

Hirt Péter<sup>\*1</sup>, Dr. Varbai Balázs<sup>\*2</sup>, Katula Levente <sup>\*3</sup>

## ***Alumíniumötvözetek kristályosodási repedésének vizsgálata – különböző hegesztő hozaganyagok összehasonlítása***

<sup>\*</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és Technológia Tanszék,  
1111 Budapest, XI. Bertalan L. u. 7.

<sup>1</sup>peterhirt@gmail.com, <sup>2</sup>varbai@eik.bme.hu, <sup>3</sup>katula@att.bme.hu

### **Absztrakt:**

A kutatómunkánk az alumíniumötvözetek kristályosodási repedésével foglalkozik. A kristályosodási repedés kialakulásának több oka lehet: a húzó maradófeszültségek, amelyek a kristályosodás és az az utáni hűlési folyamat közben jönnek létre, a síkfrontos kristályosodás, az előnytelen varratgeometria vagy a szennyezők szegregációja a varratfémekben. Az alumínium ívhegesztésének esetében a megfelelő hozaganyag alkalmazása nagyon fontos szempont. A hozaganyag alkalmazásának hatására volfrámelektródás semleges védőgázos ívhegesztés (TIG-hegesztés) esetében is megváltozik a varratfém kémiai összetétele. Ennek megfelelően a különböző típusú hozaganyagok különböző hatást gyakorolnak a varratfém kristályosodási repedéssel szembeni érzékenységre. A kutatásunk során ezeket a hatásokat vizsgáltuk két hozaganyag, a 4043 és 4047 típusú tömör pálcák alkalmazásával, 6082-T6 alumíniumötvözet alapanyagon. Mindkét hozaganyag szilíciummal (Si) ötvözött. A 4043 típusú TIG-pálca a legáltalánosabb és legnagyobb körben alkalmazott hozaganyag alumíniumötvözetek hegesztésére. A 4043-as pálcát főként az AlMgSi típusú alumíniumötvözetek hegesztéséhez használják, ahol a körülbelül 7%-os Si-tartalomnak köszönhetően az ömledék folyóképessége megnő, így a szakirodalom szerint a kristályosodási repedéssel szembeni ellenállása is növekszik. A 4047 típusú hozaganyagoknak nagyobb, körülbelül 12%, a Si tartalma. A 4047-es hozaganyagot eredetileg keményforrasztáshoz fejlesztették ki, de a nagy Si-tartalomnak köszönhetően ezen hozaganyag használata a hegesztés során is jelentős előnyökkel bír. A 12% körüli Si-tartalom miatt csökken a varratfém likvidusz hőmérséklete, kisebb a kristályosodási hőköz és csökken a szegregációval szembeni érzékenység. Ezen hatások miatt a gyártók által kiadott katalógusok szerint jelentősen csökken a kristályosodási repedéssel szembeni érzékenység. A különböző hozaganyagok értékeléséhez Houldcroft-vizsgálatot, más néven halszákapróbát alkalmaztunk. A vizsgálat lényege, hogy egy megfelelően kialakított próbadarabon megmért repedéshosszal jellemezhető a kristályosodási repedéssel szembeni érzékenység minden hozaganyag esetében, majd a kiértékelést a mért repedéshosszak összehasonlításával lehet elvégezni. A halszáka próbatest geometriájának hatását végelesemes szimuláció segítségével vizsgáltuk. A vizsgálatok során a legelőnyösebb hozaganyagként a 4047 típusú adódott. Ezen kívül a varratalakot, mikrokéménységet és a varratfém szövetszerkezetét is összehasonlítottuk a 4043 és 4047 típusú TIG-pálcával készült varratok esetében.

### **Abstract:**

Our paper is focusing on the solidification cracking behaviour in the case of arc welding of aluminium alloys. The reasons for solidification cracking can be various: tensile residual stress during solidification and subsequent cooling, presence of contamination, cellular solidification morphology, weld metal geometry, or segregation. In the case of aluminium arc welding, the usage of proper filler material is essential. Using filler material in case of tungsten inert gas (TIG) welding of aluminium alloys changes the chemical composition of the molten pool, thorough dilution. Thus, in our research, we focused on the influence of different filler materials on the solidification cracking behaviour. For this research, three different types of TIG filler rods were investigated, which were recommended in scientific literature to minimize the solidification cracking susceptibility. Two TIG rods were investigated, the 4043 and the 4047 filler materials, which are alloyed with silicon (Si). The base material was 6082-T6 aluminium alloy. The 4043 TIG rod is one of the most widely used filler metal for aluminium TIG welding. This type of TIG rod is mainly used for the welding of AlMgSi alloys, where the 7% Si content ensures the molten pool fluidity and the general resistivity against cracking according to the literature. The 4047 TIG rod has a higher Si content, ~ 12%. This type of filler material was initially developed as a brazing alloy. Due to its higher Si content, the molten pool has a lower melting point, and narrower solidification range, which reduces the susceptibility to segregation, and thus, according to the welding handbooks, "the risk of hot cracking is significantly reduced". For

