

Miskolci Egyetem
Gépészmérnöki és Informatikai Kar
Mechanikai Technológiai Tanszék

Alumínium ötvözetek hideghuzalos, impulzus ívű AWI hegesztése

Készítette: Móricz Péter György

Szak: gépészmérnöki MSc, Hegesztéstechnológia szakirány

Tankör: Gx2MHT

Neptun-kód: EKWV1X

Konzulens: Dr. Török Imre egyetemi docens



Miskolc, 2012.

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	2
Bevezetés	3
1. Járműipari szerkezetek fejlődése a századforduló környékén	4
2. Alumínium, mint alapanyag	7
2.1. A kísérlethez használt alumínium ötvözet	8
2.1.1. Repedésérzékenységi hajlam	9
2.1.2. Oxidhártya jelenléte	9
2.1.3. Nem megfelelő hegesztési sorrend	9
2.1.4. Védőgáz mennyisége	9
2.1.5. Különböző vastagságú alapanyagok	10
2.1.6. Porozitási hajlam	10
3. A kísérleti hegesztéshez alkalmazott hegesztő eljárás	11
3.1. Hideghuzalos, impulzus ívű AWI	11
3.1.1. Áramnövelés, áramcsökkentés	13
3.1.2. Ívbalansz	13
3.1.3. Impulzusvezérlés	13
3.1.4. Váltakozó áram frekvenciája	14
3.2. Gépesített hegesztés körülményei	14
3.2.1. Hegesztő áramforrás	15
3.2.2. Huzalelőtoló berendezés	16
3.2.3. Hegesztőkészülék	17
4. Végrehajtott hegesztési kísérletek	18
Összegzés	25
Irodalomjegyzék	26

Bevezetés

A modern kor társadalma megnövekedett igényeket támaszt a tömegközlekedéssel szemben. Ugyanakkor láthatjuk, hogy a világ minden területén nagy hangsúlyt fektetnek az innovációra, így a fejlesztés elengedhetetlen területe a személyszállítás, annak minden része. A gazdaságosság, környezettudatosság meghatározza a tervezők munkáját, törekedniük kell a kor igényének megfelelő termékek előállítására. A járműipar a szerkezetek teherbírását, tömegét, élettartamát és gazdasági előnyeit tartja szem előtt. A XX. század legelterjedtebb alapanyaga az acél volt, melyet a XXI. század modern technológiái igyekeznek a legnagyobb mértékben kiváltani könnyebb, nagyobb teherbírású anyagokkal. Ennek egyik leginkább kiemelt része az alumínium ötvözetek alkalmazása, főként az autóipar és a vasúti járműgyártás alkalmazza markánsan.

A járműiparban alkalmazott szelvények hegesztését különböző eljárásokkal el lehet végezni, de törekedni kell a legmodernebb, leghatékonyabb eljárásváltozatok megismerésére, elsajátítására és alkalmazására. Az AWI hegesztés már egy elég széles körben elterjedt és sikeresen alkalmazott eljárás. Használható akár vékonylemezek hegesztésére is, így a választásunk a 2 mm vastag lemezek hegesztésének vizsgálatára irányul. Ez a méret a járműiparban elterjedten alkalmazott burkolatok és különböző hegesztett szerkezeti elemek gyártására járatos. Az impulzus ív alkalmazása lehetővé teszi azt, hogy a túlhevült anyagrészeknél a hegömladék ne roskadjon át, mivel egy, a megolvasztásért felelős csúcsáram után mindig egy alapáram következik, ami a megfelelő hűtést biztosítja úgy, hogy közben az ív nem alszik ki. A varrat így jól elkülöníthető pikkelyek sorozatából áll, melynek egymásutániságát az impulzus frekvenciája szabja meg. Exogén hegesztés esetén a hozaganyag adagolható kézzel és gépesítve is. A tömeggyártás, a legjobb varratminőség és a jó reprodukálhatóság érdekében a hegesztést célszerű gépesíteni, melyhez hideghuzalos hozaganyag adagolást szoktak alkalmazni.

A dolgozatunkban célunk ezen eljárásnak az alkalmazását bemutatni, és megkeresi az optimális paramétereket a legjobb kötés eléréséhez, valamint ajánlást is tenni a legjobb kötéstípus kiválasztásához.

1. Járműipari szerkezetek fejlődése a századforduló környékén

A személyszállítás világszerte több ágazatra oszlik, ennek két csoportját tartjuk kiemelten kezelendőnek. Az egyik a személygépjárművek, a másik pedig bármely sínpáron futó személyszállító járművek csoportja. A személygépjárművek fejlesztését sokkal nagyobb ráfordítással végzik, mint a sínpáron futó járművek fejlesztését, ellenben az élettartam, melyre tervezik a különböző szerkezeteket, már ellentétes irányt mutat. Míg a mai kor modern embere általában 5-8 évente cseréli le személygépjárművét, addig a tömegközlekedéssel foglalkozó vállalatok akár több évtizedig is ugyanazt a szerelvényt közlekedtetik.

A személygépjárművek technikai csúcását a versenysport képviseli. Manapság itt már a szerkezeti elemek nagy része polimer és kompozit. Az 1970-es években jelentek meg az alumínium ötvözetek és a nagy teherbírású, kis sűrűségű anyagok hegesztett szerkezeti elemek alapanyagaként. A személyszállító szektorban a korrózióálló acélok és az alumínium ötvözetek alkalmazása kevéssel a századforduló előtt kezdett elterjedni. Széles körű alkalmazásról, a legtöbb hegesztett szerkezeti elemhez ilyen alapanyag felhasználásról csak manapság tudunk beszélni. A gépjárművek vázszerkezete és burkolatai készülnek alumínium ötvözetekből vagy korrózióálló acélokból. Az 1. ábra egy személygépjármű vázának alumínium ötvözetből készült elemeit mutatja be.



1. ábra Személygépjármű vázának alumínium ötvözetből készült elemei

A sínpáron futó járművek esetén a felhasznált alapanyagok terén csak a XXI. század elején lehet felfedezni széleskörű innovációt. Ebben a szektorban a járműszerelvények cseréje a nagy költségek miatt nem olyan nagy tempójú, mint a személygépjárművek esetén, de a fejlesztések lépcsői között sokkal nagyobbak a különbségek. A következőkben a nagyvasúti vasúti kocsik szerkezetkialakításának fejlődéstörténetét mutatom be.

A hagyományos nagyvasúti kocsi szerkezetkialakítását tekintve önhordó típusú. Ennek felépítése acéllemezekből vágott és hajlított, hegesztett bordázatra épül. Hegesztéssel, termikus ráfeszítéssel, egyengetéssel rögzítik hozzájuk az acéllemezeket. Erre egy példát mutat a 2. ábra.



2. ábra Termikus ráfeszítéssel készített kocsi oldalfala [1] [7]

Ezen felépítmények komoly előkészítéssel elvégzett felületkezelést, korrózióvédelmet igényelnek. Mivel a szerkezetet felépítő acél nagy sűrűségű, ezért a teljes össztömeg is jelentős.

Az alumínium sűrűsége jóval kisebb (2700 kg/m^3), mint az acélé (7850 kg/m^3). Ezt kihasználva az 1980-as évektől kezdve alumíniumból is építették ezeket az önhordó kocsi vázakat. Az 1990-es évekig különböző hegesztő eljárásokat, valamint csavarkötést alkalmaztak a kötések létrehozásához. Ebben az időben kezdték el fejleszteni és alkalmazni a térbeli felépítésű vázszerkezeteket.

