



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLÓGIA TANSZÉK



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

ULICSKA DÁVID MÁRK

(GÉPÉSZMÉRNÖKI SZAK BSc, 7. FÉLÉV)

A munkaszög hatásának vizsgálata alumínium lemezek MIG-hegesztésén

Konzulens:

Dr. Katula Levente Tamás
egyetemi docens

Budapest, 2023

NYILATKOZATOK

Elfogadási nyilatkozat

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

A beadás időpontja: 2023.11.05

.....

konzulens

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Ulicska Dávid Márk* (KWZ8FX), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2023.11.05.

.....

hallgató

TARTALOMJEGYZÉK

1. Összegzés (Summary).....	3
1.1. Magyarul	3
1.2. In English	3
2. Bevezetés.....	5
2.1. Az alumíniumról.....	5
2.2. Alumínium hegesztése.....	6
2.3. A hegesztési paraméterek.....	7
3. Szakirodalmi áttekintés	9
3.1. Alumínium MIG-hegesztés kihívásai	9
3.2. A hegesztési paraméterek hatása a varratalakra és a beolvadási mélységre ...	11
3.3. A munkaszög jelentősége	13
4. Célkitűzés.....	15
5. Kísérlettervezés.....	16
5.1. A munkadarabok hegesztésének tervezése	16
5.2. A varratok kiértékelésének tervezése	18
6. Kísérleti eredmények	20
6.1. Varratok szemrevételezése és mintakészítés	20
6.2. Sztereomikroszkóp-felvételek.....	23
7. Eredmények kiértékelése.....	29
7.1. Szemrevételezés kiértékelése	29
7.2. Mikroszkópfelvételek kiértékelése	30
8. Felhasznált források	35

1. ÖSSZEGZÉS (SUMMARY)

1.1. Magyarul

Az alumínium az ipar számos területén kedvelten használt alapanyag. Kis sűrűségének, a sűrűségéhez viszonyított jó mechanikai tulajdonságainak és kiváló korrózióállóságának köszönhetően megjelenését követően hamar a világ egyik legnagyobb mennyiségben használt fémévé nőtte ki magát. Kutatásomban alumínium MIG-hegesztésével foglalkozom. A hegesztett kötések minőségét és tulajdonságait a varratok készítéséhez használt hegesztési paraméterek határozzák meg. A hegesztési paraméterek hatásai a varratra jól ismertek, de vannak paraméterek, amik kisebb figyelemnek tudnak csak örvendeni. Ezek a munkaszög-orientáció paraméterei: az utazási szög és a munkaszög. Bár a hegesztők hegesztés során olyan szögekkel dolgoznak, ami tapasztalataik szerint az adott varrat elkészítéséhez megfelelőek, de az egyre jobban terjedő robothegesztésnél már meg kell programozni ezen paraméterek pontos értékeit is. Kutatásomban a munkaszög hatását vizsgálom a varrat esztétikai minőségére, a porozításra és a varratgeometria jellemző méreteire: a beolvadási mélységre, a varratszélességre ezek hányadosaként kapott alaktényezőre és a varratdudor magasságára. A munkaszög hatását jó hegeszthetőségű AlMg₃, azaz 5754-es számú ötvözött alumínium lemezekre húzott hernyóvarratokon vizsgálom. A munkaszöget 5°-os léptékkel 90°-tól 70°-ig vizsgálom. A hegesztést automata segítségével végzem az emberi tényező megszüntetése és a robothegesztés szimulálása érdekében. Az elkészített munkadarabokból mintákat vágok ki, ami mintákból csiszolatokat készítek. A csiszolaton a varratgeometriát polírozás és maratás után sztereobinokuláris fénymikroszkóp használatával méretezek, majd értékelem a munkaszög függvényében. A kutatásomban kitérek a varratok szemrevételezéses vizsgálatára is. A vizsgálataim során azt tapasztaltam, hogy a munkaszög jelentős hatással az összes előbb felsorolt varratulajdonságra. A munkaszög csökkentésével a varratszélesség csökkent, a varratdudor-magasság és az alaktényező pedig nőtt. A porozitást tekintve a munkaszög csökkentése több és nagyobb méretű porozításokat eredményezett, valamint a külső esztétikai megjelenését is rontotta a varratoknak. A hegesztés során a csökkenő munkaszöggel egyre nagyobb ív-instabilitást tapasztaltam, ami a kisebb munkaszögeknél már szakadozott varratokat eredményezett. A kutatás alapján kijelenthető, hogy az alumínium nagyon érzékeny a hegesztés munkaszögére, valamint, hogy e paraméter csökkentése rontja a varratminőséget.

1.2. In English

Aluminium is a material that is popular in many areas of industry. Thanks to its low density, good mechanical properties and excellent corrosion resistance, it soon became one of the most widely used metals in the world after its appearance. In this research I examine the MIG welding of aluminium. The quality and properties of welded joints are determined by the welding parameters used to create them. The effects of welding

parameters on the joints are well known, but there are parameters that get less attention than the others. These are the parameters of the welding gun orientation: the travel angle and the work angle. Although welders usually use angles that they've experienced would be suitable for their welds, the same can't be said about robotic welding. In the case of robotic welding the operators have to program the exact parameters that they want the robot to use, for this it's important to know the effect of these parameters too. In this research I examine the effect of the working angle on the aesthetic quality of the weld, the porosity and the characteristic dimensions of the bead geometry: the fusion depth, the bead width, the shape factor and the height of the reinforcement. The examination is made on caterpillar welds made on AlMg3, also known as 5754 aluminium alloy plates, which alloy has great weldability. I examine the effect of the work angle from 90° to 70° with 5° jumps in between welds. The welding is done by a welding automat in order to eliminate the human factor and at the same time simulate robotic welding. I cut out samples from the prepared workpieces. After polishing and etching I measure the bead geometry using a stereobinocular light microscope, and evaluate the measurements as a function of the work angle. In my research I also cover the visual inspection of the welds. During my tests, I found that the work angle has a significant effect on all the weld properties listed above. By reducing the work angle, the bead width decreases, while the height of the reinforcement and the shape factor increases. In terms of porosity, reducing the work angle resulted in more and larger porosities and also worsened the external aesthetic appearance of the welds. While welding, I experienced increasing arc instability as the work angle decreased, which resulted in incontinuous welds at smaller working angles. Based on this research, it can be stated that aluminum is very sensitive to the work angle, and that reducing this parameter worsens the weld quality.

2. BEVEZETÉS

2.1. Az alumíniumról

Az alumínium egy ezüstös színű, oxidréteggel borított könnyűfém. A természetben elemi állapotban nem, csupán érceiben fordul elő. A legismertebb és leggyakoribb alumíniumércet, a bauxitot a 19. század első felében fedezték fel, majd pár évre rá magát az elemi alumíniumot is sikeresen szintetizálták. Előállításában azonban nagyon költséges volt, ezért eleinte még nemesfémszámba ment és ékszereket készítettek belőle. A 19. század vége felé felfedezték az alumínium tömeges előállításának módját, a kriolitos elektrolízissel történő alumíniumgyártást, így értéke rohamosan csökkenni kezdett, de az ár hanyatlásának köszönhetően elterjedése felgyorsult, amely az alumínium széleskörű használatát eredményezte. [1][2]

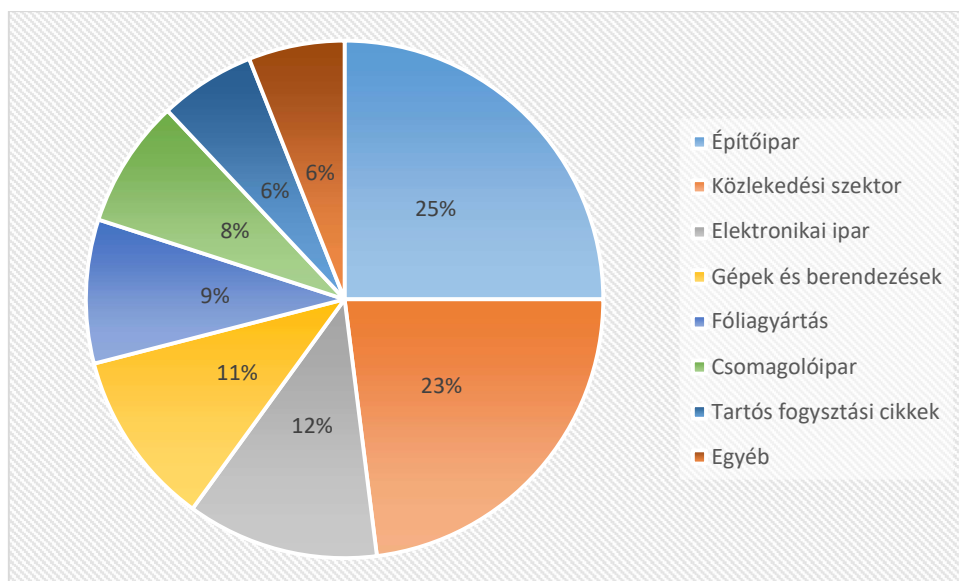
Napjainkra az alumínium az acél mögött a világ második legnagyobb mennyiségben termelt fémévé vált. 2019-ben a világ érbányászatát tekintve a vasérc állt toronymagasan az első helyen, amelynek évi kitermelése meghaladta a 3 milliárd tonnát, mögötte második helyen az alumínium, amelynek évi kitermelése 62,9 millió tonna volt. Utánuk harmadik helyen a mangánérc kitermelés állt 56,6 millió tonnával. A világ 2019-es fémércbányászatát az 1. táblázat tartalmazza. [3]

1. táblázat: A világ érbányászata 2019-ben

Fém/Érc	Bányászott mennyiség (tonna)	Összeghez viszonyítva
Vasérc	3 040 000 000	93,57%
Alumínium	62 900 000	1,94%
Mangánérc	56 600 000	1,74%
Króm ércek és koncentrátumok	38 600 000	1,19%
Réz	20 700 000	0,64%
Cink	12 300 000	0,38%
Titán (titán-dioxid tartalom)	6 300 000	0,19%
Ólom	4 700 000	0,14%
Nikkel	2 702 000	0,08%
Cirkónium ásványok	1 337 000	0,04%
Magnézium	1 059 736	0,03%
Technológiai-és nemesfémek	1 335 848	0,04%
Összesen	3 248 814 334	100%

Hatalmas mennyiségű gyártása az ipar számos területén történő felhasználnak köszönhető. 2020-ban az alumínium-felhasználást tekintve az építőipar és a közlekedési szektor a legjelentősebbek, melyek együttesen majdnem 50%-át tették ki az alumínium-felhasználásnak. Emellett az alumíniumnak az elektronikai iparban, a gép-és berendezésgyártásban, a fóliagyártásban, a csomagolóiparban, a tartós fogyasztási

cikkek gyártásában és más egyéb ipari területeken volt további felhasználása. A pontos megoszlást az 1. ábra szemlélteti. [4]



1. ábra: Az alumínium-felhasználás megoszlása 2020-ban

Széleskörű használatát kis sűrűségének és az ehhez társuló jó mechanikai tulajdonságainak, valamint korrozioállóságának köszönheti. Ezeket a kedvező tulajdonságokat más fémekkel csak jelentősen drágábban lehet elérni. Kiemelkedő alapanyaga a repülőgépgyártásnak, amire kis sűrűsége, relatív alacsony ára és a kristályszerkezetéből adódó hőmérséklet-független ütőmunkája predesztinálja.

Az ipar minden területén a gyártandó termék számos technológiai lépésen megy keresztül, míg eléri a kész állapotát. A legtöbb termék esetében ezen lépések egyike egy kötéstehnológiai lépés. Kötésmechanizmus szerint 3 féle kötéstípus létezik: alakkal, erővel és anyaggal záró kötés. Alakkal záró például a szegecskötés, erővel záró például a csavarkötés és anyaggal záró a hegesztés, a forrasztás és a ragasztás. Fémek esetében anyaggal záró kötéseknel jellemzően hegesztésről beszélünk, fémek ragasztása csak bizonyos esetekben, például menetek biztosításánál történik. TDK dolgozatomban alumínium próbatetek hegesztését, mégpedig MSZ EN ISO 4063:2016 „Hegesztés és rokon eljárások. A hegesztési eljárások megnevezése és azonosító számuk” szabvány 131-es eljárással, azaz tömör huzalelektrodás semleges védőgázos ívhegesztéssel (angolul gas metal arc welding using inert gas with solid wire electrode) történő hegesztését vizsgálom. Erre a konkrét hegesztési eljárásra a továbbiakban MIG-hegesztésként hivatkozom.