the evaluation of using different filler materials, Houldcroft, also known as fishbone tests, were performed. In the case of Houldcroft test, the crack length from the starting edge of the test specimen is used to indicate the susceptibility to cracking. For the specimen, different slots of varying depth is machined into the plates, which resulting in different thermal expansion and stiffness condition of the plate during welding. The effect of the geometry of the fishbone specimen was investigated with a finite element simulation. In our research, it was found that the best results were obtained using the high Si content 4047 TIG rod. Also, the weld geometries, microhardness, and microstructure were compared to the sample, welded with 4043 rod.

## 1. Bevezetés

Az alumínium és ötvözetek, előnyös tulajdonságaik miatt, széles körben elterjedtek mind háztartási, mind ipari környezetben. Elterjedtségüknek megfelelően az anyagcsoport hegesztése hazánkban is gyakran kutatott terület [1,2,3,4,5].

Az alumínium kis sűrűségének (2700 kg/m<sup>3</sup>) köszönhetően kiválóan alkalmazható a járműiparban, ahol egyre nagyobb hangsúlyt fordítanak a fajlagos tömegcsökkentésre. Elektromos vezetőképességének köszönhetően az elektronikai ipar is előszeretettel alkalmazza [6,7].

Az alumínium ötvöztetésének egyik célja a szilárdságának növelése. A növelt szilárdságú alumíniumötvözetek – bizonyos esetekben – alkalmassak lehetnek az acélok kiváltására is. Az alumínium fő ötvözői a réz (Cu), a mangán (Mn), a szilícium (Si), a magnézium (Mg) és a cink (Zn) [8]. Ezen ötvözők szerint az alumíniumötvözetek 8 különböző anyagminőségi csoportba sorolhatók az MSZ EN 573-1:2005 'Alumínium és alumíniumötvözetek. Az alakított termékek vegyi összetétele és alakja. 1. rész: Számjelölési rendszer' című szabvány [9] alapján.

Az alumíniumötvözetek hegesztése során sok és jelentős probléma léphet fel [10]. Alumínium hegesztésekor (i) az előkészületek során, (ii) a hegesztés közben és (iii) a hegesztési utómunkálatok során is ügyelni kell a technológiai fegyelem betartására. Az alumínium hegesztése során kialakuló legfontosabb problémák a varratfém melegrepedése, a varrat-

fém porozitása, a kötés lágyulása és az oxidréteg feltörésének nehézsége [10,11].

Az alumíniumot és ötvözeit legtöbbször volfrámelektrodás, semleges védőgázos ívhegesztési eljárással (TIG-hegesztés) hegesztik. Leginkább jellemző a 141-es eljárás (MSZ EN ISO 4063:2016 'Hegesztés és rokon eljárások. A hegesztési eljárások megnevezése és azonosító számuk' című szabvány [12] szerint), amely során semleges védőgázt, és hozaganyagként tömör pálcát használunk. Az alábbi cikkben leírt kísérletben [13] is a 141-es eljárást alkalmaztuk, különböző tömör hozaganyagokkal. A védőgáz az MSZ EN ISO 14175:2008 'Hegesztőanyagok. Gázok és gázkeverékek ömlesztőhegesztéshez és rokon eljárásokhoz' című szabvány [14] szerint I1 típusú, azaz tiszta argon (Ar) volt.

A kísérlet célja a különböző kémiai összetételű hozaganyagok összehasonlítása volt Houldcroft vizsgálat, más néven halszálla próba, segítségével (MSZ 4312-2:1978 'Alumínium és alumíniumötvözetek hegeszthetőségi vizsgálata. Alapanyag melegrepedés-érzékenységi vizsgálata, halszálla-próbatesttel' című szabvány [15]).