Alumíniumból készítettek húzott profilokat speciálisan a vasúti közlekedésben alkalmazott kocsi szerkezetek gyártásához. Ezek a panelek bordákkal erősített, előre legyártott, tudatos mérnöki tervezőmunka eredményei. Az 1990-es évek végén, a 2000-es évek elején az Amerikai Egyesült Államokban kezdett elterjedni az előre elkészített panelekből, csak hegesztést alkalmazva készített szerkezetek gyártása.

A térbeli szerkezetek fő jellemzői:

- az alváz, az oldalfal és a tető, mint fő darabok építése külön történik;
- a kész egységek egyesítése pedig hegesztéssel.

A 3. ábrán egy térbeli szerkezettel rendelkező kocsiszekrény látható.



3. ábra Készre hegesztett kocsiszekrény [1] [7]

Az így elkészített szerkezetek mind szilárdságtanilag, mind esztétikailag és a vásárló által támasztott egyéb követelményeknek is megfelelnek. Ilyen elvárások lehetnek, hogy a kocsi alkalmas legyen hálófülkés, étkezőkocsi kialakításra, valamint legyen benne illemhelyiség. Külön kérésre a kocsi szerkezet elkészíthető úgynevezett „panorámakocsi”-s felépítésben is, amelynél a tetőben nagyméretű üveg felületeket helyeznek el, amivel az utazás komfortfokozatát lehet növelni.

2. Alumínium, mint alapanyag

Dolgozatunk témája az alumínium ötvözetek hegesztése. A vékonylemezek közül a 2 mm vastag lemezt választottuk kísérleteink alapanyagaként, mert ez a vastagság gyakran alkalmazott a sín pályán futó járművek szerkezetkialakításában.

Az alumíniumból készített húzott profilok általában nagyobb szelvényvastagságúak, mint 2 mm, de a hegesztett kötések a legtöbb esetben vékonyabb szelvényméretű részekre kerülnek. Ennek indoka az, hogy ezen esetekben könnyebb az optimális varratkialakítást elkészíteni, valamint a megfelelően megtervezett varratkialakítás szavatolja a megfelelő kötésszilárdságot. A leggyakrabban alkalmazott kötéstípus a tompakötés alátétlemezzel vagy tompakötés gyöktámasszal, amit tulajdonképpen alátétlemezes tompavarratként is lehet értelmezni. Az alátétlemez vagy a gyöktámasz beolvadó elem, így a varrat teljes szelvénymérete elég nagy a megfelelő kötésszilárdsághoz. Az így tervezett varratokhoz a segédanyag mennyisége jóval kevesebb, mintha vastag szelvényméretű profilokat hegesztenénk össze.

Az alumínium ötvözetek felhasználásával készült félkész- vagy késztermékek előállításához igen sokféle ötvözet áll rendelkezésre. Az egyes ötvözetek egymástól eltérő tulajdonsággal rendelkeznek, így az adott feladathoz optimális ötvözet kiválasztásához mind a tervezőnek mind a gyártónak jól kell ismernie a különböző alumínium ötvözeteket és tulajdonságaikat. A szinalumínium gyakorlati alkalmazása nem túl elterjedt, így a mérnökök az esetek túlnyomó részében a különböző ötvözeteket alkalmazzák. Az ötvözők különböző tulajdonságaik révén különböző hatást váltanak ki. Ezeket tulajdonságaik szerint az alábbi csoportosítás szerint említik a gyakorlatban:

- szilárdságnövelő ötvözők: Cu, Mg, Si,
- korrózióállóságot fokozó ötvözők: Mn, Sb,
- szemcsefinomító ötvözők: Ti, Cr,
- hőszilárdságot növelő ötvözők: Ni,
- forgácsolhatóságot javító ötvözők: Co, Fe, Be [2].

Az alumínium ötvözetek száma rendkívül nagy, így jelölésükre egyaránt alkalmazunk számjelölést és vegyjelölési rendszert. Ezeket fő ötvözőelemeik szerint csoportosítja az MSZ EN 573-1-es számú szabvány:

<i>tiszta alumínium</i>	1xxx	(1000 jelű sorozat)
<i>Cu- ötvözésű</i>	2xxx	(2000 jelű sorozat)
<i>Mn- ötvözésű</i>	3xxx	(3000 jelű sorozat)
<i>Si- ötvözésű</i>	4xxx	(4000 jelű sorozat)
<i>Mg- ötvözésű</i>	5xxx	(5000 jelű sorozat)
<i>Mg és Si- ötvözésű</i>	6xxx	(6000 jelű sorozat)
<i>Zn- ötvözésű</i>	7xxx	(7000 jelű sorozat)
<i>egyéb pl. Li- ötvözésű</i>	8xxx	(8000 jelű sorozat)
<i>egyéb</i>	9xxx	(9000 jelű sorozat)

1. táblázat Az Al-ötvözetek csoportosítása fő ötvözőelemeik alapján [13]

Néhány, gyakorlatban is alkalmazott alumínium ötvözet számjeles, rövid jeles és vegyjeles jelölését tartalmazza a 2. táblázat:

Számjel	Rövid jel	Vegyjeles teljes jelölés
1050	Al99,5	EN AW-Al 99,5
1080	Al99,8	EN AW-Al 99,8
1450	Al99,5Ti	EN AW-Al 99,5Ti
2014	AlCu4SiMg	EN AW-Al Cu4SiMg
2017	AlCu4MgSi	EN AW-Al Cu4SiMg (A)
2024	AlCu4Mg1	EN AW-Al CuMg1
3003	AlMn1Cu	EN AW-Al Mn1Cu
3004	AlMn1Mg1	EN AW-Al Mn1Mg1
3103	AlMn1	EN AW-Al Mn1
4032	AlSi12Mg	EN AW-Al Si2,5MgCuNi
5005	AlMg1	EN AW-Al Mg1
5251	AlMg2	EN AW-Al Mg2
5754	AlMg3	EN AW-Al Mg3
5086	AlMg4	EN AW-Al Mg4
5019	AlMg5	EN AW-Al Mg 5
5083	AlMg4,5Mn	EN AW-Al Mg4,5Mn0,7
6003	AlMg1Si	EN AW-Al Mg1Si0,8
6015	AlMgSi0,3Cu	EN AW-Al Mg1Si0,3Cu
6060	AlMgSi	EN AW-Al MgSi
6061	AlMg1SiCu	EN AW-Al Mg1SiCu
6063	AlMgSi0,5	EN AW-Al Mg0,7Si
6082	AlMgSi1	EN AW-Al Si1MgMn
7039	AlZn4Mg3	EN AW-Al Zn4Mg3
7075	AlZn6Mg2Cu1	EN AW-Al Zn5,5MgCu

2. táblázat Fontosabb alumínium ötvözetek jelölései [2]

Külön kiemelve a táblázatban a kísérletünkhöz alkalmazott AlMgSi ötvözet található, melyet az alábbi tulajdonságok jellemzik:

2.1. A kísérlethez használt alumínium ötvözet [3]

Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Cr [%]	Zn [%]	Ti [%]
0,9	0,09	0,08	0,43	0,9	0,04	0,09	0,03

3. táblázat Alumínium ötvözet vegyi összetétele

Mechanikai tulajdonságai az alábbiak: [3]

R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅₀ [%]
251	159	21

4. táblázat Alumínium ötvözet mechanikai tulajdonságai

Az ötvözet hőkezeltségi állapotát tekintve a T6-os kategóriába tartozik. Erről a rendelkezésre álló szabvány(MSZ EN 515) annyit ír, hogy „*oldó hőkezelésnek alávetett, mesterségesen öregített állapot. Ez olyan termékekre vonatkozik, amelyek esetében az oldó hőkezelést nem követi hidegalakítás, illetve amikor a simító vagy egyengető hidegalakítás hatása észrevehető a mechanikai tulajdonságokban*”. [3]

