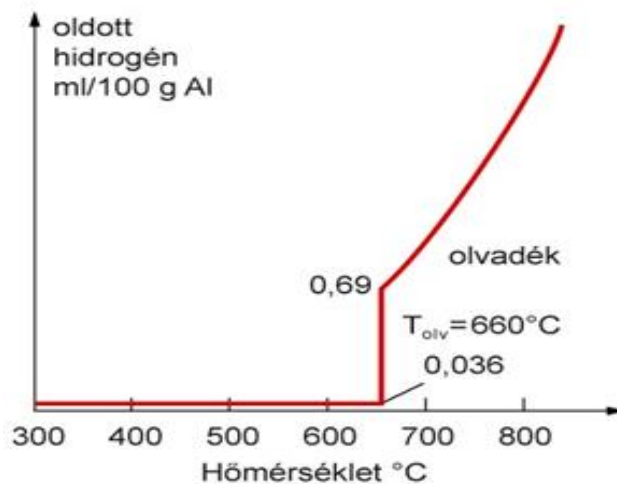
A belső feszültségek jelentősen csökkenthetők:

- a túlhevítés elkerülésével
- a befogás merevségének csökkentésével
- a hegesztési sorrend helyes meghatározásával
- a hegesztési hibák utólagos javítása is repedési veszéllyel jár [8].

Minden esetben törekedni kell a legkoncentráltabb hőbevitelre, a legkisebb szakaszenergiára, valamint kerülni kell az utólagos felhevítéseket [8].

3.3. Hidrogén okozta porozitás

A hőmérséklet növekedésével és az alumínium olvadáspont körüli értékének elérésével kiugróan megnő a hidrogénoldó képessége. A hidrogén az egyetlen gáz, amely oldódik az alumíniumban. A hidrogén oldhatóságát a hőmérséklet függvényében a következő ábra szemlélteti [9].



3. Diagram

Az alumínium hidrogénoldó képessége a hőmérséklet függvényében [9]

Mivel a hidrogén a hőmérséklet csökkenés és az ebből fakadó, alumínium hidrogénoldó képességének csökkenésével az anyagból eltávozni igyekszik, maga után üregeket, porozitást hagy. Ez a hegesztett kötés szilárdságát csökkenti, ami kerülendő. Azonban teljes mértékben ezt elkerülni fogyóelektródás hegesztés esetében nem lehet. [18]

A gázzárványokat képző hidrogén forrása:

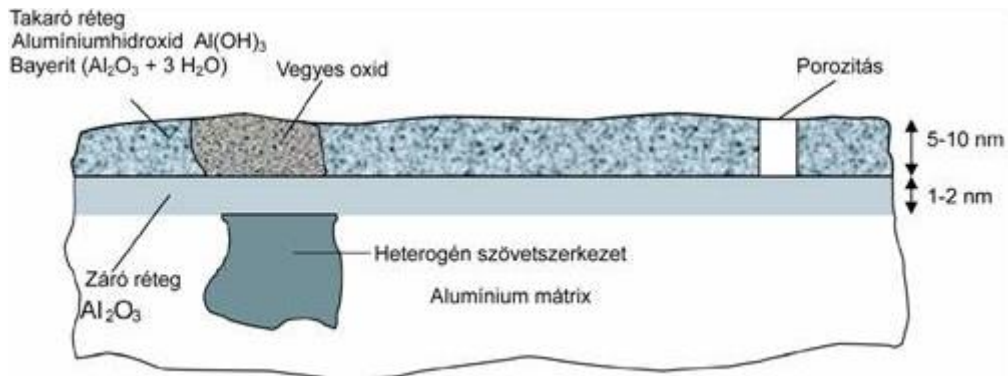
- felületi nedvesség, páralecsapódás
- szerves anyagú szennyeződés, kenőanyag maradványok
- a vízű hegesztőpisztoly tömítetlensége
- tömítetlen védőgáz rendszerbe keveredő levegő nedvességtartalma
- helytelen pisztolytartásból eredő levegő bekeveredése a védőgáz burokba

Az alapvető megoldás a környezet hidrogén leadó képességét olyan csekély értéken tartani, amennyire csak lehetséges. Ezt a következőkkel érhetjük el:

- a porozitás képződés csökkenthető az ívfeszültség növelésével [8].
- a tiszta raktározás és feldolgozás
- lényeges a védőgáz tisztasága, argonból legalább 4.6-os tisztaság kell (Ar min 99,996%) [9].