## 2. Alumíniumötvözetek kristályosodási repedése

A melegrepedések csoportjába tartozó kristályosodási repedés az egyik legjelentősebb hegeszthetőségi probléma. A kristályosodási repedés a varrat megszilárdulása során jön létre. Kialakulásának oka (i) az anyagban található szennyezők és ötvözők jelenléte, (ii) a kristályosodás morfoló-

giája, valamint (iii) a hegesztés során kialakuló belső húzófeszültségek. Az alumíniumötvözetek ívhegesztése esetén az ötvözők hatására is kialakulhat kristályosodási repedés, ezért a hegesztés tervezésénél figyelembe kell venni az egyes ötvözőtartalmakat [10,16]. Minden ötvöző esetében van egy kritikus ötvözőtartalom (Hot-short range), amely mellett a legnagyobb a kristályosodási repedés kockázata. A hegesztés tervezése során ezeket, az 1. táblázatban bemutatott, kritikus értékeket lehetőség szerint el kell kerülni.

| Ötvözet | Kritikus ötvözőtartalom (%) |
|---------|-----------------------------|
| Al - Si | 0,5 – 1,2                   |
| Al - Cu | 2,0 – 4,0                   |
| Al - Mn | 1,5 – 2,5                   |
| Al - Mg | 0,5 – 2,5                   |
| Al - Zn | 4,0 – 5,0                   |
| Al - Fe | 1,0 – 1,5                   |
| Al - Li | Nincs adat                  |
| Al - Ni | Nincs adat                  |

1. táblázat: Az alumíniumötvözetek melegrepedés szempontjából kritikus ötvözőtartalmak [10]

Adott alapanyag-hozaganyag párosítás hegesztésénél a kristályosodási repedés érzékenység meghatározásának egyik módja a Houldcroft vizsgálat.

## 3. A halszálla próbatest geometriájának szimulációs vizsgálata

A [15] szerinti halszálla próba lényege, hogy egy speciálisan kialakított próbatesten végzett hegesztés után a megmért repedéshosszból kiszámolható az alapanyaghoz a ho-

zaganyag relatív megrepedésérzékenysége. Fontos megjegyezni, hogy bár a [15] tartalmaz előírásokat a hegesztés körülményeire, de ezek főleg a hozaganyag hozzáadásánál és a hőbevitel alkalmazásánál nem konkrét értékeket, hanem tartományokat adnak meg. Ez egy összehasonlító vizsgálat, így a kísérlettel meghatározott számszerű repedésérzékenységet nem érdemes más kísérletekhez felhasználni, mivel a kísérletek körülményei közti különbség a számszerű eredményekben is nagy eltérésekhez vezethet. Ugyanakkor egy alapanyagon több hozaganyaggal végzett kísérlet eredményei közötti relatív viszony megbízhatóan használható.

A halszáлка próbatesten annak geometriája miatt, könnyebben alakul ki a hegesztés során kristályosodási repedés, mint bemetszetlen próbatesten. Ez annak köszönhető [15] szerint, hogy az ív előtti, a még nem megömlesztett térfogatrészen nincs alakváltozás.

Egy szimuláció segítségével szemléltethető a halszáлка próbatest kialakításának hatása. A szimulációban tiszta alumínium (legalább 99,5% alumíniumot tartalmazó ötvözet, más néven Al 99,5) anyagmodelljét alkalmaztuk. Az 1. a) ábra az anyag

hőmérsékletfüggő alakítási szilárdságát mutatja a hőmérséklet és az alakváltozás függvényében. Az anyagok hőmérsékletfüggő mechanikai tulajdonságainak kimérése jelentős laboratóriumi munkával, azaz költséggel jár. Költséges voltunk miatt ezen anyagmodellek nem szabadon hozzáférhetők. Vizsgálatinkban ezért voltunk kénytelenek az általunk elérhető és a vizsgált anyagot tulajdonságaiban legjobban közelítő anyagmodellel helyettesíteni.

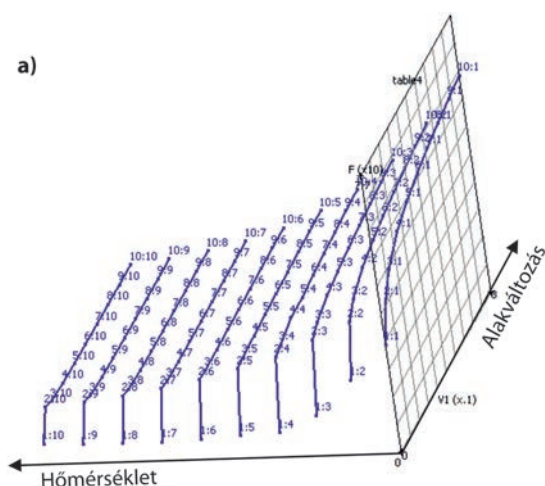
A végeselemes számításhoz a Marc and Mentat 2019 végeselemes szoftvert alkalmaztuk. A geometriát az Autodesk Inventor 3D modellező program segítségével hoztuk létre.