Ezen ötvözet hegesztését több, speciálisan alumíniumra és ötvözeire jellemző nehézség is hátráltatta. Az alapanyagban hegesztés közben lejátszódó metallurgiai folyamatok, a környezettel való kölcsönhatások és a hegesztő eljárások hordoznak magukban különböző hibalehetőségeket. Ezeket a hibalehetőségeket ismerni kell olyan szinten, hogy bármely hegesztő szakember fel tudja ismerni, valamint arra alkalmas varratvizsgálatokkal ki tudja mutatni. Fontos tenni a hibák megelőzéséért és a már meglévők pontos kijavításáért. Ezen hibalehetőségeket a következők: [1]

2.1.1. Repedésérzékenységi hajlam: ezek a hegesztett kötések tönkremenetelének egyik legveszélyesebb és egyben legelkerülendőbb hibaformája. Alumínium és ötvözeinek hegesztése során hideg- és melegrepedésről beszélhetünk. A repedésérzékenységet lehet csökkenteni a hegesztendő ötvözethez megfelelően kiválasztott hegesztő huzal vagy pálcá összetétele mellett (ötvözők, szemcsefinomítók), a hegesztési körülmények (munkadarab megfogása, kötés kialakítása, hőhatás szélessége, hegesztett darab méretei), valamint a hegesztéstechnológia (bevitt hőmennyiség, hegesztési sebesség, hegesztési eljárás) helyes megválasztásával. [9].

2.1.2. Oxidhártya jelenléte: kialakulásának oka az alumínium oxigén iránti nagy affinitása, ami a felületen kialakuló, összefüggő Al_2O_3 oxidréteg formájában válik láthatóvá. Az oxidréteg leghatékonyabb eltávolítási módszere az argon védőgáz burokból végrehajtott katódporlasztás. Ez az oxidbontási módszer sikeresen alkalmazható argonvédőgázos volfrámelektrodos, illetve fogyóelektrodás ívhegesztésnél. [1]

2.1.3. Nem megfelelő hegesztési sorrend: a hegesztési sorrend megfelelő megválasztása esetén a munkadarab alakváltozásai szabályozottan mehetnek végbe. A zsugorodások, vetemedések és deformációk keletkezését meg lehet akadályozni, vagy csekély mértékűre lehet szorítani. Ha nem megfelelő a hegesztési sorrend, akkor a munkadarabban ébredő feszültségek maradós alakváltozást okozhatnak, melyek befolyásolják a méretpontosságot. Ezeket a feszültségeket egyenletes eloszlásúvá kell módosítani. Ezt hőbevitellel, egyengető varratokkal lehet elvégezni. [1]

2.1.4. Védőgáz mennyisége: a védőgáz kiemelt szerepet tölt be az alumínium hegesztésénél. Az oxidréteg bontásakor az oxid újbóli kialakulását, valamint a volfrámelektrod eléégését is megakadályozza. A védőgáz tisztasága, nem megfelelő mennyisége befolyással van az elkészülő varrat szennyezettségére és porozítására is. Mindig törekedni kell az előzetesen meghatározott védőgáz összetétel, tisztaság és mennyiség megtartására, mert csak így garantálható a varrat optimális minősége. [1]

2.1.5. Különböző vastagságú alapanyagok: a hegesztett kötések létrehozásakor lehet olyan eset, ahol eltérő szelvényméretű alapanyagokat kell összehegeszteni. Ezek különböző mértékű hővezető tulajdonsággal rendelkeznek, így felléphet olyan eset, ahol a hegesztés során a beolvadás és a hőhatásövezet méretei eltérőek a varrat keresztmetszetében, vagy a hűlés során a deformáció nem szimmetrikus a varrat hossztengetyére. Ezen problémák elkerülésére az alapanyagokat elő kell melegíteni (alumínium esetén 120-180°C) vagy az eltérő zsugorodások elkerülése érdekében a megfelelő munkadarab-rögzítés lehet a helyes megoldás. [1]

2.1.6. Porozitási hajlam: A fémek és ötvözeinek – közöttük az alumínium és ötvözeik – gázoldó képessége és mértéke eltérő. Az alumínium és ötvözeinek hegesztése során gondot okozó gázok közül meghatározó a hidrogén. A porozitás keletkezése a varratfém lehűlése során megy végbe, az olvadékban oldott hidrogén nem tud kijutni a varratból a megszilárdulás alatt. A folyamatosan csökkenő hőmérsékletű varratfém hidrogénoldó-képessége csökken, de az oldott gáz kiválása lassabban megy végbe. A varrat tényleges hidrogénfelvételét a környezet hidrogéntartalma és annak parciális nyomása határozza meg. A gyártónak minden esetben törekednie kell a minél ideálisabb környezet kialakítására, azaz az állandó páratartalmú levegőre, a megfelelő tisztaságú védőgáz biztosítására, a megfelelő tisztaságú felületre és a kellő ötvöztartalommal rendelkező hozaganyag használatára.[5]

A kísérletsorozatban alkalmazott alapanyag hegesztésénél az előbbieken ismertetett hibaforrásokat igyekeztünk a legnagyobb körültekintéssel elkerülni. A repedésérzékenység egyik fő oka esetünkben az alapanyag Si tartalma, melyet a hozaganyag (AlSi5) helyes megválasztásával, a hűlés során keletkező repedéseket, vetemedéseket, deformációkat pedig egy kellően merev befogást biztosító hegesztő készülék alkalmazásával igyekeztünk minimális mértékűre csökkenteni. Az oxidhártya bontását a megfelelően megválasztott hegesztési eljárás (hideghuzalos, impulzus ívű AWI) biztosította. A hegesztési sorrend esetünkben elhanyagolható, mivel minden kísérlet során egy hosszvarrat készült. A védőgáz tisztaságát a védőgáz beszállítója, valamint a hegesztő berendezés megfelelő fokú tisztasága garantálta. Az anyagvastagság-különbségekből fakadó hibákat úgy kerültük el, hogy minden kötésben az alapanyagok egyaránt 2-2 mm vastagságúak, így nem kellett tartanunk az ebből fakadó hibáktól. A kötések porozitásának mértékét a gondos felület-előkészítés, a tisztaságra való törekvés valamint a felületen való nedvesség megtapadásának meggátolása csökkentette, de mivel nem lehet ideális körülményeket előállítani, így csak törekedni tudtunk ennek elérésére.

3. A kísérleti hegesztéshez alkalmazott hegesztő eljárás

Az alumínium ötvözetek hegesztését több eljárással is el lehet végezni. Termelékenység szempontjából a *védőgázos, fogyóelektrodás ívhegesztés* (13x) lenne a legoptimálisabb választás, azonban kísérletünkben a hangsúly a vékonylemez alkalmazásán van, így a jobban szabályozható hőbevitel miatt az előzetesen kiválasztott alapanyaghoz a hideghuzalos, impulzusívű AWI hegesztést választottuk. Korunk egyik legmodernebb ömlesztőhegesztő eljárása, ami lehetővé teszi a legtöbb hegesztő pozícióbeli hegesztést, valamint a kész munkadarabok méretpontosságát is figyelembe véve, a megfelelő reprodukálhatóságot biztosítja. A következőkben be kívánjuk mutatni ezt az eljárást a főbb sajátosságával, valamint megindokoljuk, hogy miért erre esett a választásunk a kísérletsorozatunk elkészítése előtt.

3.1. Hideghuzalos, impulzus ívű AWI

A hegesztő eljárások csoportokba sorolását az *MSZ EN ISO 4063* (Hegesztés és rokon eljárások. A hegesztési eljárások megnevezése és azonosító jelölésük.) szabvány tartalmazza. Ebben a semleges védőgázos volfrámelektrodos ívhegesztés (SWI) az 1-es főcsoport, 4-es alcsoportját teszi ki (14x). [14]

Az argon védőgázban égő ív sajátosságai függenek:

- hegesztendő alapanyagtól,
- az alkalmazott áramnemtől és polaritástól.