2.2. Alumínium hegesztése

Az alumínium hegesztése nagyban különbözik acélok hegesztésétől és olyan problémákkal is jár, amelyek acélok esetében vagy nem lépnek fel, vagy ha fel is lépnek, kevésbé relevánsok.

Legelőször, fontos különbség az acélok és az alumínium között a hővezetés. Az alumínium nagyon jó hővezetésű anyag, hővezetési tényezője $237 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$, míg az acélok hővezetési tényezője a $45\text{-}55 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ tartományban van [2]. A nagyon jó hővezetés miatt alumínium hegesztésénél az ömledékfürdőből a hő sokkal hamarabb elvezetődik, mint acélok esetében. Ehhez társul az alumínium alacsony, $660 \text{ }^\circ\text{C}$ -os olvadáspontja (tiszta alumínium esetén), ami nagyságrendileg az acélok olvadáspontjának a fele. Mindezek miatt acélok hegesztéséhez képest jelentősen kisebb a használható hőbevitel tartománya ahhoz, hogy megfelelő beolvadást érjünk el, de ne olvasszuk át a munkadarabot.

További jellemző a jól tapadó felületi oxidréteg. Az alumínium-oxid olvadáspontja $2072 \text{ }^\circ\text{C}$, ez azt jelenti, hogy a tiszta alumínium olvadáspontja és az oxidréteg olvadáspontja között több mint $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ különbség van [2]. Emiatt vagy hegesztés előtti műveletekkel, vagy pedig a hegesztő ívvel ezt az oxidréteget fel kell oldani. Hegesztés előtt érdemes acetonnal vagy enyhén lúgos oldatokkal (például egy erős szappannal) az olajokat, zsírokat és párát eltávolítani, ezután korrozioálló-acél drótkefével a felületi oxidokat eltávolítani. Ez utóbbit erős savakkal vagy lúgokkal is lehet végezni [5]. Emellett az oxidréteg feloldása megoldható AC áramnem használatával, ahol a változó áram végzi az oxid bontását, illetve DC-, azaz fordított polaritás használata is megoldhatja az oxidbontást. Alumínium hegesztésénél a 14-es hegesztési eljárás csoportja, azaz volfrámelektrodás, védőgázos ívhegesztés (TIG-hegesztés) esetében az AC áramnem a jellemző, a 13-as eljárás csoportja, azaz huzalelektrodás, védőgázos ívhegesztés (MIG/MAG-hegesztés) esetében pedig csak a DC- polaritás a használható, AC áramnem a kiszámíthatatlansága és megbízhatatlansága miatt csak bizonyos esetekben használandó. [6]

Érzékelhető, hogy több, az acél hegesztésénél nem jelentkező, akár problémát jelentő tényezőre kell odafigyelni alumínium hegesztésénél, viszont a hegesztési paraméterek megfelelő megválasztásával és a munkadarab hegesztés előtti megtisztításával és előkezelésével ezek nagyrésze kiküszöbölhető.

2.3. A hegesztési paraméterek

A hegesztési paraméterek közül a hegesztési áramerősség és a feszültség vannak a legnagyobb hatással a hegesztett kötések minőségére és esztétikájára. TIG-hegesztés esetében mind az áramerősség, mind a feszültség közvetlenül változtatható a hegesztőgépen, MIG/MAG-hegesztés esetében viszont csak a feszültséget lehet közvetlenül állítani, az áramerősséget közvetetten, a huzalelőtolási sebesség változtatásával lehet korrigálni. Az áramerősség MIG/MAG-hegesztésnél a huzalelőtolási sebességből és a feszültségből kiadódó érték. Egyes hegesztőgépeken van lehetőség az áramerősség 'közvetlen' állítására is, de azon esetekben is valójában a huzalelőtolást változtatjuk, csak a gép végez helyettünk egy átváltást a névleges áramerősség értékére, de ettől függetlenül az továbbra is kiadódó érték marad.

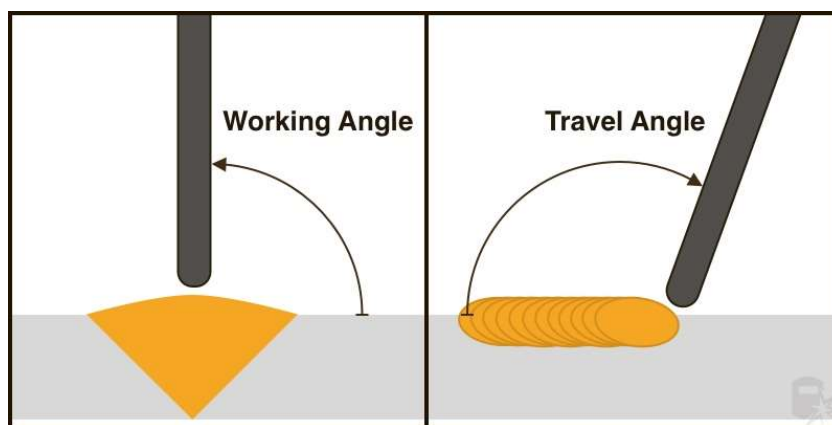
Más, a hegesztést befolyásoló paraméterek az áramnem és a polaritás. Két áramnem létezik, egyenáram, azaz DC áramnem és váltóáram, azaz AC áramnem. Egyenáramon belül megkülönböztetjük az egyenes, azaz DC+ és a fordított, azaz DC- polaritást.

Ami paraméter még jelentős befolyással van a hegesztés minőségére az a hegesztési sebesség. Minél lassabban haladunk a hegesztő-pisztollyal, annál jobban megolvasz- szuk a munkadarabot és annál több hegesztőanyagot adagolunk a varratba.

A védőgáz típusa és mennyisége is befolyásoló tényező. Léteznek aktív és semleges védőgázok, valamint védőgázkeverékek, melyeket az MSZ EN ISO 14175:2008 „Hegesztőanyagok. Gázok és gázkeverékek ömlesztőhegesztéshez és rokon eljárások- hoz” szabvány tartalmaz. Különböző védőgázok különböző ívpotenciállal rendelke- znek, így befolyásolják a hőbevitelt.

További hatással van a varratra a huzalátmérő is. Kisebb huzalátmérő ugyanazon gépbeállítások mellett kevesebb hegesztőanyag varratba adagolását eredményezi, de nagyobb áramsűrűséget biztosít.

Mindezen paraméterek hatásai jól ismertek a hegesztők számára, viszont vannak paraméterek, amelyek jelentősége kevésbé ismert vagy kevésbé köztudott, ezek az uta- zási szög (travel angle), valamint a munkaszög (work angle). Az utazási szöget és a munkaszöget a 2. ábra szemlélteti. Ezen paraméterek hatásai kevésbé ismertek a he- gesztők számára és sok esetben figyelmen kívül vannak hagyva. A legtöbb hegesztő megszokásból használ valamilyen szöget, ami tapasztalatai szerint megfelelő az adott varrat elkészítéséhez, de az iparban sok helyen már robotok végzik a hegesztést, amik- nek már ezen paramétereket is programozni kell, ezért fontos tisztában lenni azzal, hogy mire és milyen hatással vannak.



2. ábra: A munkaszög és az utazási szög értelmezése [7]

3. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

3.1. Alumínium MIG-hegesztés kihívásai

Az alumínium hegesztése sajátos kihívásokat támaszt a hegesztővel szemben. Hegesztése nem feltétlen nehezebb, mint más fémeké, de egyedi kihívásai miatt bizonyos módszereket kell alkalmazni a hegesztés során a megfelelő minőségű varratok elérése érdekében. Legjelentősebb alumínium-hegesztéssel kapcsolatos kihívások: 1.) az alumínium alacsony olvadáspontja és jó hővezető képessége, 2.) az alumínium-oxid magas olvadáspontja, valamint 3.) a hidrogén jó oldékonysága az alumínium-ömlékben és az abból adódó porozitás és esetleges melegrepedés. [8][9]

A nagy hővezető képesség megnehezíti a megfelelő beolvadási mélység elérését, mivel a munkadarab gyorsan elnyeli és elvezeti a hőt [10]. Nem megfelelő beolvadás akkor fordulhat elő, ha a hegesztő túl alacsonyra állítja a feszültséget vagy a huzalelőtolási sebességet, illetve, ha a hegesztési sebesség túl nagy. A nagy hővezetés miatt a hegesztés során a munkadarab folyamatosan felmelegszik, tehát a hegesztés elején nagyobb, utána pedig folyamatosan csökkenő hőbevitel volna az ideális. Egyes hegesztőberendezések ezt úgy kezelik, hogy a hegesztés megkezdésekor automatikusan megemelik, majd folyamatosan csökkentik az áramerősséget, hogy elkerüljék a hőfelhalmozódást [11]. Ilyen funkcióval nem rendelkező hegesztőberendezések esetében a hőbevitel növelésével, viszont új problémába ütközhetünk az alumínium alacsony olvadáspontja miatt. Ezen problémák a vetemedés és az átégés.



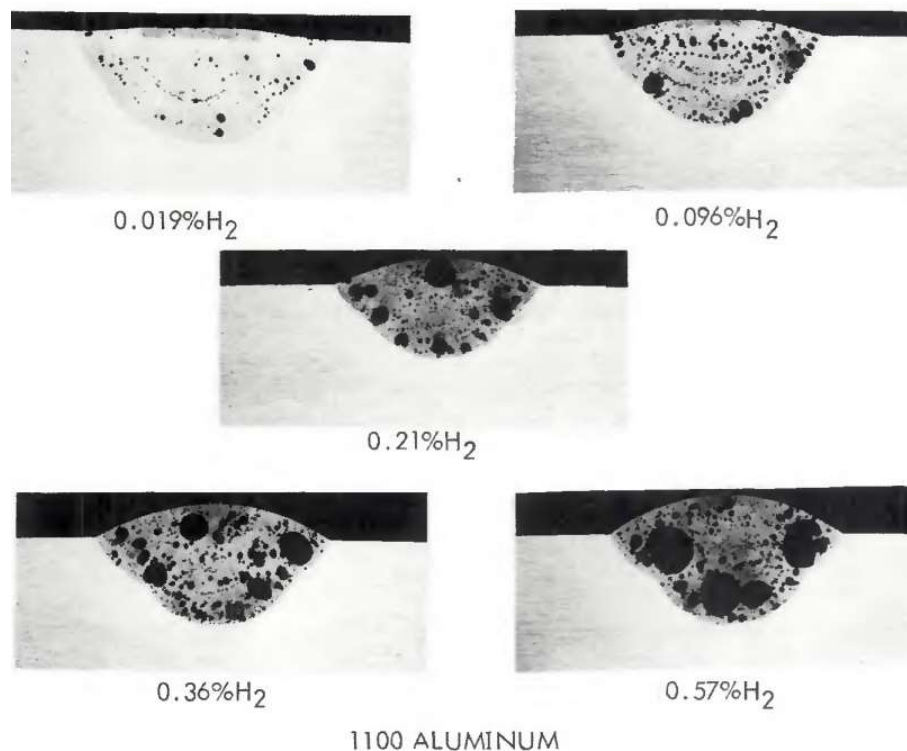
3. ábra: Átégés vékony fém MIG/MAG-hegesztésénél [12]

Ez utóbbi kifejezetten vékonyabb alumínium lemezek és profilok hegesztése során történhet. Ezek a jelenségek acél hegesztésénél is jelen vannak, de az alumínium sokkal

hajlamosabb rájuk. Emiatt alumínium hegesztésénél általában nagyobb haladási sebességre van szükség, mint acéloknál, hogy elkerüljük a munkadarab túlságos felmelegedését és átégését [11]. Átégésre példák az 3. ábrán láthatók.

Az alumínium légkörnek kitéve gyorsan oxidálódik és vékony, stabil oxidréteget képez, amelynek olvadáspontja $2072\text{ }^{\circ}\text{C}$, ami sokkal magasabb, mint a tiszta alumínium $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os olvadáspontja. Ezen az akadályon keresztül történő hegesztés átégetheti a munkadarabot. A hegesztés megkönnyítése érdekében már a hegesztés előtt érdemes az oxidréteget eltávolítani. Ez kémiai úton bizonyos oldószerekkel és savakkal végezhető, mechanikai úton pedig korrózióálló drótkéfével, illetve homokfúvással távolítható el. Ha nem kémiai úton akarjuk eltávolítani az oxidréteget akkor is érdemes gyenge lúggal vagy savval megtisztítani a munkadarab felületét, mert a zsírok, olajok, vízpára és más felületi szennyeződések rontják a hegesztés minőségét. [5]

Az alumínium az acélhoz hasonlóan ömledék állapotban nagyon jól oldja a hidrogént, szilárd állapotban pedig nem. Alumínium esetében ez azt eredményezi, hogy az ömledék állapotban nagy mennyiségben elnyelt hidrogén a lehűlés során az alumínium hidrogénoldásának csökkenése miatt gázporozitásokat képez. A hidrogén mozgását az ömledékfém áramlása befolyásolja és így csak kis mennyiség tud kijutni a fém felszínére. A buborékok nagy része nem tud kiszabadulni az ömledékből, így üregek maradnak a fémbe [13]. A hidrogén okozta porozításra a 4. ábra mutat jellemző példákat a növekvő hidrogéntartalom szerint.