A szimulációhoz szükséges 3D hálózatot a Marc and Mentat 2019 beépített hálózatkezelő rutinjával, négyzetű, sík quad elemeknek a lemez síkjára merőleges kihúzásával hoztuk létre. Szélességben és hosszúságban közepén 1x1 mm-es elemeket, míg a lemezek széle felé egyre nagyobb, 2x2 mm-ig növekedő elemeket alkalmaztunk. A 2 mm-es vastagság mentén 4 elemet használtunk. A végeselemes szimuláció során a kényszerek felvételénél az volt a célunk, hogy azok minél kisebb térfogatra koncentrálódjanak.

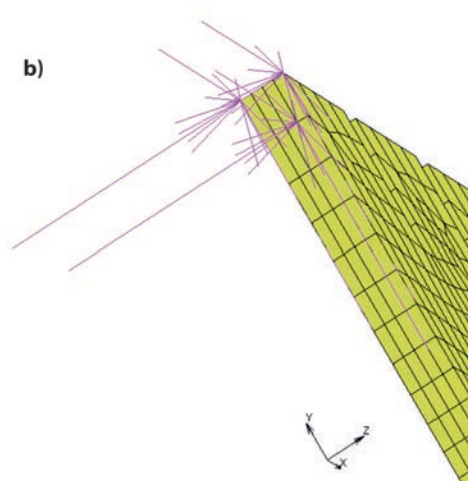
Így a hatásuk lokális. Ennek megfelelően, 3 csomópontban, a darabok sarkánál fogtuk meg a próbatesteket, ahogy azt az 1. b) ábra mutatja.

A mozgó hőforrással hozaganyag nélküli hegesztést szimuláltuk. Az ív által átadott energiát a Goldak-féle dupla ellipszoidokkal közelítettük. A 2. ábrán bemutatott dupla ellipszoid alakjáról és méretéről több tudományos cikk is született. A talált források rendre vastagabb és más alapanyagú darabok, nagyobb ívenergiával való hegesztéséről értekeznek [17,18,19]. Emiatt az ott megadott értékeket a saját modellünknek megfelelően módosítottuk. A dupla ellipszoidot végül a 2. táblázatban foglalt értékekkel adtuk meg.

A szimuláció során egy 2 mm vastag szabványosan kialakított halszáлка próbatestet (3. a) és b) ábra) és egy bemetszetlen próbatestet (3. c) ábra) hasonlítottunk össze. 2 mm vastag alumínium lemezek tompa varratához, hegesztési paraméterek megválasztását segítő műhelyi táblázat alapján a hegesztés szimulációjánál 0,7 kJ/mm volt az ívenergia és 1 mm/s a hegesztési sebesség. A futtatási eredményeket a lemez szélétől 15 mm-re, a lemez felületén választott pontban hasonlítottuk össze, amit a 3. táblázat mutat.



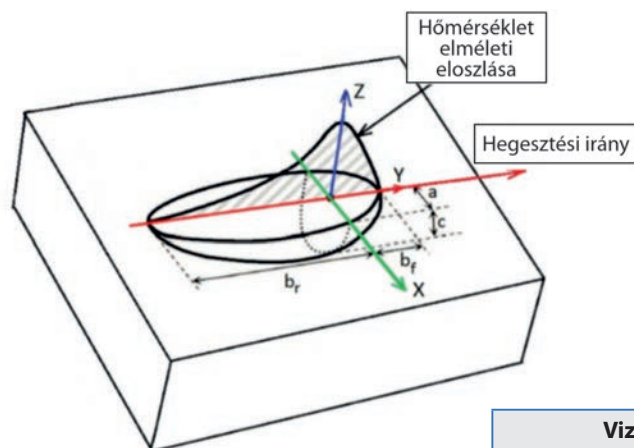
a): A vizsgált tiszta alumínium alakítási szilárdságának lefolyása az alakváltozás és hőmérséklet függvényében.



b): A halszáлка és a bemetszetlen próbatest megtámasztásai.

1. ábra: A szimuláció során alkalmazott anyagmodell és a megtámasztás jellemzői





2. ábra:  
A hegesztési hőbevitel szimulációjára  
szolgáló dupla ellipszoid elméleti ábrája [19]

| Változó | $b_r$ | $b_f$ | a    | c    | max. magasság (Z irányban) |
|---------|-------|-------|------|------|----------------------------|
| Méret   | 5 mm  | 3 mm  | 3 mm | 3 mm | 3 mm                       |

2. táblázat: A végelelemes szimuláció során alkalmazott dupla ellipszoid geometriai méretei

| Vizsgált érték:                  | Halszáлка próbatest | Bemetszetlen próbatest |
|----------------------------------|---------------------|------------------------|
| Max. ekvivalens alakváltozás (-) | 0,037               | 0,03                   |
| Max. von Mises feszültség (MPa)  | 19,24               | 15,79                  |
| Max. hőmérséklet (K)             | 1089                | 996                    |

3. táblázat: A szimulációval meghatározott értékek a halszáлка és a bemetszetlen próbatesten

A maximális ekvivalens alakváltozás 23%-al nagyobb a bemetszett próbatest esetében. A maximális von Mises feszültség 22%-al nagyobb a bemetszett próbatesten. A maximális hőmérséklet 9%-al nagyobb a bemetszett próbatesten.