Az argon védőgázos volfrámelektrodos ívhegesztés (AWI) sokféle alapanyag hegesztéséhez alkalmazható, legnagyobb jelentősége és felhasználása az alumínium és ötvözeiteinél van. A volfrámelektrod és az alumínium között égő villamos ív különböző áramnemek és polaritások esetén különböző tulajdonságokkal bír.

Az egyenáram, egyenes polaritás, egyenáram, fordított polaritás és a váltóáram alkalmazása különböző sajátosságaik miatt más és más esetben indokolt. Az alábbi 5. táblázat e három áramnem és polaritás tulajdonságait hasonlítja össze. [10]

Tulajdonság	Egyenáram, egyeses polaritás	Egyenáram, fordított polaritás	Váltakozó áram
anód	alapanyag	volfrámelektrod	félperiódusonként váltva
katód	volfrámelektrod	alapanyag	
hő eloszlása	70-30% az alapanyag javára	70-30% a volfrámelektrod javára	50-50%
varratgeometria	mély beolvadás, keskeny varratszélesség	sekély beolvadás, széles varrat	ideális
elektrod áramterhelhetősége	kedvező	csekély	közepes
oxidbontás	nem lehetséges	könnyen eltávolítható az oxidréteg	félperiódusonként oxidbontás
alkalmazás	vas-, nikkel-, titán- és rézbázisú fémek hegesztése	vékony lemezek, csövek hegesztése	alumínium, magnézium és ötvözetek hegesztése

5. táblázat Áramnemek és polaritások tulajdonságai

Az AWI hegesztés különleges eljárásváltozatai közül meghatározó az impulzus (modulált) ívű AWI hegesztés. Fontos különbséget tenni a hegesztőáram szabályozása és modulációja között. Az áramszabályozás funkciója a folyamat stabilitásának fenntartása a külső, zavaró hatások kiszűrésére. A moduláció célja pedig a hegesztőáram értékének szándékos változtatása valamilyen technológiai cél érdekében.

A modulált ívű AWI eljárásnak az alapelve, hogy a hegesztőáram nem állandó, hanem előre beállított áramszintek között meghatározott frekvenciával lüktet polaritásváltás nélkül, egy viszonylag kis alap- és egy nagy impulzusáram között. Az áram időbeli változtatásának a célja a hegfürdő szabályozása. A modulált ívvel a nagy áramok idején mélyen bemező, míg a kis áramok idején gyorsan dermedő fürdőt lehet létrehozni.

A nagy csúcsáram hatására, a nagy ívnyomás segítségével a megolvadó alapanyagba a hegfürdő mélyen beolvad. A folyékony varrat közel gömbszelet alakot vesz föl. A csúcsáram idején megolvastott ömledék a kisteljesítményű, alapáramú időszakaszban a viszonylag hideg, szilárd alapanyag hőelvonásának hatására gyors dermedésnek indul. A hegesztőívet a csúcs- és az alapáram idején is azonos hegesztési sebességgel vezetik az alapanyaghoz képest. Így érhető el, hogy az alapáramot követő újabb csúcsáram már a varrat irányában előrehaladva, egy másik pontban olvasztja meg az alapanyagot. A kialakuló, egymást részben átfedő gömbszelet alakú ömledékek sorozatával hozható létre a varrathernyő.

Az ív modulálásával az alapáram és a csúcsáram értékeit lehet beállítani, módosítani. Szélesebb variációs tartomány érhető el, ha a fentebb említett két paraméter mellett az alap- és a csúcsáramidők értékét is változtatjuk. Ezáltal az elkészítendő varrat beolvadási mélysége és alakja is jól szabályozható. [10]

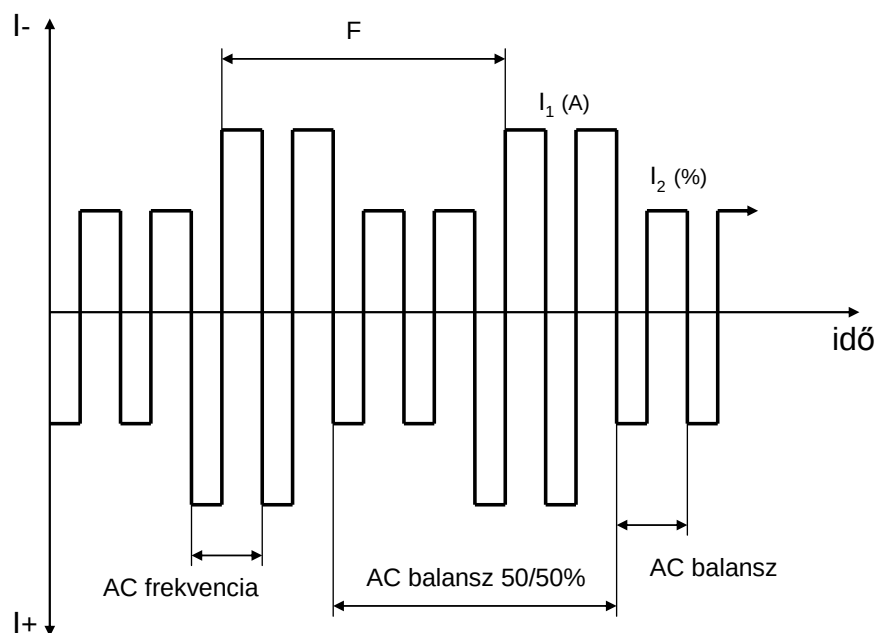
A váltakozó áramú, modulált ívű hegesztőeljárás kiterjesztette az argon védőgáz, volfrámelektrodos ívhegesztés alkalmazási lehetőségeit a finomlemezek tartományára. A gépesített változattal nagyon kis szelvényméretek is hegeszthetők kiváló minőségben, nagyon jó reprodukálhatósággal. A legkisebb hegeszthető szelvényméret alumínium és ötvözetek esetén 0,5 mm. Az eljárással kellően mély

beolvadás érhető el anélkül, hogy a munkadarab vetemedne. Ennek elérése érdekében több, egymással összefüggő paraméter kapcsolatára is figyelni kell:

3.1.1. Áramnövelés, áramcsökkentés: a hegesztés megkezdésekor a volfrám szál terhelésének csökkentése érdekében egy előre beállított idő alatt kell elérni a hegesztőáram értékén és megszüntetni azt, a hegesztés befejezésekor pedig a végkráter feltöltése érdekében a hegesztő áramot nem azonnal kell nullára csökkenteni.

3.1.2. Ívbalansz: az elektromos ív periodikusságát a mai modern gépekkel könnyen befolyásolhatjuk. Manapság a gépek többsége úgynevezett négyszöghullámú váltakozó feszültséget képez, ami lehetővé teszi, hogy a két félperiódus arányát változtassuk. Ha az elektród szempontjából a negatív félperiódus (egyenés polaritás) arányát növeljük, megnő a hőbevitel és a beolvadási mélység, de csökken a felületi tisztító hatás. Ha a pozitív félperiódus (fordított polaritás) arányát növeljük csökken a beolvadási mélység, megnő az elektród hőterhelése, de a felületi kemény oxiddal szembeni bontó hatás javul. [8]

3.1.3. Impulzusvezérlés: egyes hegesztési feladatok megoldásához elengedhetetlen a hegesztőáram értékének impulzusszerű változtatása, módosítása.