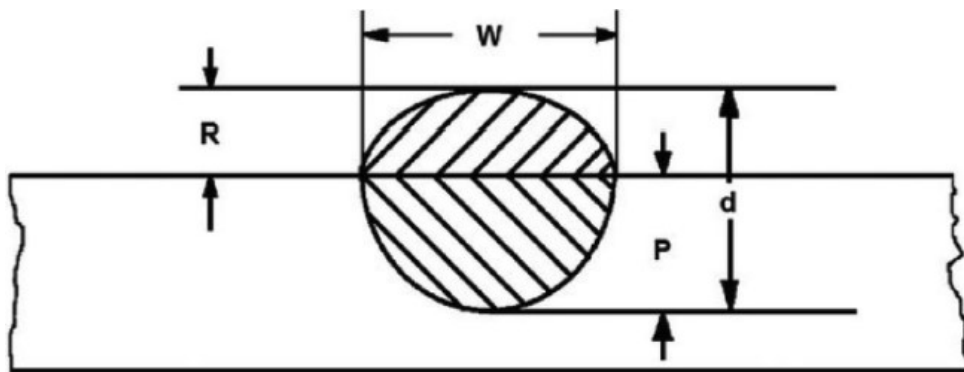
4. ábra: Hidrogén szennyezés hatása a porozításra alumínium próbatesten [14]

Ez gyengíti a fém szerkezeti integritását. Alumínium-ötvözetek hegesztésénél a megszilárdulás kinetikája miatt akár melegrepedések kialakulásához is vezethet [9]. A

porozitás mértéke csökkenthető tiszta huzal és eszközök használatával, az alapanyag olaj és zsírtalanításával, valamint megfelelő védőgázhasználattal [10]. Fontos megjegyezni, hogy alumínium-hegesztés esetében, acélok hegesztésével ellentétben, az MSZ EN ISO 10042:2005 „Hegesztés. Alumínium és ötvözetek ívhegesztéssel készített kötéseik. Az eltérések minőségi szintjei” szabvány alapján kis mértékű porozitás még engedélyezett.

3.2. A hegesztési paraméterek hatása a varratalakra és a beolvadási mélységre

A hegesztett kötés teherbíró képessége nagyban függ a varratgeometriától. A varrat legfontosabb jellemző méretei a beolvadási mélység, a varratdudor magassága és a varratszélesség. Ezen méreteket, illetve a teljes varratmagasságot az 5. ábrán mutatom be. R a varratdudor-magasság, P a beolvadási mélység, W a varratszélesség és d a teljes varratmagasság. A varratgeometriát a hegesztési paraméterek befolyásolják. [15]



5. ábra: A hegesztési varrat legfontosabb méretei [15]

A hegesztési paraméterek közül a hegesztési áramerősségnek van a legnagyobb hatása a beolvadási mélységre, a varratalakot, annak méretarányait tekintve viszont csak csekély mértékben befolyásolja. Növelésével mind a beolvadás, mind a varratszélesség nő.

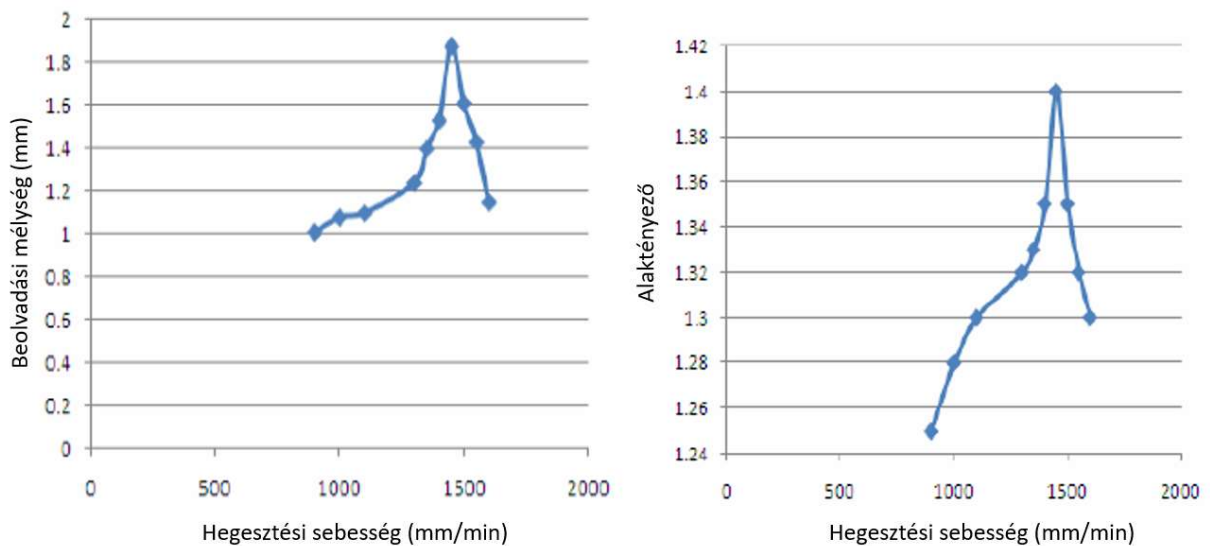
A feszültség elsősorban a varratalakot befolyásolja. Ha növeljük a feszültséget, akkor a varrat laposabb és szélesebb, ha csökkentjük, akkor pedig keskenyebb és mélyebb lesz.

További befolyásoló paraméter az áramnem és a polaritás. DC áramnem, azaz egyenáram esetében egyenes polaritásnál a munkadarab felé tolódik el a hőmegoszlás és nagyobb beolvadás érhető el vele, fordított polaritásnál pedig a huzal kap több hőt és a beolvadás sekélyebb lesz. A fordított polaritás pozitívuma alumínium hegesztésénél, hogy képes az oxidréteg felbontására, valamint kisebb hőterhelés éri a munkadarabot. Az oxidbontás emellett AC áramnem, azaz váltakozó árammal való hegesztésnél is megtörténik, váltóáram használata viszont csak TIG-hegesztésre jellemző.

A beolvadási mélység tovább befolyásolható az alkalmazott védőgázzal. Alumínium hegesztésénél jellemzően 100% argon védőgázt alkalmaznak, azonban vastagabb munkadarabok hegesztésénél a mélyebb beolvadás elérésének érdekében argon-hélium védőgáz keveréket is lehet használni. Minél nagyobb a hélium aránya a védőgázban, annál nagyobb beolvadás érhető el.

További hatása a beolvadási mélységre és némileg a varratalakra a hegesztési sebességnek van. Minél lassabban haladunk a hegesztő-pisztollyal, annál több hőt vezetünk be a munkadarab egy azon pontjába, így nagyobb beolvadást érünk el és minél gyorsabban haladunk annál kisebb lesz a beolvadás.

Hatással van a varratra a huzalátmérő is. Minél kisebb a huzalátmérő ugyanazon gépbeállítások mellett, annál nagyobb lesz az áramsűrűség a huzalban, emiatt a beolvadási mélység is nagyobb lesz, bár keskenyebb varratot fog eredményezni. [16]



6. ábra: A beolvadási mélység és az alaktényező a hegesztési sebesség függvényében [17]

K. Abbasi et al. [17] ezeket a varratulajdonságokat az úgynevezett alaktényezőben összegezve kezelték, mely alaktényezőt (angolul shape factor) a beolvadási mélység és a varratszélesség hányadosaként határozták meg (P/W). Kutatásukban ötvözetlen acél MAG-hegesztésén végezték megfigyeléseiket. Állandó huzalélőtolás és ívfeszültség mellett a hegesztési sebesség változtatásával vizsgálták a beolvadási mélység és az alaktényező változását. Arra az eredményre jutottak, hogy a hegesztési sebesség csökkentésével a beolvadási mélység és az alaktényező is folyamatosan nő, egészen egy optimumot jelentő kritikus pontig. Eredményeiket a 6. árba illusztrálja. A kritikus hegesztési sebesség alatt már elkezd drasztikusan csökkenni a beolvadás és az alaktényező. Ez a varrat túlhevülése miatt történik. Ilyenkor csökkenteni kell a hőbevitelt, mert a varrat túlhevülése a hegesztett kötés minőségének a romlásához vezet.

Akshat Sharma et al. [16] alumínium 8011 lemezek MIG-hegesztésénél figyelték a varratgeometria paraméterfüggését. A varratszélességet, a varratdudor-magasságot és a beolvadási mélységet vizsgálták a feszültség, a huzalelőtolási sebesség, a hegesztési sebesség, az utazási szög és a gázterelő-munkadarab távolságának függvényében. Arra az eredményre jutottak, hogy a huzalelőtolás növelése minden varratméretre pozitív, a feszültség növelése a varratdudor-magasságon kívül minden méretre pozitív hatású, a hegesztési sebesség és az utazási szög növelése minden méretre negatív, illetve a gázterelő-munkadarab távolság növelése a varratdudor-magasságon kívül minden méretre negatív hatással volt.

Aman Kumar Chaurasia et al. [18] ugyanezen vizsgálatokat végezték alumínium 6101 lemezeken és Akshat Sharma et al. kutatásaival megegyező konklúziókra jutottak.

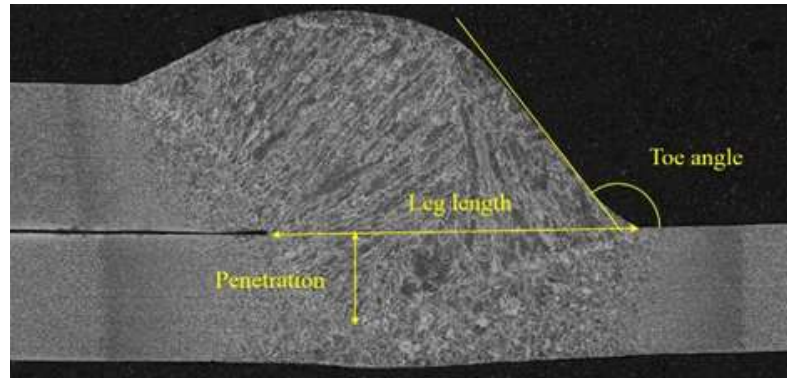
3.3. A munkaszög jelentősége

Bár a hegesztőpisztoly orientációjának csak csekély hatása van a munkadarabba vezetett energiára, azaz a hőbevitelre, mégis van jelentősége, hiszen ez határozza meg, hogy az ív, és ez által az ívenergia hol koncentrálódik, tehát hogy a hőbevitel hol történik. Így a pisztolyorientáció változtatásával nagy hatással tudunk lenni az energiaeloszlásra, s ez által a varratalakra, így a varratszélességre és a beolvadási mélységre is.

A munkaszög az elektródának a varrattengelyre állított merőleges síkban értelmezett szöge, lásd 2. ábra. Általában a munkaszög 90° , tehát nem döntjük ki a varratra állított merőleges síkjából. A munkaszög változtatásával nem a hőbevitel nagyságát, hanem annak helyét és eloszlását tudjuk befolyásolni. Tompa kötések hegesztésénél nem szokás 90° -tól jelentősen eltérő munkaszöget használni, a kis eltérés is csak az emberi tényezőből származik. Ennek oka, hogy a munkaszög változtatásával megváltoztatjuk, hogy az összehegesztendő lemezek a hőbevitel mekkora részét kapják. Ha eltérünk a 90° -tól, akkor az a lemez, ami felé a gázterelő néz a munkaszög csökkentésével egyre nagyobb részét kapja meg a hőbevitelnek. Ez keresztmetszetében egyenetlen, aszimmetrikus varratokat eredményez, ami gyengébb kötés kialakulásához vezethet. A munkaszög változtatása sarokkötéseknél, kifejezetten többsoros sarokkötéseknél válik fontossá [19]. Különböző vastagságú munkadarabok hegesztésénél úgyszintén fontossá válik a munkaszög változtatása, ugyanis ilyen esetekben érdemes a vastagabb munkadarabba irányítani a hőbevitel nagyobb részét. Ez azért szükséges, mert a vastagabb anyag több hő elvezetésére és „elnyelésére” képes, így a szimmetrikus varrat kialakításához szükséges ezt jól kiegyensúlyozni. Természetesen ez abban az esetben is segít, ha az egyik munkadarab olyan vékony, hogy jelentős az átégés veszélye.