3.4. Alumínium-oxid

Az alumínium felületén szinte azonnal oxidréteg képződik szabad levegőn, amely amorf Al_2O_3 . Ez a felületet beborító réteg két részből tevődik össze: egy megközelítően tömör amorf alumíniumoxid alap és egy porózus, víztartalmú, Bayeritet tartalmazó takaró rétegből ezt az alábbi ábra (ábra 1.) szemlélteti. Az oxidréteg vastagsága az idővel, a hőmérséklettel és a rendelkezésre álló oxigén mennyiséggel növekszik [8, 9].



1. Ábra
Az oxidréteg szerkezete [10]

Az alumínium ötvözetek hegesztése ennek az oxidrétegnek az eltávolítása nélkül nem lehetséges. Ennek oka az olvadáspontja, ami $2050\text{ }^\circ\text{C}$ így a jóval alacsonyabb hőmérsékletű alumínium megolvad és mivel az alumínium-oxid sűrűsége nagyobb az alumíniuménál a varrat aljára süllyed. Van még egy másik káros hatása is az oxidrétegnek: mivel nedves környezetben a réteg vizet vehet fel, így hegesztés során hidrogén egyik fő forrása lehet. Ezek a tények a hegesztet kötésre nézve katasztrofális hatással vannak. A felületet lehetőleg közvetlenül a hegesztés megkezdése előtt mechanikusan vagy vegyi úton meg kell tisztítani [9, 18].

Eltávolításának lehetőségei:

- mechanikai tisztítás,
- pácolás,
- folyasztószerek,
- váltakozóáram (TIG), egyenáram fordított polaritás (MIG)[9].

3.5. Magnézium-oxid

Fekete lecsapódásként jelentkezik a varraton és annak környezetében. Ezt a szennyeződést alumínium és magnézium oxid alkotja. Melyek az alapanyagból és a hozaganyagból gőzölnek el a hegesztési ív alatt és az alacsonyabb hőmérsékletű varrat körüli felületeken lecsapódnak alumínium vagy magnézium-oxid formájában [11].

A magnézium veszteség mérhető a hegesztés során. Ha a lerakott hegesztési varratot kémiai elemzést végzünk, mindig kevesebb magnéziumot találunk benne, mint a hozaganyagban, néha akár fél százalékkal is kevesebbet [11].

A kulcsa annak, hogy csökkentsük a hegesztés során a szennyeződést a megfelelő gázvédelem kialakítása a varrat körül, szinte kivétel nélkül. Ezt a következők betartásával érhetjük el:

- a leggyakoribb hiba, amit a hegesztők elkövetnek, hogy túl nagy gázterelő-munkadarab távolságot alkalmaznak. Ideális esetben ez a távolság TIG és MIG esetén nem lehet több mint $5/8\text{ in}$ ($18,8\text{ mm}$). Ha ez a távolság túl nagy a varrat kormos lesz,
- a másik fontos változó a pisztoly vezetés szöge. Mind a TIG, mind a MIG esetében toló pisztolymozgást kell alkalmazni. Ha a pisztolyt húzzuk a varrat fekete lesz. Másik

szélsőséges eset, mikor túl nagy pisztolyvezetési szöget alkalmazunk, így emiatt lesz a varrat szennyezett. Ebben az esetben a nagy pisztoly szög Venturi hatást válthat ki, ami során levegő fog bekeveredni a védőgázunk közé,

- egyéb tényezők is okozhatnak szennyeződést, mint pl. szennyezett védőgáz, visszamaradt szénhidrogének a hegesztés felületén vagy szennyezett hozaganyag [11].

A szennyeződés nem csökkenti a varrat mechanikai tulajdonságait. Azonban egy korommal borított varrat rossz gázvédelmet jelez, magasabb gázporozitást tartalmazhat a rossz gázvédelem okán [11].