A vizsgált pont a halszáлка próbatesten, a kedvezőtlenebb hőelvezetési viszony miatt, nagyobb hőmérsékletre melegszik fel. Továbbá a bemetszések megakadályozzák a hő szabad terjedését a hegesztés irányában előre, ennek köszönhető az alakváltozás későbbi kialakulása. A nagyobb maximális hőmérsékletből adódóan nagyobb alakváltozások és ennek

megfelelően nagyobb feszültségek is ébrednek, így a szabványosan kialakított halszáлка próbatest érzékenyebb a kristályosodási repedésre, mint egy bemetszetlen próbatest.

## 4. Halszáлка próba a gyakorlatban

### 4.1. A halszáлка próba elvégzése

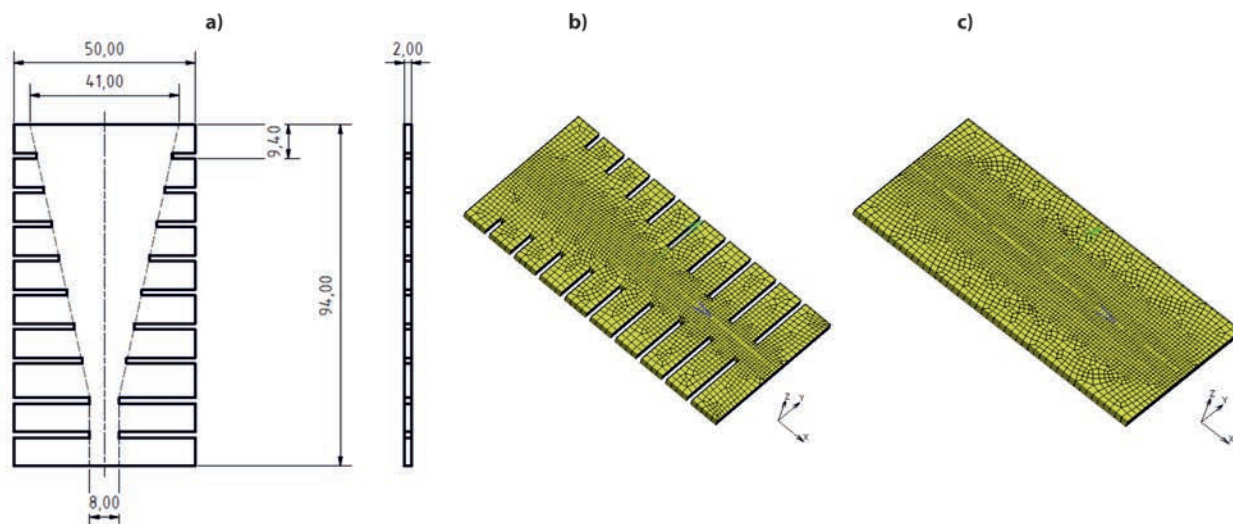
A [15] szakirodalom szerint a vizsgálatot legalább 8 próbadarabon kell elvégezni minden hozaganyag esetében.

A repedéshosszt a darab mindkét

oldalán mérni kell. A próbadarabhoz tartozó repedéshosszt ( $l$ ) az alsó ( $l_a$ ) és a felső ( $l_f$ ) oldalhoz tartozó lement hosszak számtani közepeként kapjuk meg.

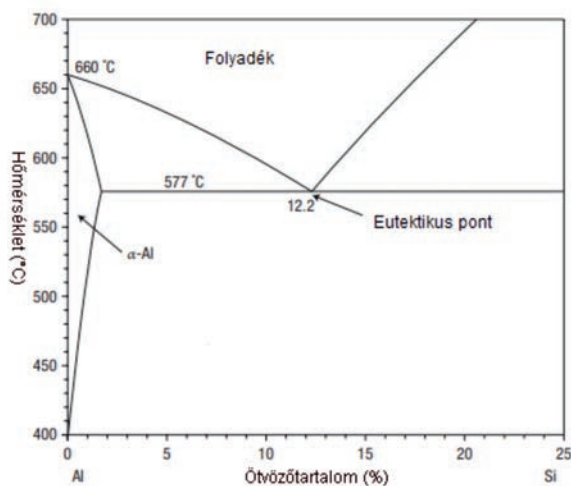
$$l = \frac{l_a + l_f}{2} \quad (1)$$

A kiértékeléshez a 8 próbadarabból a legrövidebb és a leghosszabb repedéshosszal rendelkező darabokat ki kell venni és a maradék 6 varrat esetében a relatív repedésérzékenységi



3. ábra: A szimulációhoz szükséges próbadarabok modellezése.

a): 2 mm vastag halszáлка próba geometriai méretei. b): Halszáлка próbatest 3D modellje. c): Bemetszetlen próbatest 3D modellje.