Huijun Lee et al. [20] átlapolott kötésekben vizsgálták a munkaszög hatását a lábhosszra (leg length), a beolvadási mélységre (penetration) és a lábszögre (toe angle). Ezen varratjellemzők a 7. ábrán láthatók. Azt figyelték meg, hogy a munkaszög növelésével a lábhossz csökkent, a beolvadási mélység pedig nőtt, fordított esetben a munkaszög

csökkentésével pedig a lábhossz nőtt és a beolvadási mélység csökkent. Bár a kísérleteket átlapolt kötésen végezték és nem tompakötésen, mégis szerintem párhuzamot lehet vonni a tompa kötéshez tartozó elmélet és az átlapolt kötésen tapasztaltak között. Úgy gondolom, hogy a lábhossz egy olyan méret, ami átlapolt kötés esetében a varrat-szélesség szerepét tölti be, s így előismereteink szerinti módon viselkedtek a varrat-méreték a munkaszög változtatására.



7. ábra: Átlapolt kötés varratának jellemző méretei

4. CÉLKITÚZÉS

A kutatásom célja a kevésbé ismert munkaszög hatásának vizsgálata a varratra. A fő vizsgálandó varratparaméterek a beolvadási mélység és a varratszélesség. A varratalakot az alaktényezőn keresztül fejezem ki az eredményeim kiértékelésénél. A vizsgálatokat alumínium lemezekre, MIG-hegesztéssel húzott hernyóvarratokról készített csiszolatok kiértékelésével végzem. A csiszolatokat sztereomikroszkóppal értékelem. A csiszolatokon lemérem a beolvadási mélységet, a varratszélességét és a varratdudor-magasságot. Emellett VT (visual testing), azaz szemrevételezéses vizsgálattal is értékelem a munkaszög változtatásának hatásait. A szemrevételezéses vizsgálatot az MSZ EN ISO 17637:2016 „Hegesztett kötések roncsolásmentes vizsgálata. Ömlesztőhegesztéssel készített kötések szemrevételezéses vizsgálata” szabvány tartalmazza.

5. KÍSÉRLETTERVEZÉS

5.1. A munkadarabok hegesztésének tervezése

A minták alapanyagául 5 mm vastag AlMg3, azaz 5754-es számú alumínium ötvözet hengerelt lemezt használok. Ez az ötvözet az 5000-es, avagy az 5XXX alumínium-magnézium családhoz tartozik. Számomra nagyon fontos tulajdonsága ennek az alumínium ötvözetnek, hogy jól hegeszthető. Az 1000, 3000, és 5000 sorozatok mind jól hegeszthetők, de az 5000-es előnye, hogy kiváló a szerkezeti integritást igénylő alkalmazásokra. [21] Kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik a nem hőkezelhető alumíniumötvözetek között, valamint nagyon jó tengeri és legköri korrózióállóságot mutat. Mindezen tulajdonságoknak köszönhetően remek többek között például tengerészeti felhasználásra. [22] Kémiai összetételét a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: AlMg3 kémiai összetétele [23]

Aluminium	Chromium	Copper	Iron	Magnesium	Manganese	Silicon	Titanium	Zinc	Residuals
94.2% to 97.4%	< 0.3%	< 0.1%	< 0.4%	2.6% to 3.6%	< 0.5%	< 0.4%	< 0.15%	< 0.2%	< 0.15%

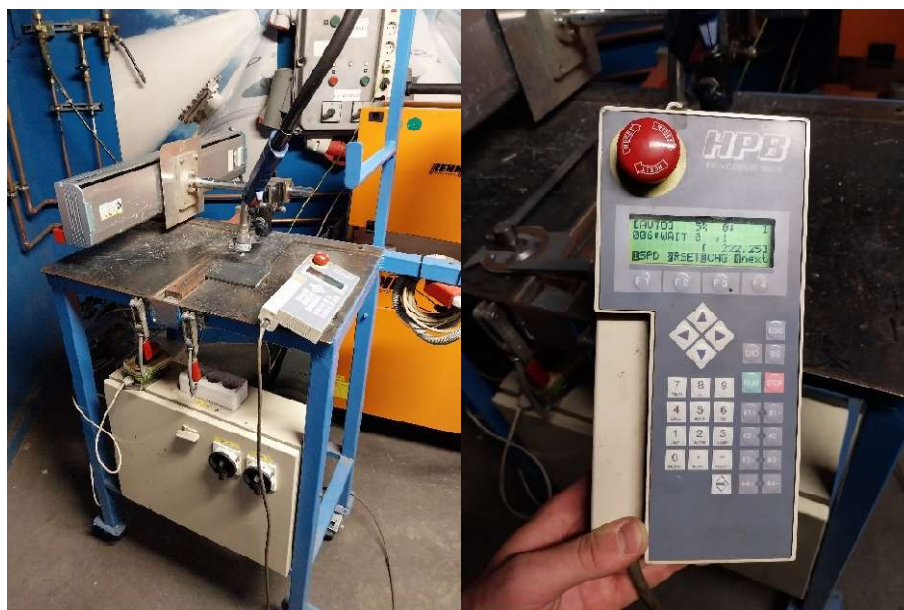
Hegesztőanyagul 5000-es 1,2 mm átmérőjű alumínium-magnézium tömör huzalelektrodát használok. Megjegyzendő, hogy a magnéziumtól hegesztés után fekete kormoszerű réteg lesz a varraton és körülötte, szóval utána alapos tisztításra lehet szükség.



8. ábra: Rehm MegaPuls300 MIG/MAG-hegesztőgép

A hegesztést a 8. ábrán látható Rehm MegaPuls300 MIG/MAG-hegesztőgép használatával végeztem. Az alumínium hegesztéséhez teflon béléses munkakábelt használtam a, hogy ezzel kisebb esély legyen a huzal elakadására és így annak az előtoló görgők általi feltekerésére.

Az emberi tényező megszüntetésére és egyben a robothegesztés szimulálására egyaránt hegesztő automatát használok. Az automata egyenes irányú és egyenletes sebességű mozgást végez két megadott pont között. A sebessége és a végpontok változtathatók. Eredetileg az automata TIG-hegesztés vizsgálatára volt kialakítva, így az eredeti pisztolybefogó készüléket nem tudtam használni a munkámhoz, mert egyrészt nem volt képes a gázterelő befogására, valamint nem lehetett rajta szögeket, így munkaszöget sem változtatni. Bár az alaplaptól való távolság és a befogó keresztirányú helye állítható volt, a befogási és szögállítása problémák miatt nem lehetett az automatát eredeti kialakításában használni. Ezen problémák megoldására hallgatótársammal, aki úgyszintén ezt az automatát használta kutatásához, készítettünk egy új készüléket, amellyel továbbra is lehetett az alaplaptól való távolságot és a keresztirányú helyet állítani, de a munkaszög változtatását, s emellett különböző gázterelőméretek befogását is lehetővé tettük. A modifikált automata a 9. ábrán megtekinthető.



9. ábra: A kísérlethez használt hegesztő automata (bal) és vezérlője (jobb)

A kísérletek elvégzésénél alkalmazott hegesztési paramétereket kísérleti alapon határoztam meg. A kísérletsorozatokban a változtandó paraméter a munkaszög. Először úgy terveztem, hogy 90°-tól 15°-os léptékben mennek 45°-ig vizsgálatom során, de jelentős problémába ütköztem a nagyobb hegesztési síkból való kitéréseknél és folyamatosan a huzal visszaégését tapasztaltam az áramátadóba. Emiatt változtattam terveimen és csak 60°-ig mentem 10°-os léptékkel, de a probléma továbbra is fennmaradt. Végül 5°-os léptékkel végeztem a kísérletet 90°-os munkaszögtől 70°-ig. A munkaszög

pontos beállítását MOM műszerész szögmérő segítségével végeztem. A kísérletsorozathoz használt paraméterek hosszú próbálgatások után: a huzalelőtolási sebesség 7 m/perc, a feszültség 20,5 V, az automata haladási sebessége 8%, azaz a hegesztési sebesség 20 mm/s, valamint a lemez-gázterelő távolság 12 mm. A hegesztéshez tiszta argon védőgázt használtam, tehát MIG-hegesztést végeztem. A hegesztőgépen a további beállítások: 4 ütemre állítottam a gépet, hogy ezzel megkönnyítsem a kísérlet elvégzését és ne zavarjak bele a hegesztőpisztoly folyamatos kézben tartásával, tapasztalt ismerősök ajánlására az alumínium lemezek hegesztését impulzus árammal végeztem, valamint a hirtelen áramelvétel helyett a gépet áramlefutásra állítottam. A hegesztőgép beállításai a 10. ábrán láthatók.



10. ábra: A hegesztőgép beállításai

A minták hegesztése előtt törlőronggyal, majd rozsdamentes drótkefével tisztítom meg a lemezeket. A hegesztést a G épület hegesztő laboratóriumában végezem. A hegesztés után a kész mintákat ismét megtisztítottam rozsdamentes drótkefével. A kész mintákat az MT épület metallográfia laboratóriumában dolgozom fel.

5.2. A varratok kiértékelésének tervezése

Legelső lépés a minták szemrevételezéses vizsgálata. A munkaszög már kisebb változtatásoknál is jelentős és látványos különbségeket produkál már csak a varrat koronoldalát tekintve, így már csak szemrevételezéssel is látványos a munkaszög hatása.

Ezután a lemezekből kivágok mintákat a 11. a) ábrán látható vágógéppel, amelyeket hidegbeágyazással gyantába ágyazok. A kétkomponensű gyanta és a hidegbeágyazáshoz használt kukta a 11. b) és 11. c) ábrákon láthatók. A gyantát merőpohárral és mérőkanállal keverem be a megfelelő eloszlásban és ezzel szilikon formában körbe öntöm a mintát. Ezután kuktába helyezem 15 percig 2-2,5 bar túlnyomás alá, a gyantában lévő

buborékok eltávolítása érdekében. A beágyazott mintákat 11. d) ábrán látható csiszoló berendezésen csiszolom 7 lépésben, a legdurvább csiszolópapírtól a legfinomabbig. A csiszoláshoz SiC szemcsés csiszolópapírokat használtam, melyek közül a legfinomabb papíron 4000 db 6 μm nagyságú SiC szemcse van. Ezt követően polírozom a mintákat a 11. e) ábrán látható polírozógépen. A mágneslapjára helyezem a polírozó posztót, amire 3 μm nagyságú gyémánt szemcséket viszek fel szuszpenzió formájában, s ezen fényesre polírozom a mintákat.



11. ábra: a) vágógép, b) hidegbeágyazáshoz használt anyagok és eszközök, c) csiszolóberendezés, d) polírozógép, e) elszívó berendezés, f) sztereomikroszkóp

A polírozás után, a varratfém jó elkülönülése érdekében a minta felszínét ALMaKo nevezetű, alumínium ötvözetek marására használatos erős marószerral felmaratom. Ennek a marószernak a használatakor a minta felszínére a marószert fülpiszkálóval kell felvinni és elkenni, majd, miután habzani kezd a minta felszíne, azt a habot a fülpiszkáló tiszta felével folyamatosan le kell törölni. A marás elvégeztével a mintákat lemosom és megszáritom, ezzel előkészítve a mikroszkópi felvételek készítésére. A mikroszkópi felvételeket Olympus SZX-16 sztereobinokurális fénymikroszkóppal készítem, mely felvételek alapján a beolvadási mélység, a varratszélesség és a varratdudor-magasság változását vizsgálom a munkaszög függvényében.

6. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

6.1. Varratok szemrevételezése és mintakészítés

Első kísérletsorozatomban 6,3 m/s előtolási sebességgel, 20,6 V feszültséggel és 5%, azaz 12,5 mm/s hegesztési sebességgel végeztem. Korábbi próbálkozásaimnál nehezebbnek találtam a kisebb munkaszögeknel hernyóvarratokat készíteni, ezért ennél a sorozatnál 80°-os munkaszöghöz állítottam be a paramétereket. Azt vártam, hogy így mind a 90°-os mind a 70°-os munkaszögekkel történő hegesztés problémamentesen megtörténne. Elvárásaimmal szemben, ennek pont az ellentétét tapasztaltam. Ezeket a varratokat, amiknek a kiértékelése nehéz volt, a 12. ábra mutatja.