4. Lehetséges hegesztési eljárások összefoglalása

Az alumíniumhabok hegesztése mind ömlesztő, mind sajtoló hegesztési eljárásokkal lehetséges. Olyan különböző eljárásokkal készültek már hegesztési kísérletek, mint:

- TIG hegesztés,
- AFI hegesztés,
- plazmahegesztés,
- lézersugaras hegesztés,
- elektronsugaras hegesztés,
- hidegsajtoló hegesztés,
- dörzshegesztés,
- diffúziós hegesztés,
- ellenállás-tompahegesztés[12].

Az eljárások alkalmazhatósága annak a kritériumnak a függvénye, miszerint szükséges-e biztosítani a varratban a nyitott cellás szerkezetet vagy sem [12].

4.1. Ívhegesztési eljárások

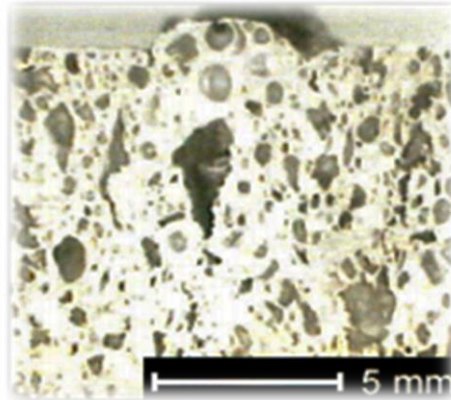
Az ilyen eljárásokkal készített kötések nem teljes beolvadásúak. A varratban részlegesen biztosítható a nyitott cella szerkezet. Ez a nem teljes keresztmetszetű beolvadás elegendő a terhelések átvitelére. Ilyen varratok készíthetők TIG, MIG és plazmahegesztéssel. Egy TIG eljárással készített kötés látható az (3. Kép) alábbi képen [12].



3. Kép
TIG hegesztéssel készített kötés beolvadó alátétlemez alkalmazásával

Lézersugaras hegesztés

A lézersugaras hegesztéssel kialakított kötések esetében lehetséges a porózus és zárt szerkezet is. A tömör varratok kialakítása csökkenti az alumíniumhab egyik nagy előnyét, ami a könnyedségéből adódik, így ilyen varratokat csak nagy méretű szerkezetek esetében érdemes használni. Az előnyösebb nyitott cellás varrat kialakítása esetében szükségünk van habosító szerek adagolására a varratfürdőbe, amik biztosítják a porózus szerkezetet [12].



4. Kép
Porózus varrat keresztmetszet [12]

4.2. Sajtoló hegesztési eljárások

Az ilyen eljárások során biztosítani kell a hab megfelelően biztos rögzítését, amellet hogy annak szerkezete nem roncsolódik [12].

Dörzshegesztés

A hagyományos forgó mozgású dörzshegesztés alkalmazása problémás, a munkadarab a megfogóban megroppan, eltörik vagy akár kihajlik. Megfelelő megfogással a rezgőmozgású dörzshegesztés alkalmazható, illetve forgógyűrűs dörzshegesztés is alkalmas lehet. A lineáris dörzshegesztés is alkalmazható, nem csak homogén hanem heterogén kötések létesítésére is [12].

Ellenállás tompahegesztés

Kisebb keresztmetszetek esetében a zömítő tompahegesztés alkalmazható. Nagyobb keresztmetszet esetében pedig a leolvasztó tompahegesztést érdemes használni [12].



5. Kép
Ellenállás tompahegesztéssel készített kötés [12]

5. Összegzés

Mivel a hegeszteni kívánt anyag szerkezete porózus, légüres cellákból épül fel, melyek fala igen vékony fontos a minél kisebb hőbevitelű hegesztő eljárás alkalmazása. Az ömlesztő eljárások közül alumínium esetében a két, jelenleg az iparban legelterjedtebb hegesztő technológia a fogyóelektródás semleges védőgázos ívhegesztés (MIG) és a volfrámelektródás semleges védőgázos ívhegesztés (TIG). E két eljárás közül lenne érdemes választani a kisebb szakaszenergiáját, hogy elkerüljük az alumíniumhab összeroskadását a hegesztés során.