4. ábra: Al-Si fázisdiagram, 25 % Si-tartalomig [26]

| Ötvöző (%) | 4043 | 4047 |
|------------|------|------|
| Si         | 5,00 | 11,4 |
| Fe         | 0,60 | 0,17 |
| Mn         | 0,05 | -    |
| Cu         | 0,10 | 0,05 |
| Ti         | 0,15 | 0,02 |
| Zn         | 0,10 | -    |
| Mg         | 0,05 | 0,01 |

4. táblázat: A 4043-as és 4047-es hozaganyagok összetétele (gyártói adatlap alapján)\*

\* A gyártói adatlapok nem tartalmaztak mechanikai tulajdonságokat.

mérőszám ( $A_r$ ) az alábbi képlet szerint határozható meg:

$$A_r = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{L_i} \cdot 100 \quad (2)$$

$l$ : a mért repedéshossz [mm]

$L$ : a hegesztett varrat hossza [mm]

$i$ : futó index

A relatív repedésérzékenységi szám jellemző a hozaganyagra. Minnél kisebb a mérőszám, annál biztonságosabban hegeszthető az alapanyag az adott hozaganyaggal melegrepedés kialakulásának veszélye nélkül.

## 4.2. A vizsgált alapanyag és hozaganyagok

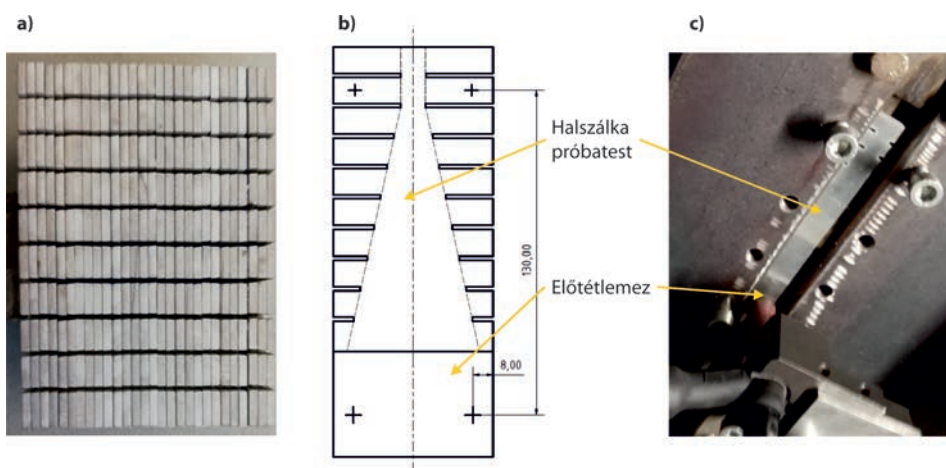
A Houldcroft vizsgálatot 6082 T6 (AlSi1MgMn, Si = 0,7-1,4 %, Mn = 0,4-1 % és Mg = 0,6-1,2 % [20]), az iparban gyakran alkalmazott alumínium-ötvözetten végeztük el. Kísérleteink célja két különböző hozaganyag összehasonlítása volt.

Az alapanyag egy kiválóan keményíthető ötvözet, ennek megfelelően szerkezeti anyagként célszerűen a kiválóan keményített állapotában alkalmazandó. A legkedvezőbb mechanikai tulajdonságait a T6-os hőkezeltségi állapotában érni el, ekkor  $R_{p0,2} = 250 \text{ MPa}$ ,  $R_m = 300 \text{ MPa}$  [21]. A T6-os hőkezeltségi állapot eléréséhez a hőkezelés folyamata során 535 °C-ra kell az ötvözetet felmelegíteni, majd hirtelen, vízben lehűteni (a hűtőközeg hőmérséklete nem haladhatja meg a 40 °C-t). Ezután mesterséges öregítés következik, mely 160-170 °C között, 8-16 órán át végzendő [22].