12. ábra: Az első kísérletsorozat, mely egyenetlen varratkoronájú, esztétikailag kifogásolható varratokat eredményezett

Bár maguk a varratok rossz minőségűre sikerült, ennek ellenére kis mértékben megfigyelhető a varratdudrok egyik oldalra történő eltolódása. Ez a legnagyobb mértékben a 80°-os munkaszögnél, a legjobban sikerült varratnál látszódik a legjobban. A többi esetben nem a munkaszög hatásának csökkenése, hanem a rossz hegesztés miatt látszik ez a jelenség csak kevésbé. Azt is tapasztaltam, hogy (főként kisebb munkaszögeknel) az ív stabilitása jelentősen csökken és a leolvadás egyenetlenné válik. A 70°-os

munkaszöggel készült varratnál feltűnő törés figyelhető meg a varrat kétharmadánál. Itt a hegesztés során az ívstabilitás oly mértékben lecsökkent az adott paraméterek mellett, hogy a huzal beledermedt a lemezbe és a hegesztőív, így a további leolvadás hiányában kicsit elhúzta a lemezt, s így már kicsit más szögben állt a lemez az ív visszagyulladásánál. A borzalmas hegesztési minőség miatt a csiszolat készítését értelmetlennek tartottam, s új munkadarabok hegesztése mellett döntöttem.

További kísérletezés után jutottam el a 5.1. alfejezetben bemutatott paraméterekhez. Ezek a 7,0 m/s huzalelőtolási sebesség, 20,5 V feszültség, 8%, azaz 20 mm/s hegesztési sebesség és 12 mm lemez-gázterelő távolság. Ezek a varratok sokkal jobb minőségűre sikerültek. A 90°, 85° és 80°-os munkaszögeknél még összefüggő, huzaltörés nélküli varratokat kaptam, bár a 80°-os már jelentős ívinstabilitást mutatott, ami látszik is annak ciklikus méretváltozásán. A 75°-os és a 70°-os esetekben már az előző kísérlet-sorozatnál tapasztalt huzaltörés ismét megjelent. A varratok készült felvétel a 13. ábrán látható.



13. ábra: Az második kísérletsorozat (a munkaszög balról 70°-kal kezdődik)

A 75°-os és a 70°-os munkaszögek, de kis mértékben a 80°-os esetében is látható, hogy a varrat keresztmetszete a varrathossz mentén nem állandó. Emiatt nem lehetséges pontosan ugyanarról a hegesztési távról kivágni a csiszolati mintákat. Ehelyett közel azonos távról választottam ki az első mintákat, odafigyelve, hogy ezen minták

konstans keresztmetszetű részekről származzanak. Az első minták vágási helyei és a vágás utáni beágyazásra kész minták a 14. ábrán kerülnek bemutatásra.



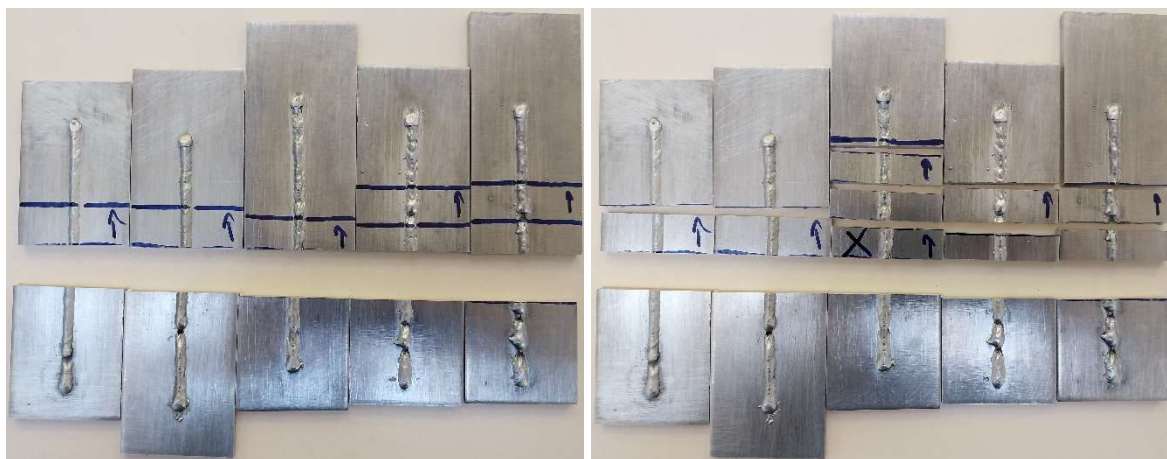
14. ábra: A mintavétel helyei (bal) és a kivágott minták (jobb)

Bár a vágás után szabad szemmel jól el lehetett különíteni a varratfémét és az alapanyagot, mikroszkóp alatt vizsgálva már nehéz volt látni a varratfém körvonalait. Emiatt csiszolatokat kellett készítenem, amiket polírozás és maratás után vizsgáltam. Így a vágások után először beágyaztam a mintákat, majd csiszolás és polírozás után készen álltak a minták a maratásra. Az első vizsgálati hely megmaratott csiszolatai a 15. ábrán láthatók.



15. ábra: Az első vágás maratott csiszolatai (balról 90°-kal kezdve)

Minden varratból csak egy minta készítése és vizsgálata nem lenne teljes mértékben megbízható, hisz akármi rendellenesség is felléphetett a varrat azon pontjában, emiatt minden varratból kivágtam egy második mintát is. Ezeket úgyszintén igyekeztem körülbelül azonos távról kivágni, de az első vizsgálati helyhez hasonlóan, itt is kicsit eltértek a helyek annak érdekében, hogy állandó keresztmetszetből származzanak a minták. A második vizsgálati helyet a 16. ábra mutatja.



16. ábra: A második vizsgálati hely (bal) és a kivágott minták (jobb)

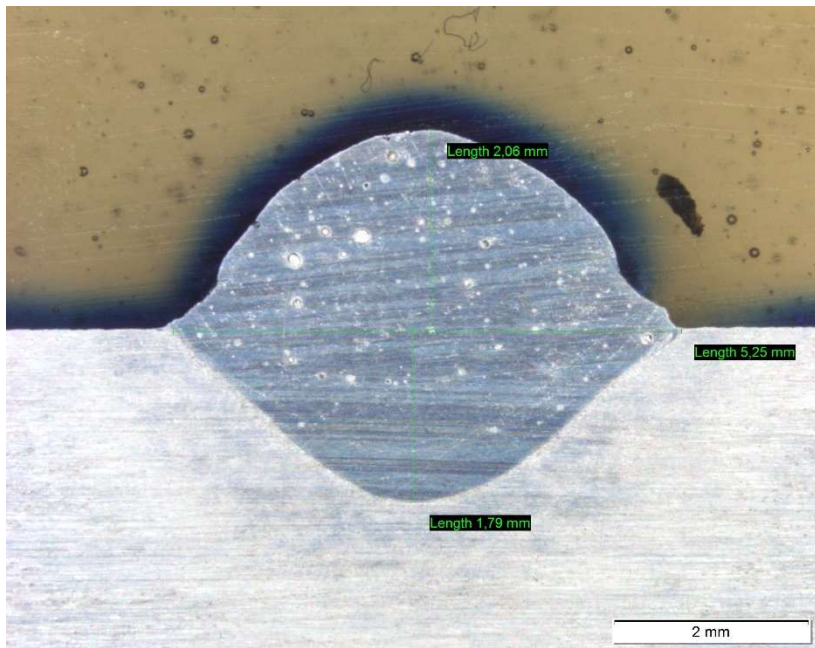
A vágás közben a 80°-os munkaszöghöz tartozó minta helyét utólag megváltoztattam, hogy reprezentatívabb metszetből származzon a minta. Ezekből a mintákból ismét csiszolatokat készítettem, melyeket az első mintasorozathoz hasonló módon polírozás után megmarattam a varratfém kirajzolása érdekében. A második vizsgálati helyről kivett minták megmaratott csiszolatai a 17. ábrán szemlélhetők.



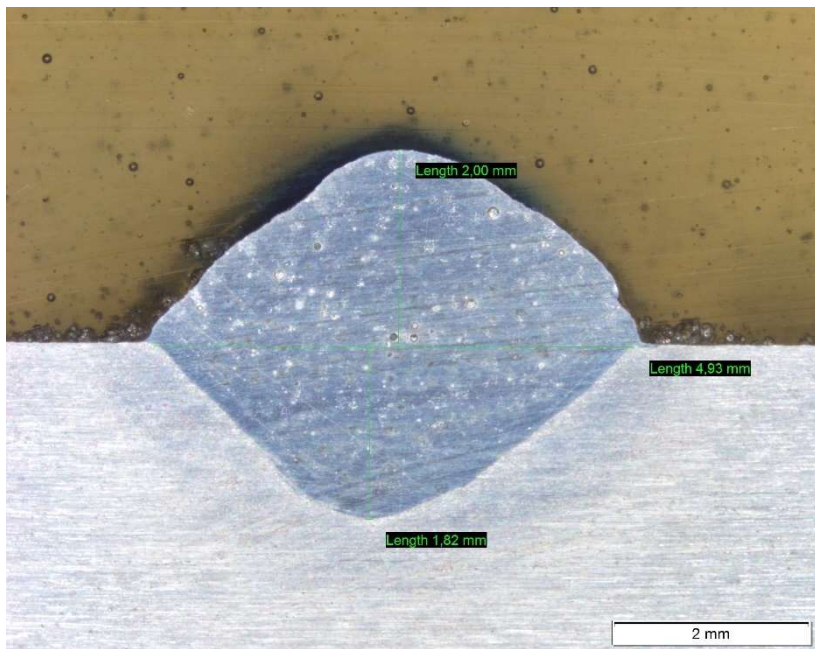
17. ábra: A második vizsgálati helyről származó maratott csiszolatok (balról 90°-kal kezdve)

6.2. Sztereomikroszkóp-felvételek

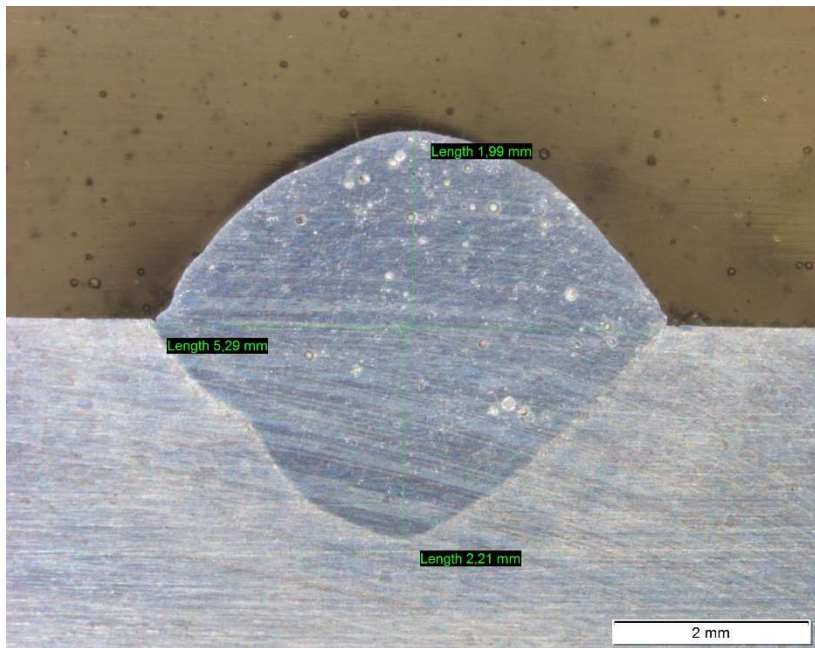
A következőkben először az első mintasorozatról, utána a második mintasorozatról készült mikroszkópfelvételeket mutatom be a 16-odiktól a 25-ödik ábrákon.