4. ábra Impulzushegesztés ciklusdiagramja váltakozó áram estén [2]

A paramétereket előre be lehet állítani analóg vagy digitális úton, de szabályozható egy megfelelő pisztollyal, amin van olyan kapcsoló, amely a két előre beállított áramszint közötti kapcsolást végzi. Az impulzushegesztéseknek több üzemmódja létezik. A hagyományos, négyszög alakú impulzusok gyakran drasztikus áramváltozásait tompítani lehet trapéz alakú impulzusok választásával, valamint váltakozó árammal is lehetséges az impulzushegesztés. [8]

3.1.4. Váltakozó áram frekvenciája: A korszerű, inverteres áramforrásokon lehetőség nyílik a hegesztőáram frekvenciájának változtatására. A frekvencia növelésével az ív koncentráltabb lesz, ezáltal:

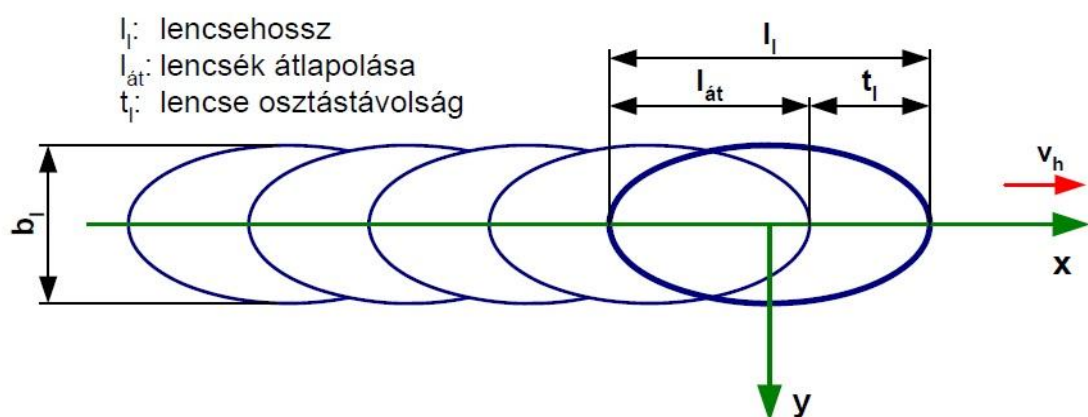
- hegesztés közben jobban kezelhető, keskenyebb varrat keletkezik,
- kis hegesztőáram mellett növekszik az ív stabilitása,
- ívoszlop keresztmetszete és a talppont mérete csökken,
- csökken az elektród hőterhelése, ezáltal növekszik az élettartama.

Megfelelő frekvencia megválasztásával lehetőség nyílik az ívbalansz beolvadást csökkentő, illetve az elektródát túlterhelő hatásának kompenzálására. [8]

Impulzusáram használatával az impulzusfrekvencia jelentősen befolyásolja a hegfürdő hőmérsékletét és az ív tulajdonságait. Háromféle frekvenciatartományt szokott a szakirodalom megkülönböztetni: [8]

- kis frekvencia: $0,1 \dots 1(3)\text{Hz}$,
- közepes frekvencia: $3 \dots 25\text{Hz}$,
- nagy frekvencia: $25\text{Hz} \dots 8\text{kHz}$.

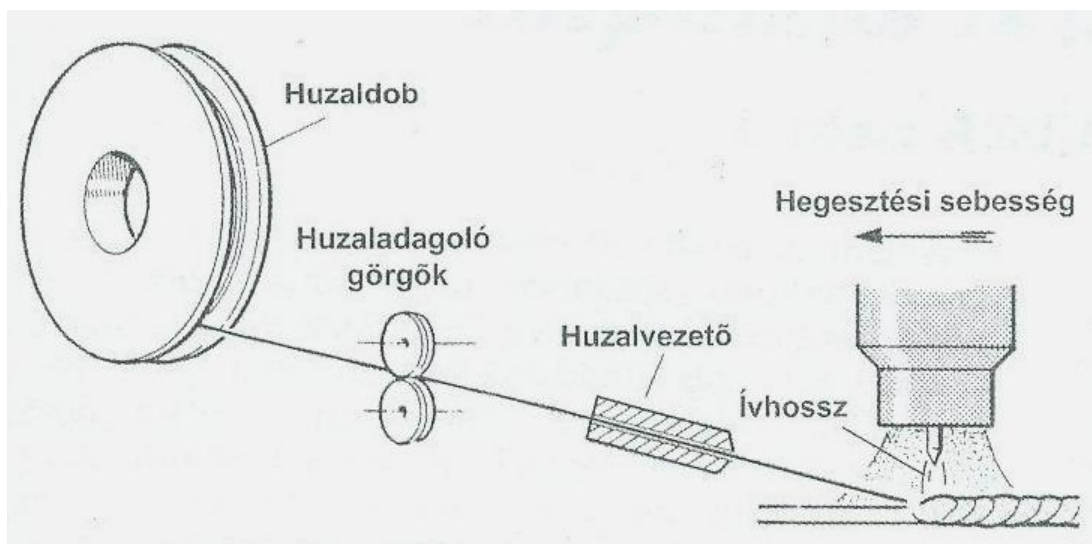
Kis frekvencia alkalmazása esetén a hegesztett kötés a helyes paraméterek hatására mintegy hegesztett pontok, lencsék sorozataként épül föl. Ennek egy sematikus képe látható az 5. ábrán:



5. ábra Varratképzés impulzusívű hegesztéssel [2]

3.2. Gépesített hegesztés körülményei

A gépesített hegesztés garantálja az állandó hegesztési sebességet, a megfelelő távolságot a munkadarab és a volfrámelektrod között, valamint a hozaganyag huzalos formájú adagolását. Ezen indokok arra a megfontolásra ösztökéltek minket, hogy a kísérleteinkhez robotkarra szerelt hegesztőfejet alkalmazzunk. Ezzel garantálni tudjuk az állandó hegesztési sebességet és a varrat egyenességét, valamint egy, külön az igényeinknek megfelelően készített hegesztőkészülék biztosította a megfelelően merev befogást és a reprodukálhatóságot. A kézi AWI hegesztéshez a hozaganyag pálcá formájú, kézzel adagolt, míg gépi hegesztés esetén huzal formájú a hozaganyag és gépesített adagolású. A kísérletünkhöz hideghuzalos egységet alkalmaztunk a huzallefejtéshez és –továbbításhoz. Ennek sematikus képe a 6. ábrán látható.



6. ábra Gépesített AWI hegesztés elrendezése [3]

A kísérlethez a hideghuzalos huzalelőtoló berendezést, a robotot és a hegesztő áramforrást a budapesti székhelyű Froweld Kft. biztosította.

3.2.1. Hegesztő áramforrás

A Froweld Kft. üzemében egy ABB típusú robotkarra volt felszerelve az impulzusívű AWI pisztoly, melynek áramforrása egy MagicWave 5000 volt, mely a 7. ábrán látható. A gyártó az alábbiakkal jellemzi a gépet:

„A MagicWave 5000 teljesen digitalizált egyen- és váltóáramú AWI áramforrás, működése az ActiveWave technológián alapul. Halk, lágy ív, de mégis nagy stabilitás jellemzi. Teljesítménye 500 A, egyszerre könnyű és erős, működtetése roppant egyszerű önüzemeltetési mód . A legkülönbözőbb helyeken használható, úgymint vegy- és gépípar, szerelés. Gyengén és erősen ötvöztött acélok és színesfémek hegesztésére alkalmas.”[6]



7. ábra Fronius MagicWave 5000 áramforrás [6]

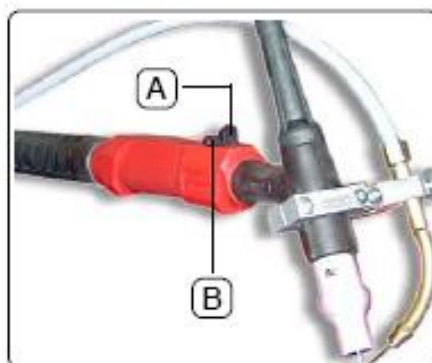
3.2.2. Huzalelőtóló berendezés



8. ábra Hideghuzalos előtoló berendezés [6]