Az ívhegesztési eljárások két fő paramétere az áramerősség (I) és az ívfeszültség (U). Ennek a két értéknek a meghatározása lenne a fő feladat, mivel főleg ezektől a paraméterektől függ a hőbevitel. Ha a hőforrás koncentrátsága növekszik: csökken a megolvasztásig eltelt idő, így növelhető a hegesztési sebesség. Ezeket együttvéve a bevitt hőmennyiség és ebből fakadóan a szakaszenergia is csökken [8].

A Q hőbevitelt a következő összefüggéssel (1) lehet kiszámítani:

$$Q = k \frac{U I}{v} 10^{-3} \text{ [kJ/mm]} \quad (1)$$

ahol, k a hegesztési eljárás termikus hatásfoka, U , V -ban, I , A -ben a fentebb említett villamos paraméterek, v pedig a hegesztési sebesség mm/s -ban.

A semleges védőgázos ívhegesztés esetében a termikus hatásfok $0,6$, ezzel szemben a fogyóelektródás semleges védőgázos ívhegesztés termikus hatásfoka $0,8$. Mivel az utóbbi eljárás termikus hatásfoka lényegesen nagyobb, így a fentebb említett okokból ez az eljárás alkalmasabb lehet a kísérletek elvégzésére [8].

A hegesztési áramerősség (I), feszültség (U) és sebesség (v) megválasztása során olyan beállításokra kell törekedni, hogy a hőbevitelt minél inkább leszorítsuk. Ez lehetséges lehet egy alapvetően alacsony áramerősséggel, és a mai hegesztő gépek esetében alapvető funkcióval az áramerősséghez tartozó ív feszültség negatív irányban való változtatásával addig, amíg az ív stabilitása még elfogadható.

Irodalomjegyzék

- [1] <http://www.oica.net/category/production-statistics/2016-statistics/> [Megtekintés: 22-Szept-2018].
- [2] Juergen R. Hirsch: Recent development in aluminium for automotive applications [Online]. Elérhető: https://www.researchgate.net/publication/265129257_Recent_development_in_aluminium_for_automotive_applications [Megtekintés: 24-Szept-2018].
- [3] <https://automotivemanufacturingsolutions.com/process-materials/blend-ambition> [Megtekintés: 26-okt-2018]
- [4] <https://www.aluminiumleader.com/application/transport/> [Megtekintés: 5-okt-2018]
- [5] Kádár Csilla, Kenesei Péter: NAPJAINK KORSZERŰ ANYAGAI: A FÉM HABOK [Online]. Elérhető: <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0807/kadar0807.html> [Megtekintés: 24-Szept-2018].
- [6] Orbulov Imre Norbert: Szintaktikus fémhabok, PhD-értekezés
- [7] Goga Vladimír: Testing and Application of New Phenomenological Material Model for Foam Materials [Online]. Elérhető: <http://www.posterus.sk/?p=3923> [Megtekintés: 21-okt-2018].
- [8] Dr. Szunyogh László, főszerkesztő: Hegesztés és rokon technológiák kézikönyv
- [9] Dr. Komócsin Mihály: Anyagok hegeszthetősége [Online] Elérhető: https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013_anyagok_hegeszthetosege/1_acelok_gyartasa_es_jelolesi_rendszere.html [Megtekintés: 9-szept-2018]
- [10] <http://hegpont.hu/aluminiumhegesztes/> [Online] [Megtekintés: 25-szept-2018]
- [11] Frank Armao: How to recognize, minimize weld smut [Online]. Elérhető: <https://www.thefabricator.com/article/aluminumwelding/how-to-recognize-minimize-weld-smut> [Megtekintés: 26-Szept-2018].
- [12] Prof Dr. Bolshakov Michail, Dr. Németh Árpád, Nyári Péter, Dr. Palotás Béla: Fémszivacsok hegesztése, Hegesztés technika, XVI. évfolyam 2005/1

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00014 pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával valósult meg.