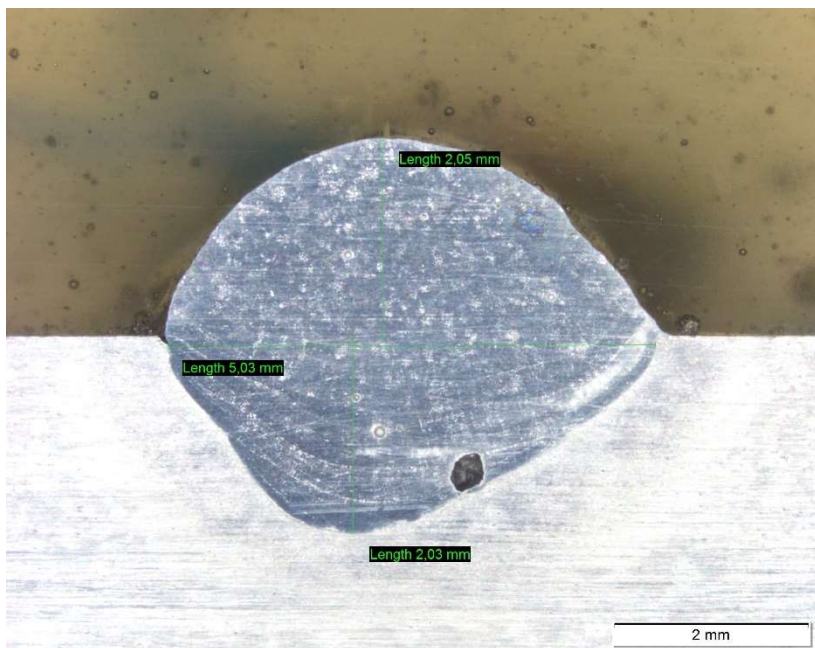
16. ábra: Első mintasorozat 90°-os munkaszög



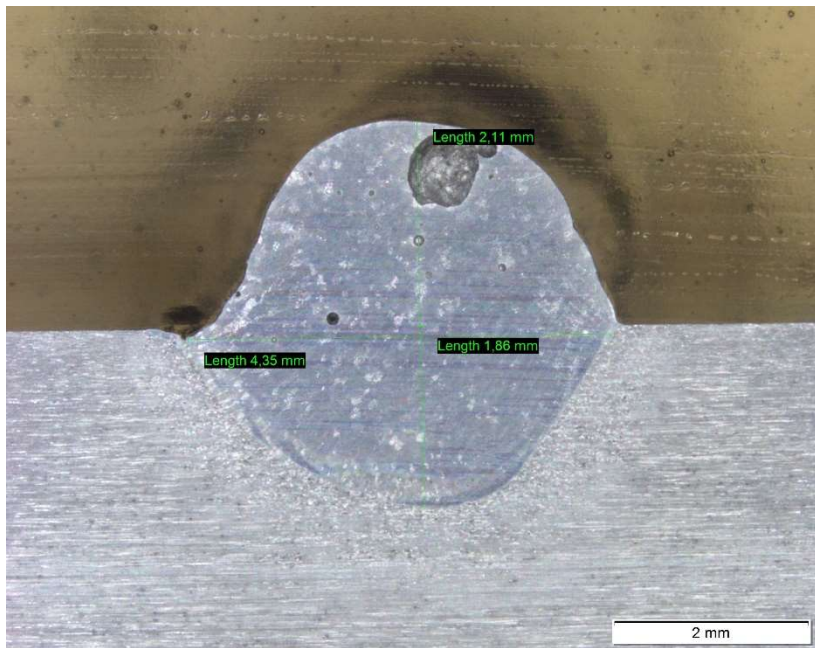
17. ábra: Első mintasorozat 85°-os munkaszög



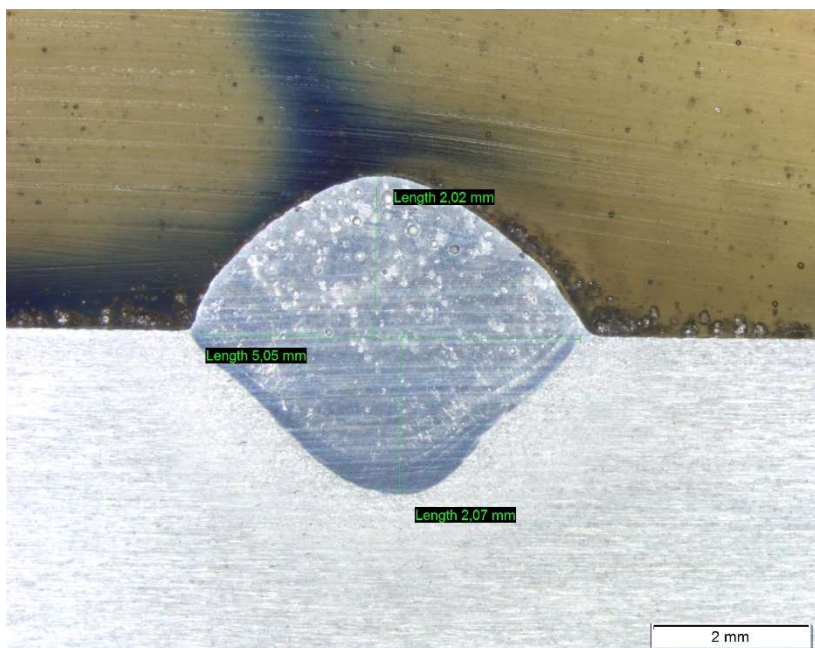
18. ábra: Első mintasorozat 80°-os munkaszög



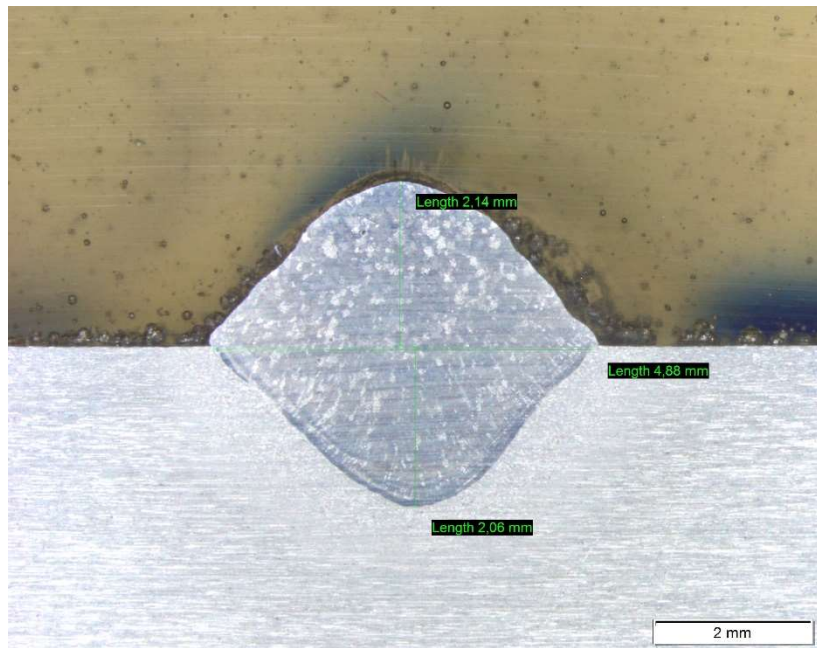
19. ábra: Első mintasorozat 75°-os munkaszög



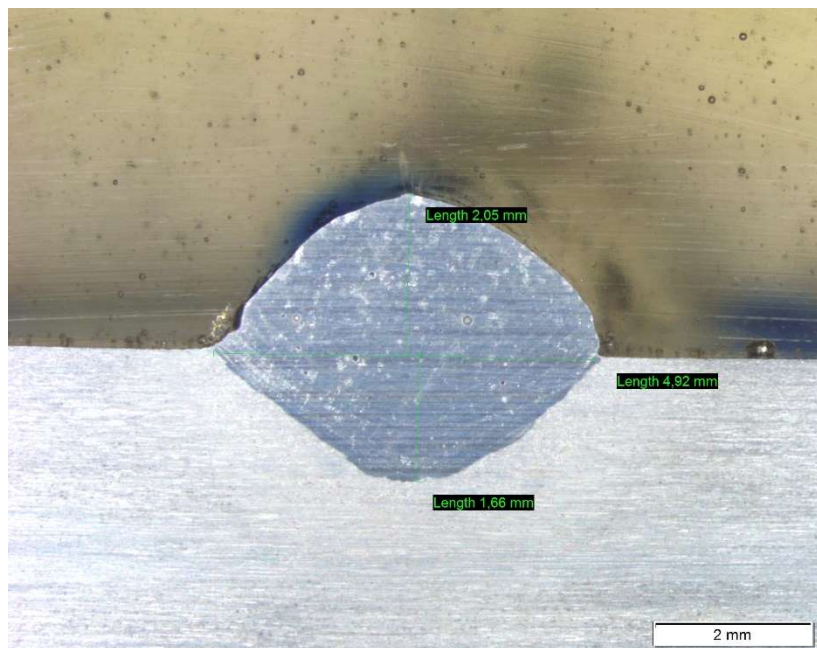
20. ábra: Első mintasorozat 70°-os munkaszög



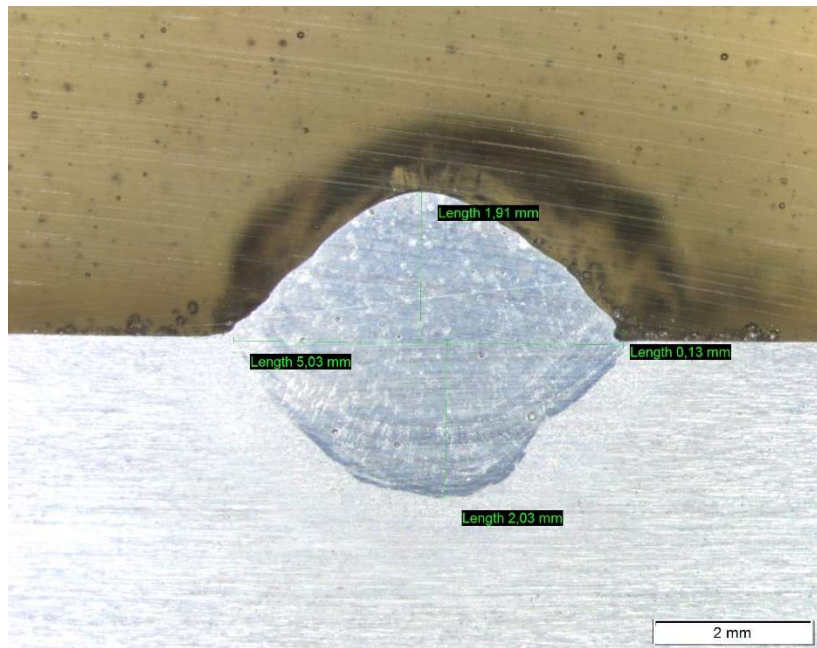
21. ábra: Második mintasorozat 90°-os munkaszög



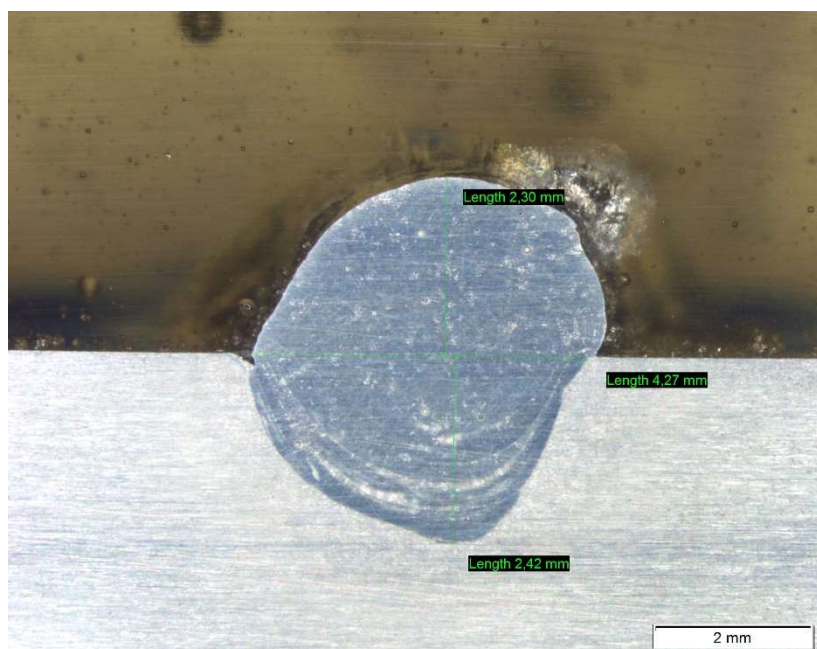
22. ábra: Második mintasorozat 85°-os munkaszög



23. ábra: Második mintasorozat 80°-os munkaszög



24. ábra: Második mintasorozat 75°-os munkaszög



25. ábra: Második mintasorozat 70°-os munkaszög

Meg kell jegyezni, hogy jól látszik a varratképeken, ahogy a munkaszög csökkentésével a beolvadás a munkaszöget követve nem a lemezre merőlegesen, hanem egyre kisebb szöget bezárva változik. A varratméretek és az alaktényező a 7.2. alfejezetben lesznek táblázatba foglalva.

7. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

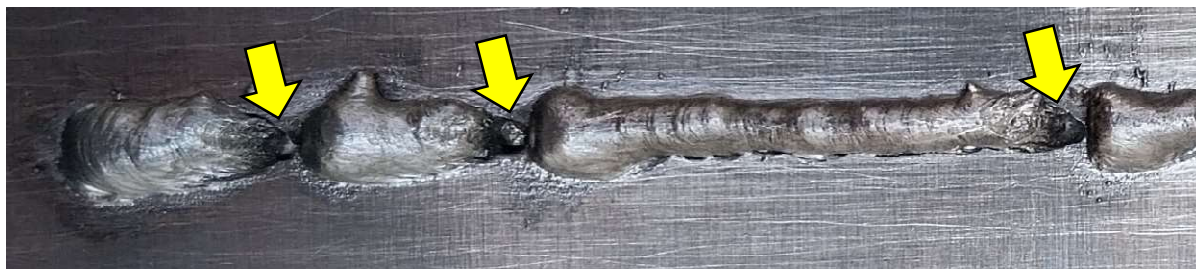
7.1. Szemrevételezés kiértékelése

A 13. ábrán bemutatott vágás előtti munkadarabok egyszerű szemrevételezéses vizsgálatánál már több dolog is megfigyelhető, még a csiszolatok vizsgálata előtt is.

Elsőként, megfigyelhető, ahogy a munkaszög csökkentésével a varratdudor egyre jobban eltolódik a huzalbevezetéstől ellentétes oldalra. Már ezen az egy jelenségen érzékelhető, hogy jelentős hatással van a munkaszög a hegesztett kötésre, főként a varratalakra.

Második megfigyelés a varrat „textúrája”. A varratfelszínen látható a TIG-hegesztésre emlékeztető cseppes felépítés. Ez az impulzus áram használatából ered. Az impulzus áram használata alumínium hegesztésénél a jó hővezetés és az alacsony olvadáspont okozta problémák elkerülése érdekében ajánlott. Impulzus MIG-hegesztés sokkal nagyobb hőszabályozást tesz lehetővé, hogy elegendő hőt juttassunk a munkadarabba a sikeres hegesztéshez, de elkerüljük a nagyobb mértékű vetemedést vagy átégéseket [24]. A vizsgálatom szempontjából ennek viszont hátránya is van. A varratdudor és a varratszélesség, bár kis amplitúdójú, de periodikus változást mutatnak, ami miatt ezek a kívülről állandónak tűnő méretek nem lesznek állandóak. A varratdudor mindenképpen változó magasságú lesz, de ez a varratszélességre és lehetséges, hogy a beolvadási mélységre is kis mértékben kihat, így ezt szem előtt kell tartanom a csiszolatok kiértékelése során.

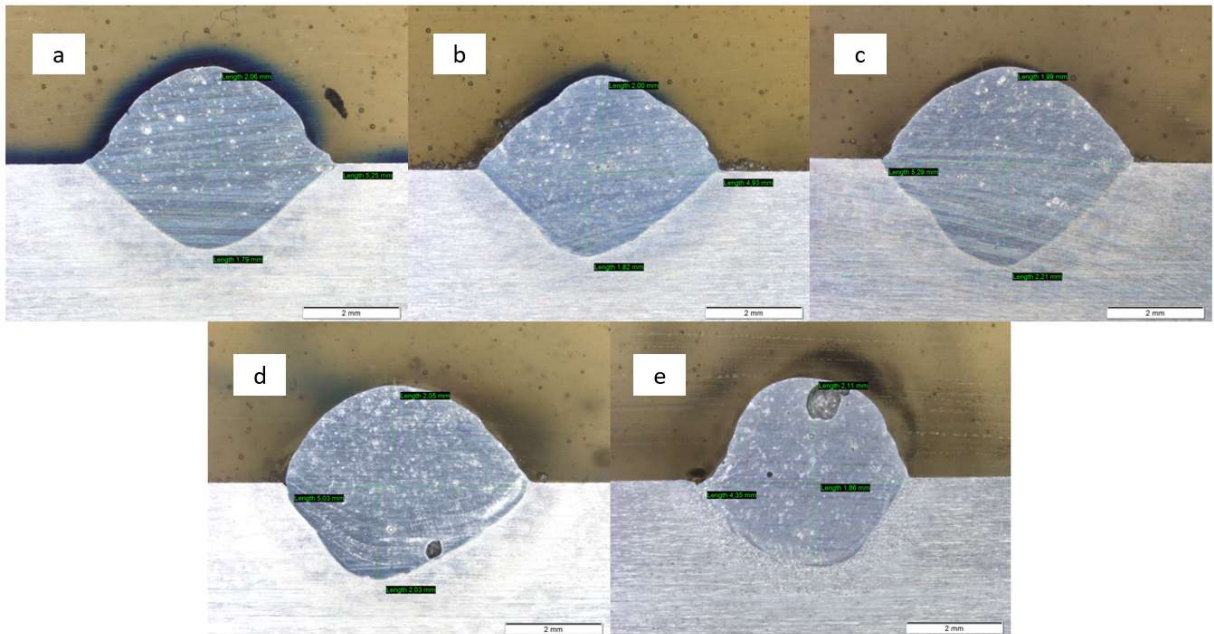
Utoljára a varrat esztétikai minőségét értékelem szemrevételezéssel. A varratdudor eltolódásához hasonlóan a varratok esztétikai minősége, „szépsége” is jelentős munkaszög függést mutat. A 90°-os és a 85°-os munkaszögeknél még megfelelő varratokat kaptam. A 80°-os munkaszögnél, bár még összefüggő a varrat, a keresztmetszete az ív instabilitásából adódóan már nem állandó. A 75°-os és a 70°-os munkaszögeknél már az ív instabilitásból eredő szakadozott varratot kaptam. A megszakadások helyeinél az ív kialvása és visszagyulladás után a huzal tördelését tapasztaltam, mely huzaltörés helyeire a 26. ábrán látható példa. Az ábrán sárga nyilakkal jelölt helyeken a huzal maradványai is láthatók a kráterekben.



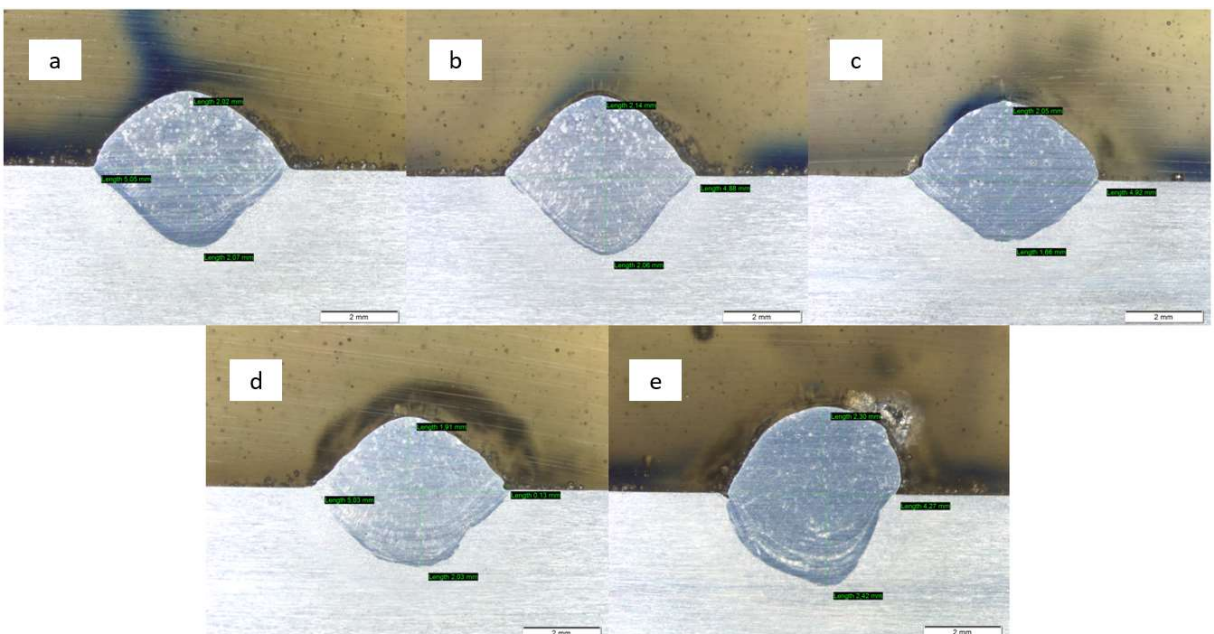
26. ábra: Huzaltörés helyei a 70°-os munkaszögnél

7.2. Mikroszkópfelvételek kiértékelése

A felvételek átláthatóságának növelése érdekében a fotókat egy képbe összevonva illeszttem a 27. és a 28. ábrákon.



27. ábra: a) 90°, b) 85°, c) 80°, d) 75°, e) 70° munkaszög (első vizsgálati hely)



28. ábra: a) 90°, b) 85°, c) 80°, d) 75°, e) 70° munkaszög (második vizsgálati hely)

A felvételeken, bár nem az összes esetben, de megfigyelhető, hogy a munkaszög csökkentésével a porozitások mennyisége és nagysága növekedett. Ezt a gázvédelem-

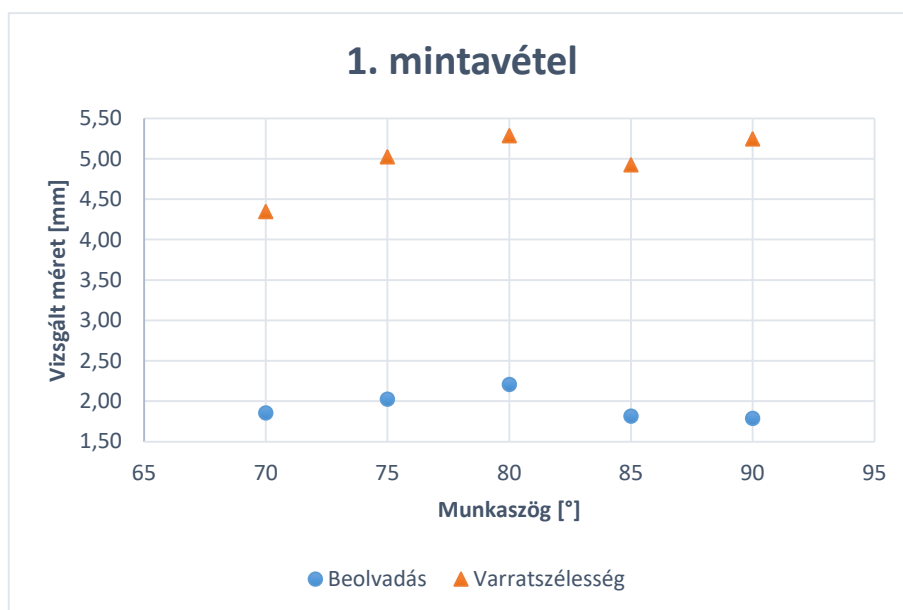
csökkenés hatásának állítok. Ez az első vizsgálati hely csiszolatainál a legfeltűnőbb, ahol a 75°-os és a 70°-os munkaszögeknél kifejezetten nagy pórusok figyelhetők meg.

A csiszolatokon jól látható, hogy a munkaszög növelésével a varratkeresztmetszet egyre jobban eltérül a 90°-os szimmetrikus helyzettől. A pontos varratméreteket a 2. táblázat tartalmazza.