A 8. ábrán látható hideghuzalos előtoló feladata a huzal huzaldobról való lecsévélése és továbbítása a hegesztőfej felé. A huzaldobról lecsévélte huzal a huzalvezetőbe jut, melynek csatlakozója az ábrán 1-es számmal jelzett. A 2-es sorszámmal jelzett csatlakozó a hideghuzalos AWI pisztoly kontrol kábelének csatlakoztatására szolgál. A 3-as számú potméterrel a huzalbehúzás hosszúságát lehet szabályozni. A huzal sebességének külső vagy belső szabályozására szolgál a 4-es számmal jelölt, kétállású kapcsoló. A huzal sebességének szabályozását az 5-ös számú gomb változtatásával lehet elérni. A 6-os jelű szabályozó potméterrel lehet a huzalelőtolás időintervallumát szabályozni, a 7-es jelű kapcsoló pedig ennek folytonosságát vagy szakaszosságát hivatott vezérelni. A huzalelőtölások közötti szünetidő a 8-as sorszámmal állítható be. Végül a 9-es sorszámmal LED aktív (világító) állapotával jelzi, ha a huzalelőtolás éppen üzemel.

A berendezés üzemi állapotban kétféleképpen működtethető. Ha az áramforrás robotizált, akkor a robot előre beprogramozott módon vezérel. Ha kézi üzemeltetésű a hegesztés, akkor a pisztolyról lehet elindítani a huzalelőtölést. Ebben az esetben a 9. ábrán látható pisztolyon lévő egyik gomb (A jelű) az áramforrás indítására és megállítására szolgál, míg a másik (B jelű) a huzalelőtóló indítására és megállítására.[6]



9. ábra Pisztolyon lévő gombok [6]

3.2.3. Hegesztőkészülék

A hegesztett kötések megfelelő minőségű elkészítéséhez szükségesnek ítéltünk egy hegesztő készülék megtervezését és legyártását. Indokaink az alábbiak voltak:

- megfelelő befogás, rögzítés,
- megfelelő pozicionálás a robotos hegesztéshez,
- pontos illesztés,
- egyenletes hőelvezetés biztosítása az egyes munkadarabok készítése során,
- a hegesztett kötés kialakításához legmegfelelőbb hegesztési pozíció biztosítása.

Ezen kritériumokat, kívánalmakat figyelembe véve egy 16 mm vastag szénacél alaplapot választottunk, melyre a MET Hungary Kft. által biztosított függőleges hegesztési gyorsszorítókat csavaroztunk föl a megfelelő rögzítés elérésének céljából. Készítettünk egy hosszirányú, 2mm mély és 20mm széles vályút, melybe az alátétlemezes hegesztés során az alátétlemezt pontosan lehet pozicionálni. Egy ütközőlemezt csavarkötéssel rögzítettünk, ennek az a célja, hogy a robotos hegesztés során az előre beprogramozott pálya minden egyes újabb darabnál megfelelő legyen, azaz az előre méretre ledarabolt lemezeket ugyanott tudjuk ütköztetni a kötés kialakítása előtt. Az alábbi, 10. ábrán a kész hegesztő készülék látható nyitott és zárt állapotban:



10. ábra Hegesztő készülék nyitott és zárt állapotban

A hegesztő áramforrás, a hideghuzal-előtoló berendezés és a robotkar alkot egy egységet, melyekkel kiegészítve a hegesztőkészüléket a kívánt kísérletek a legnagyobb pontossággal és könnyű reprodukálhatósággal elvégezhetőek voltak.

4. Végrehajtott hegesztési kísérletek

A kísérletsorozatban a már ismertetett AlMgSi alapanyagot használtuk. 150mm x 80mm-es méretre darabolva a 2mm vastag lemezt készítettünk az alábbi kialakításokban próbadarabokat:

- PA pozíció, tompán illesztett kötés 0mm illesztési réssel,
- PA pozíció, átlapolt kötés,
- PA pozíció, alátétlemez alkalmazása azonos alapanyagból, 2mm illesztési réssel.

A paramétereket szakirodalmi ajánlások alapján állítottuk be minden egyes kialakítás első hegesztésénél, majd ezt követően a kívánt módosításokat elvégeztük, hogy a legjobbnak ítélt kötésekot kapjuk. Ekkor a megfelelő számú próbatest kimunkálásának érdekében 2db próbadarabot készítettünk el minden esetben.

Az alábbi táblázatok és ábrák a különböző kialakítású, megfelelőnek ítélt próbadarabok hegesztési paramétereit és fényképes dokumentációját tartalmazzák.

Tompán illesztett kötések:

Sorszám	I_{heg} [A]	$V_{\text{elő}}$ [m/min]	V_{heg} [mm/s]	f [Hz]	Megjegyzés
3.1.	175	1,3	6	2	megfelelőnek ítélt kötés, 2db a megfelelő mennyiségű próbatest érdekében
3.2.					

5. táblázat Tompán illesztett kötések paramétereit



11. ábra Korona oldal (3.1.-es próbadarab)



12. ábra Korona oldal (3.2.-es próbadarab)

Átlapolt kötések:

Sorszám	I_{heg} [A]	$V_{\text{elő}}$ [m/min]	V_{heg} [mm/s]	f [Hz]	Megjegyzés
9.	205	1,8	6	2	megfelelőnek ítélt kötés, 2db a megfelelő mennyiségű próbatest érdekében
10.					

6. táblázat Átlapolt kötések paramétereit



13. ábra Korona oldal (9.-es próbadarab)



14. ábra Korona oldal (10.-es próbadarab)

Alátétlemezes kötések:

Sorszám	I_{heg} [A]	$V_{\text{elő}}$ [m/min]	V_{heg} [mm/s]	f [Hz]	Megjegyzés
18.	190	3,2	5	3	megfelelőnek ítélt kötés, 2db a megfelelő mennyiségű próbatest érdekében
19.					

7. táblázat Alátétlemezes kötések paramétereit



15. ábra Korona oldal (18.-es próbadarab)



16. ábra Korona oldal (19.-es próbadarab)

A hegesztett kötések elkészülte után a próbadarabokat földaraboltuk és szakító próbatesteket, valamint makro csiszolati próbatesteket munkáltunk ki. A szakítóvizsgálatok során minden egyes próbatest varratkeresztmetszetét meghatároztuk, mivel a szakítószilárdság meghatározását a szakítóerő és a keresztmetszet hányadosaként számítottuk ki. Abban az esetben ahol a próbatest az alapanyagban szakadt, ott a 2 mm-es vastagság és a kimunkált szélesség, a varratban szakadtak esetén pedig a varrat vastagsága és a szélesség szorzata határozta meg a keresztmetszetet. A varratban szakadt próbatestek esetén a varrat eredeti, legkisebb vastagságát használtuk számításainkhoz.

Előzetesen megfogalmaztunk egyfajta sorrendet is, melyben az alátétlemezes kötéstípusnál számítottunk a legnagyobb értékekre, míg a legkisebbekre az átlapolt kötéseknel számítottunk.