Mindkét vizsgált hozaganyag, a 4043-as és a 4047-es, a 4000-es csoportjába tartozik és egyaránt ajánlott a 6082 T6 alapanyag hegesztésére. A Si ötvöző növeli az ömledék folyóképességét, ami előnyös a kristályosodási repedés elkerülésének szempontjából. A megnövelt folyóképesség miatt a hőtágulásból adódó zsugorodás során az ömledék könnyebben feltölti a kristályosodási repedés kialakulása során létrejövő

anyaghiányos területeket. Ezen kívül megfelelő (~ 4-12%) Si tartalom mellett a kristályosodási hőköz szűkítése is lehetséges, így kevesebb idő adódik a diffúzióra és a varratfém kevesebb időt tölt ömledék állapotban [10,23]. A 4043-as hozaganyag 4,5-5,5% szilíciumot tartalmaz. Bár ez az ötvözet nem csak Si-tartalmú, fémtani viselkedése az Al-Si egyensúlyi diagram alapján közelíthető. Ahogy a 4. ábra szemlélteti, ez az Al-Si ötvözet kisebb hőmérsékleten (~ 640 °C) szilárdul meg, mint a tiszta alumínium és a megszilárdulási hőköz is kicsi (~ 60 °C) [24]. Ömlesztőhegesztés esetén természetesen figyelembe kell venni a keveredési arányt is, így kis Si-tartalmú alapanyagot hegesztve valamivel kisebb lesz a varratfém Si-tartalma, mint a hozaganyagé.

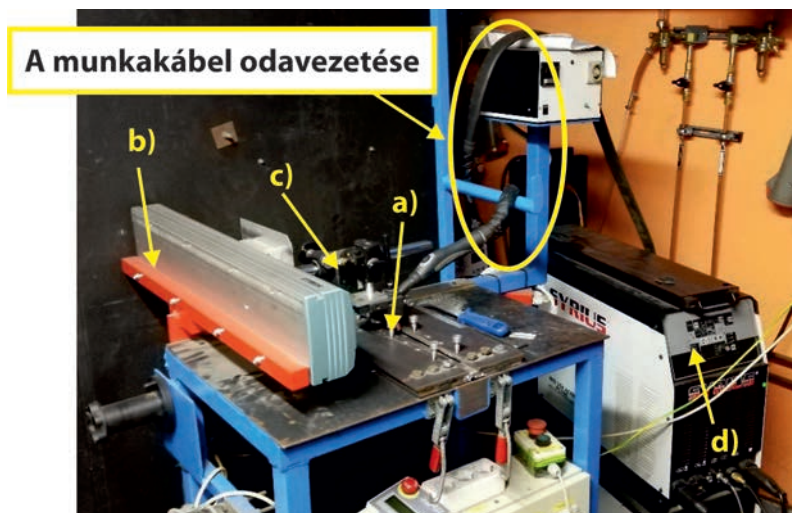
A 4047-es hozaganyag 11-13% szilíciumot tartalmaz, így az egyensúlyi fázisdiagramon az eutektikus pont körül helyezkedik el, ezért még kisebb megszilárdulási hőmérséklet és szűkebb dermedési hőköz érhető el vele, mint a 4043-as hozaganyaggal [25]. További előnye, hogy jelentősen növeli a folyóképességet és csökkenti a hegesztés hatására történő vetemedést. A 4047-es ötvözetet eleinte forrasanyagként használták, de kiváló melegrepedéssel szembeni ellenállásának köszönhető-



5. ábra: A Houldcroft vizsgálat előkészítése,

a): a vízsugaras vágással kialakított halszálla próbatestek, b) a négy pontos megfogás elméleti és c): gyakorlati megvalósítása.





6. ábra: A kísérleti összeállítás:

a) próbadarab rögzítéséhez szolgáló asztal, b) lineáris hegesztőautomata, c) hegesztőpisztoly és annak befogása, d) Sirius WIG 351 típusú hegesztőgép

|                               |                             |                     |
|-------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Áramerősség (A)               |                             | 150                 |
| Feszültség (V)                |                             | 14                  |
| Váltóáram frekvencia (Hz)     |                             | 113                 |
| Elektródapozitivitás (%)      |                             | 20                  |
| Hegesztési sebesség (cm/perc) |                             | 17                  |
| Hőbevitel (kJ/mm)             |                             | 0,44                |
| Védőgáz                       | Típus                       | I1 (100 % Argon)    |
|                               | Térfogatáram (l/perc)       | 12                  |
| Elektróda                     | Típus                       | WC20, 2,4 mm átmérő |
|                               | Ívhossz (mm)                | 1 – 1,2             |
|                               | Szabad elektróda hossz (mm) | 5 – 7               |

5. táblázat: A hegesztés során alkalmazott technológiai tényezők

en egyre elterjedtebb hegesztési hozaganyagként is [25]. A hozaganyagok összetétele a 4. táblázatban látható.