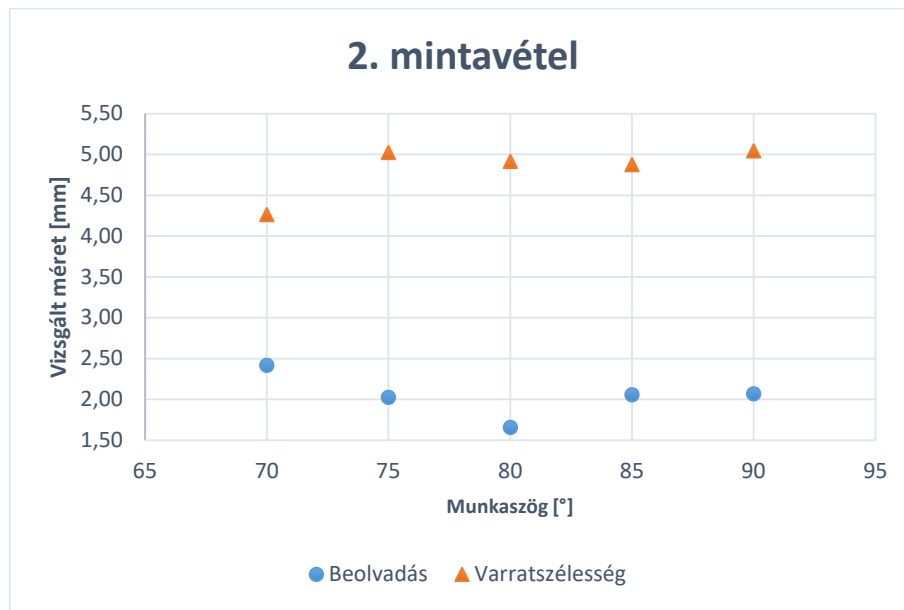
2. táblázat: A csiszolatokon mért varratméretek és az alaktényező

Munkaszög	P [mm]	W [mm]	R [mm]	Alaktényező [-]
90	1,79	5,25	2,06	0,3410
85	1,82	4,93	2,00	0,3692
80	2,21	5,29	1,99	0,4178
75	2,03	5,03	2,05	0,4036
70	1,86	4,35	2,11	0,4276
90	2,07	5,05	2,02	0,4099
85	2,06	4,88	2,14	0,4221
80	1,66	4,92	2,05	0,3374
75	2,03	5,03	1,91	0,4036
70	2,42	4,27	2,30	0,5667

Legelőször a beolvadási mélység (P) és a varratszélesség (W) munkaszögváltozásra mutatott választát vizsgálom. Ezek az adatok diagrammon ábrázolva a 29. és a 30. ábrán tekinthetők meg.



29. ábra: A beolvadási mélység és a varratszélesség változása az első mintavételnél

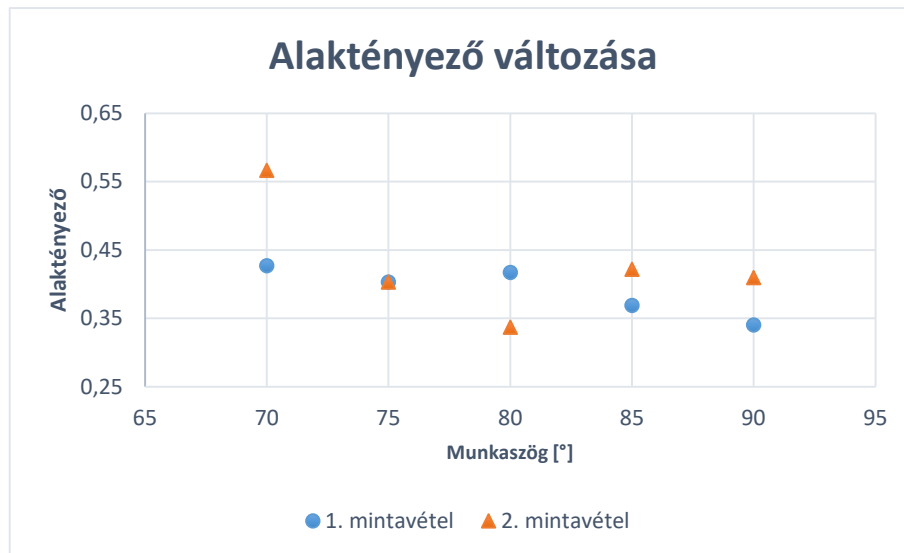


30. ábra: A beolvadási mélység és a varratszélesség változása az második mintavételnél

Mindkét adatsor esetében a beolvadás a 90°-ról a 85°-ra nagyon minimálisan csökkent, a 80°-os munkaszögnél viszont már jelentős különbséget látni az első mintavétel és a második mintavétel között. Ez a különbség, feltételezem, hogy már az instabil ívből következő váltakozó keresztmetszetből ered. A 75°-os és a 70°-os munkaszögnél az első mintavételnél a beolvadás folytonos csökkenése, a második mintavételi helynél a beolvadás növekedése látható. A második mintavételi helynél a beolvadási mélység növekedése a varratszélesség hasonló mértékű csökkenésével párosult. Feltételezem, hogy ebben a jelenségben az ív stabilitásának van szerepe, de ennek igazolásához további kísérletek szükségesek. A csiszolatok alapos vizsgálatával kijelenthető, hogy a varratkeresztmetszetekben a varratfém területe és a varratalak a munkaszög függvényében. A kisebb munkaszögekhez egyre jobban „torzuló”, aszimmetriát mutató varratalak párosul. A varratfém területének vizsgálatát jelen kutatásban idő hiányában még nem végzem el, de a változás leírása érdekes összefüggésekre világíthat rá.

A varratszélesség a beolvadási mélység változásánál már szabályosabb összefüggést mutat. Mindkét mintavételi hely esetében a munkaszög csökkenésével a varratszélesség csökkenése figyelhető meg. A 85°-os munkaszögnél mindkét esetben jelentős csökkenés figyelhető meg, ami után a 80°-ra már vissza növekszik a varratszélesség. Úgy gondolom, hogy ez a változás a korábban említett textúrából ered. Valószínűnek tartom, hogy a 80°-os minták pont a „gyöngyök” közötti, kisebb szélességű és varratdudorú részokről erednek, s így részben kiugró értéket kaptam. Ezen bizonytalanság miatt lehetett volna hibásávot helyezni a varratszélesség értékeire, de a textúrából következő változások pontos határait nem ismerem, ez további kutatást igényelne.

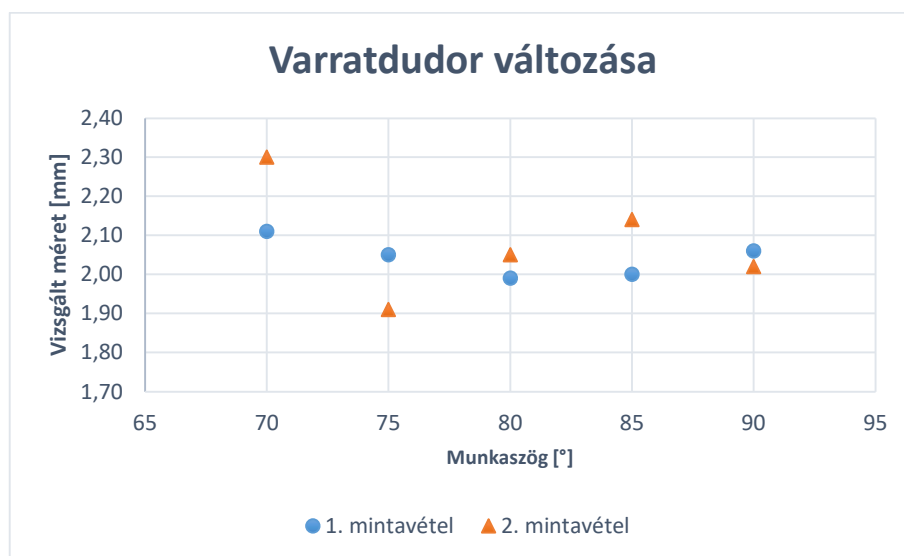
A következő vizsgálandó méret a varratdudor magassága. A varratdudor-magasság és a munkaszög összefüggése a 31. ábrán látható.



31. ábra: A varratdudor-magasság változása

Az értékek az első mintavételnél enyhén emelkedő tendenciát mutatnak, a második mintavételi helyről származó értékeknél az emelkedő tendenciahatározottabb, eltekintve a 75°-os munkaszög trendtől eltérő értékétől. A kísérleti eredmények alapján a dudormagasság növekedése a munkaszög csökkenésével kijelenthető.

Az utolsó vizsgálandó érték a beolvadási mélység és a varratszélesség hányadosából kapott alaktényező. Az alaktényező diagramja a 32. ábrán látható.



32. ábra: Az alaktényező változása

Mindkét adatsor alapján látható, hogy az alaktényező a munkaszög csökkenésének hatására növekszik. Bár az első mintavételi helynél a 75°-os munkaszögnél, a második mintavételnél pedig a 80°-os munkaszögnél csökkenés tapasztalható, úgy gondolom, hogy ez az előző kiugró értékhez hasonlóan a varrattextúrából ered.

Az elvégzett kísérletek eredményeinek kiértékelése alapján összegezve kijelenthető, hogy:

- a varratszélesség csökken a munkaszög csökkentésével
- a dudormagasság növekszik a munkaszög csökkentésével
- az alaktényező növekszik a munkaszög csökkentésével

A kísérleteim eredményeként látható, hogy az alumínium nagyon érzékeny a munkaszög változtatására. A munkaszög változtatása nemcsak a varratméretek változását és a varrat torzulását, hanem nagyobb szögváltoztatásoknál az ív instabilitását és a varrat szakadozását is eredményeztetheti. Emiatt tompa varratok hegesztéséhez 90°-os munkaszöget ajánlok és a varrat minőségének biztosítása érdekében csak pár fokos eltérések engedélyezését ajánlom.

8. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_aluminium (2023.09.14.)
2. <https://hu.wikipedia.org/wiki/Alum%C3%ADnium> (2023.09.08.)
3. <https://www.weforum.org/agenda/2021/10/all-tonnes-metals-ores-mined-in-one-year/> (2023.09.14.)
4. <https://www.statista.com/statistics/280983/share-of-aluminum-consumption-by-sector/> (2023.09.14.)
5. <https://www.uti.edu/blog/welding/aluminum-welding> (2023.09.17.)
6. <https://mechanical-hub.com/is-mig-welding-dc-or-ac/> (2023.09.22.)
7. <https://weldguru.com/welding-parameters/> (2023.09.28.)
8. <https://inbound.cammmetals.com/blog/what-are-the-challenges-of-welding-aluminum> (2023.09.22.)
9. Schubert, E. (2018) Challenges in Thermal Welding of Aluminium Alloys. *World Journal of Engineering and Technology*, 6, 296-303.
10. <https://fractory.com/aluminium-welding-explained/> (2023.09.22.)
11. <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/the-most-common-mig-weld-defects-on-aluminum-and-steel-and-how-to-avoid-them> (2023.09.22.)
12. <https://weldguru.com/welding-burn-through/> (2023.09.24.)
13. Rizki Dwi Ardika, Teguh Triyono, Nurul Muhayat, Triyono* (2021) A review porosity in aluminium welding. *Procedia Structural integrity* 33 (2021) 171-180.
14. R. A. Woods (1974) Porosity and Hydrogen Absorbtion in Aluminium Welds. *Supplement to the Welding Journal, March 1974*
15. Akshat Sharma, Ayush Verma, Devashish Vashisth, Pradeep Khanna (2022) Prediction of bead geometry parameters in MIG welded aluminium alloy 8011 plates. *Materials Today: Proceedings* 62 (2022) 2787-2793
16. <https://www.lincolnelectric.com/en/welding-and-cutting-resource-center/process-and-theory/variables-that-affect-weld-penetration> (2023.09.06.)
17. Khalid Abbasi, S. Alam, Dr. M. I. Khan (2012) An Experimental Study on the Effect of MIG Welding parameters on the Weld-Bead Shape Characteristics. *IRACST – Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ)*, ISSN: 2250-3498, Vol.2, No. 4
18. Aman Kumar Chaurasia, Anshul Aggarawal, Pradeep Khanna (2023) Mathematical modelling to predict bead geometry in MIG welded aluminium 6101 plates. *Materials Today: Proceedings* xxx (xxxx) xxxx
19. <https://constructionmanuals.tpub.com/14250/css/Arc-Welding-Positions-144.htm> (2023.09.28.)

20. Huijun Lee, Changwook Ji, Jiyoung Yu (2018) Effects of welding current and torch position parameters on bead geometry in cold metal transfer welding. *Journal of Mechanical Science and Technology* 32 (9) (2018) 4335-4343
21. <https://www.xometry.com/resources/materials/5754-aluminum-alloy/> (2023.11.01.)
22. https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/_legacy/UCPthyssenkruppBAMXUK/assets/files/material-data-sheets/aluminium/5754.pdf (2023.11.01.)
23. https://en.wikipedia.org/wiki/5754_aluminium_alloy (2023.11.01.)
24. <https://www.weldclass.com.au/blog/94-what-is-a-pulse-mig-a-how-why-guide-to-pulse-mig-welding> (2023.11.04.)