Az alapanyag szakítószilárdságát a hozzá adott műbizonylat alapján előre ismertük, de minden esetben összehasonlítást végeztünk a számított értékekkel. Ezek alapján a különböző varrat típusokra számított és mért értékeket összehasonlítva a 8. táblázat tartalmazza.

kötéstípus	szélesség [mm]	vastagság [mm]	szelvényméret [mm ²]	erő [kN]	számított szakító-szilárdság [MPa]	alapanyag szakító-szilárdsága [MPa]
alátétes	15	2	30,00	6,6	220,0000	251
alátétes	15	2	30,00	6,5	216,6667	251
alátétes	15	2	30,00	6,5	216,6667	251
tompá	14,5	2,45	35,53	5,7	160,4504	251
tompá	15	2,45	36,75	5,2	141,4966	251
tompá	15	2,45	36,75	6,6	179,5918	251
átlapolt	15	1,25	18,75	2,0	106,6667	251
átlapolt	15	1,25	18,75	2,1	112,0000	251
átlapolt	15	1,25	18,75	2,2	117,3333	251

8. táblázat Kötések szakítószilárdsága

A táblázatból arra a következtetésre jutottunk, hogy a három varrat típusból az alátétlemezes kialakítás rendelkezik a legnagyobb szakítószilárdsággal. Az átlapolt kötések esetében viszont azt is figyelembe kell venni, hogy a varrat a kialakításából fakadóan nem csak húzó igénybevételt szenvedett el a szakítás során, hanem minimális nyíró igénybevételnek is ki volt téve. Ennek ellenére megállapítható, hogy ez a kötéstípus kevesebb, mint 50 %-át képes teljesíteni az alapanyag szakítószilárdságának. Az alátétlemezes kialakítás, mint az első pontban is említettük, egyfajta gyöktámaszos tompavarratként is értelmezhető, így nem meglepő, hogy a sima tompakötés szakítószilárdságánál nagyobb értékekkel rendelkezik.

A következő 3 ábra mutatja a különböző varratkialakítású próbatestek szakítás utáni állapotát.



17. ábra Alátétlemezes kötés



18. ábra Tompavarratos kötés

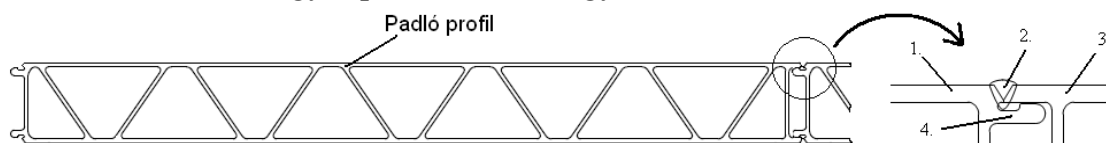


19. ábra Átlapolt kötés

Az átlapolt kötésnél fontos megjegyezni, hogy az összes próbatest a varratban szakadt, mivel a varratkialakításból fakadóan a kötés gyengébb, mint az alapanyag, valamint a teherviselő keresztmetszet is kisebb, mint az alapanyag keresztmetszete.

Összefoglalva arra a következtetésre jutottunk, hogy szakítószilárdság szempontjából az alátétlemezes varratkialakítás rendelkezik a legnagyobb szakítószilárdsággal. Ennek a gyakorlatban is van jelentősége, mivel a vasúti járműgyártásban a sajtolt, extrudált profilokból felépülő nagyvasúti alumínium kocsik hegesztése során is minden teherviselő varrat ilyen kialakításban kerül elkészítésre.

Erre mutat példát a 20. ábrán látható rajz. Ez egy nagyvasúti alumínium kocsi alvázának 2 padlóeleme között létesített kötés kialakítását ábrázolja, melyen 1-es és 3-as sorszámmal a két padló profil, 2-es sorszámmal az elkészítendő varrat pontos helye és 4-es sorszámmal az egyik profil beolvadó gyöktámasza látható.



20. ábra Padló profilok között kialakított varrat geometriája [1] [7]

A próbadarabok darabolásánál kimunkált makro csiszolati próbatestekből készítettünk csiszolatokat, melyeket fényképesen dokumentáltunk. Ezek a képek jól mutatják, hogy a varratok kellő mértékben beolvadtak az alapanyagokba, a kötések nem tartalmaznak repedéseket és a hidrogén okozta porozitás mértéke sem jelentős. A következő 3 ábra mutatja a különböző varratkialakítások makro csiszolati képét.



21. ábra Alátétlemezes kötés

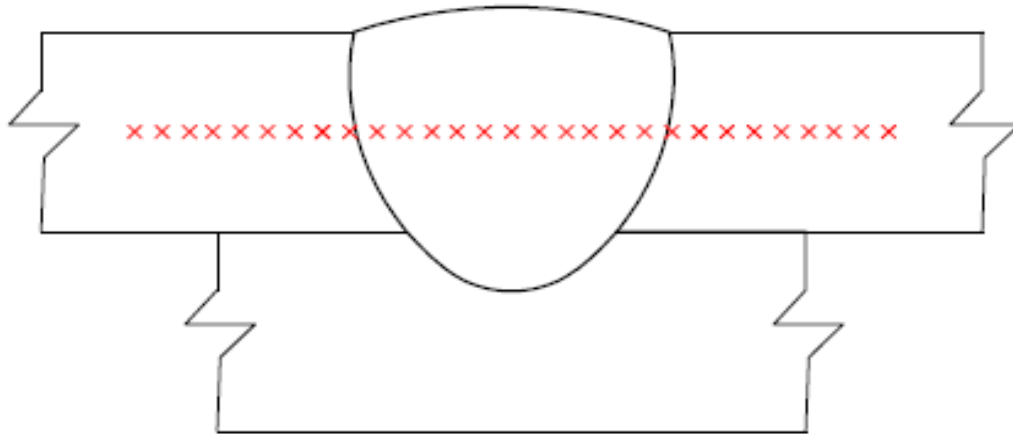


22. ábra Tompavarratos kötés



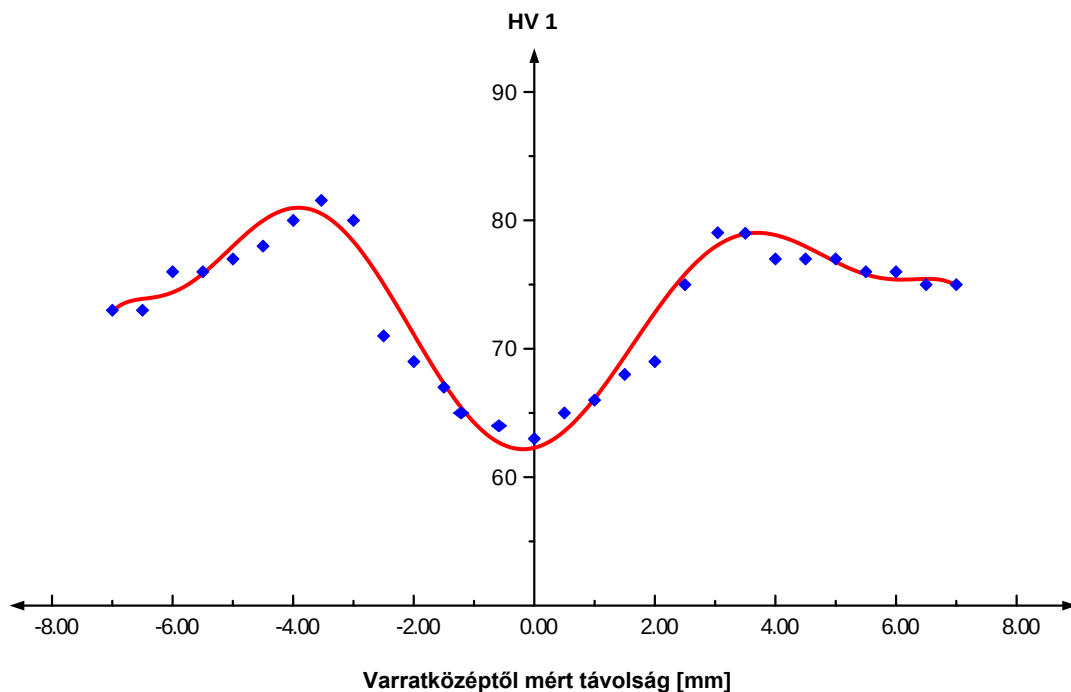
23. ábra Átlapolt kötés

A makro csiszolatokon makro keménység mérést végeztünk, melynek az volt a célja, hogy megtudjuk, hogy a varratok kilágyultak-e az alapanyaghoz képest. Ennek a terhelőereje HV1 volt, lépésköze pedig 0,5 mm. A 24. ábra a keménységmérések elhelyezkedését mutatja a hegesztett kötésen.



24. ábra Keménységmérések helyei

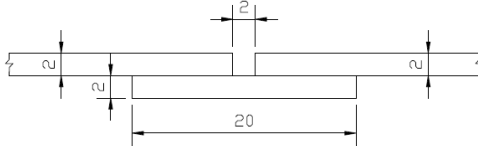
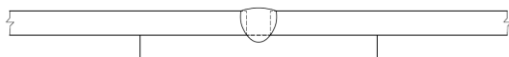
Az 1. diagram az alátétlemezes kötésen mért keménységek eloszlását mutatja a varrat függőleges tengelyére szimmetrikusan.



1. diagram Keménységeloszlás

A diagramból jól megállapítható, hogy a varrat kilágyult, az ötvöző tartalom csökkent, ennek a hegesztés során bevitt hő az oka. Elkerülésére, minimalizálására lehet az impulzus íves eljárásokat alkalmazni. Ez volt a mi egyik indokunk is ezen eljárás alkalmazásakor.

Összefoglalva arra a következtetésre jutottunk, hogy alumínium ötvözetek vékonylemezes hegesztéséhez a megfelelő eljárás a hideghuzalos, impulzus ívű AWI hegesztés. Kötéskialakítást tekintve a legjobb mechanikai tulajdonsággal az alátétlemezes kötés bír. A következő, 9. táblázat egy WPS-t tartalmaz, mely a kísérletsorozatban legjobbnak ítélt varrat hegesztésének paramétereit és körülményeit tartalmazza a megfelelő rajzokkal egyetemben.

Hegesztési utasítás (MSZ EN ISO 15609-1)						WPS Al-01			
Hegesztési eljárás:		141 (AWI)		Vizsgáló/Vizsgálat helye:		ME-MTT			
WPQR Nr.:		---		Előkészítés fajtája:		Ipari alkohol			
Gyártó:		ME-MTT		Alapanyag:		EN AW-ALSi1MgMn (6082)			
Hegesztési folyamat:		v (teljesen gépesített)		Vizsgálati darab: (T vagy P):		Lemez (P)			
Hegesztési pozíció:		PA		Munkadarab vastagsága:		Lásd a rajzokat			
Varrat fajtája:		Tompavarrat		Varrat kivitele:		Egyoldali (ss)			
Hegesztési kötés kialakítása				Hegesztett varrat					
									
Réteg	Hegesztő eljárás	Huzal átmérő	Áramerősség (csúcsáram)	Volfrám-elektrod átmérő	Frekvencia	Huzal előtolási sebesség	Hegesztés sebessége	Vonalenergia	
		mm	(A)	mm	Hz	m / min	mm / s	J / mm	
1-réteg	141	1.2	195	2.4	3 Hz	3.2	5	---	
Hegesztőanyag:			AlSi5		Gázterelő átmérő:			12	mm
- Márkanév:			MIG WELD ML4043 AlSi5		Áramátadó távolsága:			15 - 18	mm
- Száritási előírás:			---		Pisztoly beállítási szöge:			Előre tartva	
Védőgáz:			EN439-I3	Ar85%, He 15%	Gázáramlási mennyiség			8-9	l/min
Készítette/Szerkesztette:			Móricz Péter György			Dátum:		2012.10.	
Engedélyezte:			Dr. Török Imre			Dátum:		2012.10.	

9. táblázat WPS

Összegzés

A dolgozatunkban a járműiparban alkalmazott alumínium ötvözetek egyik ötvözettypusát választottuk kísérletünk alapanyagaként. Mérete a vasúti járműgyártásban járatos, 2 mm vastagságú lemez, melyet hideghuzalos, impulzus ívű AWI hegesztőeljárással hegesztettük meg. A kísérletsorozatban három különböző kötésalakítást hasonlítottunk össze.

A kísérletsorozatban elkészített próbatesteket anyagvizsgálati eljárásokkal vizsgáltuk meg, melyek kiértékelése után arra a végkövetkeztetésre jutottunk, hogy az előzetesen meghatározott céloknak legjobban megfelelő kötésalakítás az alátétlemezes kötés.

A különböző kötéstípusok fényképes dokumentációja megfelelően mutatja a hegesztési paraméterek változtatása okozta varratalak változásokat. Ezek közül minden varratípusnál a megfelelőnek ítélt kötés fényképét a hozzá tartozó hegesztési paraméterekkel együtt közöltük, így a kísérletsorozat eredményei jól követhetők.

A kísérletsorozat tapasztalatait összegezve, a legjobbnak ítélt kötés paramétereit és varratkialakítását felhasználva elkészítettünk egy hegesztési eljárás utasítást, melyet alkalmazva a megfelelő minőségű kötés reprodukálható.

A kísérletsorozat konklúziójaként megállapítható, hogy a hideghuzalos, impulzus ívű AWI hegesztés a 2 mm vastag alumínium ötvözet hegesztésére kiválóan alkalmas, a megfelelő paraméterek megválasztása mellett biztosítja a megfelelő tulajdonságokkal rendelkező varrat elkészíthetőségét és gépesített kivitelben a megfelelő reprodukálhatóságot.

Irodalomjegyzék

- [1] Móricz Péter György: Nagyvasúti alumínium kocsi alváz gyártásának elemzése, BSc szakdolgozat, Miskolc, 2011.
- [2] Prém László: A szakaszos energiabevitelű hegesztés technológiai paramétereinek kísérleti vizsgálata, tanulmány, Miskolc, 2010.
- [3] AMAG rolling GmbH alapanyag műbizonylat
- [4] Alumínium és alumíniumötvözetek. Képlékenyalakítású termékek. (MSZ EN 515)
- [5] Gépipari Tudományos Egyesület: 25. Jubileumi Hegesztési Konferencia, Szabó Áron: Hidrogén porozitás vizsgálata 131-es hegesztési eljárás esetén, konferencia kiadvány, 2010.
- [6] Froweld Kft honlap, www.froweld.hu
- [7] Stadler Rail AG– Sínen járó dinamika; prospektus, 2010.
- [8] Kristóf Csaba: Impulzus ívű hegesztés, I. rész: AWI-hegesztés, Hegesztéstechnika, XIII. évfolyam 2002. 1. szám
- [9] Dr. Török Imre: Anyagok és hegeszthetőségük (Nemvas fémek hegesztése), Miskolc, 2000.
- [10] Móricz Péter György: Alumíniumötvözetek modulált ívű AWI hegesztése, Miskolc, 2012.
- [11] COKOM Mérnökiroda Kft: Hegesztési zsebkönyv, Miskolc, 2003.
- [12] Dr. Török Imre, Dr. Balogh András, Meilinger Ákos, Juhász Krisztina: Main characteristics of fusion and pressure welding of aluminium alloys, idegen nyelvű folyóirat cikk, Miskolc, 2012.
- [13] Alumínium és alumíniumötvözetek. Az alakított termékek vegyi összetétele és alakja. 1. rész: Számjelölési rendszer. (MSZ EN 573-1)
- [14] Hegesztés és rokon eljárások. A hegesztési eljárások megnevezése és azonosító jelölésük. (MSZ EN ISO 4063)