### 4.3. A hegesztés tervezése és előkészítése

A 6082 T6 alapanyagból 3 mm vastag lemezből, vízugaras vágással halszálla próbatestek készültek. A vágási technológiának köszönhetően

a próbatestek geometriája minimális eltérést mutat – lásd 5. a) ábra.

A [15] forrás szerint a hegesztést előtétlemezeken kell megkezdeni, és az előtétlemez és próbadarabot 4 pontban kell rögzíteni. A rögzítés elméleti és gyakorlati megvalósítását az 5. b) és c) ábra szemlélteti.

A hegesztést az állandó hőbevitel megtartásának érdekében egy Yamaha

F1405-500 típusú lineáris hajtású hegesztőautomatával végeztük, amely egyenes vonalú, egyenletes sebességű mozgással tudja vezetni a hőforrást. A hozaganyagot a lehető legnagyobb egyenletességre törekedve manuálisan, kézzel adagoltuk. A kísérleti összeállítás 6. ábrán látható.

A hegesztések elvégzéséhez egy Sirius WIG 351 típusú hegesztőgépet alkalmaztunk, a hegesztési technológiai tényezőket az 5. táblázat foglalja össze.

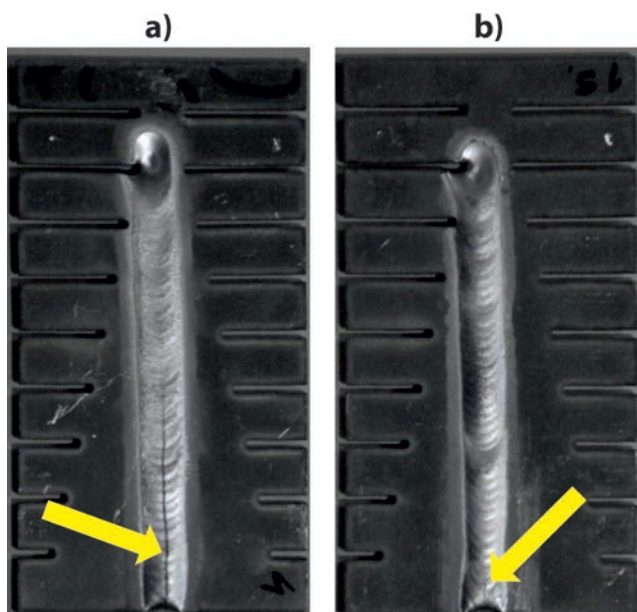
### 4.4. A hegesztések elvégzése

Alumíniumötvözetek esetében ez egyik hegeszthetőségi kihívás az oxidréteg feltörése. Ennek megfelelően a hegesztési folyamat elején átlagosan 4 másodpercig a lineáris automatát nem indítottuk el.

A kísérletekben a próbadarabokon szabad szemmel is jól látható repedések alakultak ki. A két különböző hozaganyaggal készült hegesztési sorozatból a 7. ábra mutat be egy-egy próbadarabot.

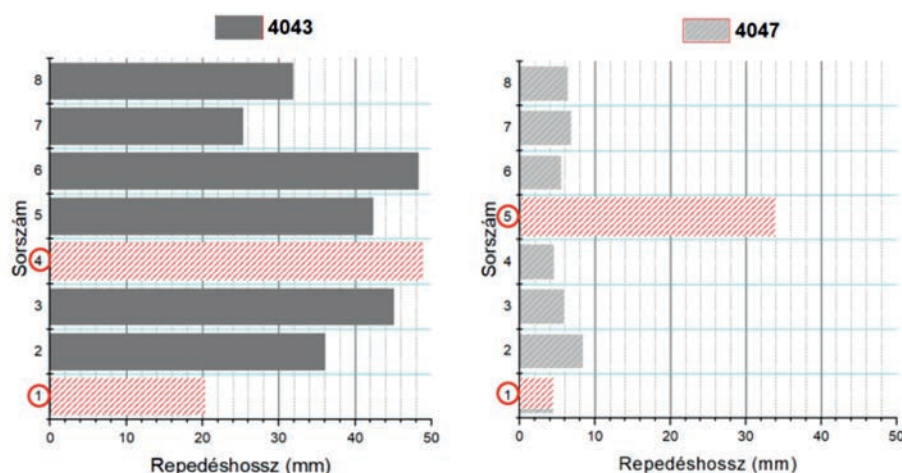
### 4.5 A halszálla próbák kiértékelése

A repedéshosszakat a [15] szerint, szemrevételezéssel, 0,5 mm-es pontossággal megmérve, jelentős

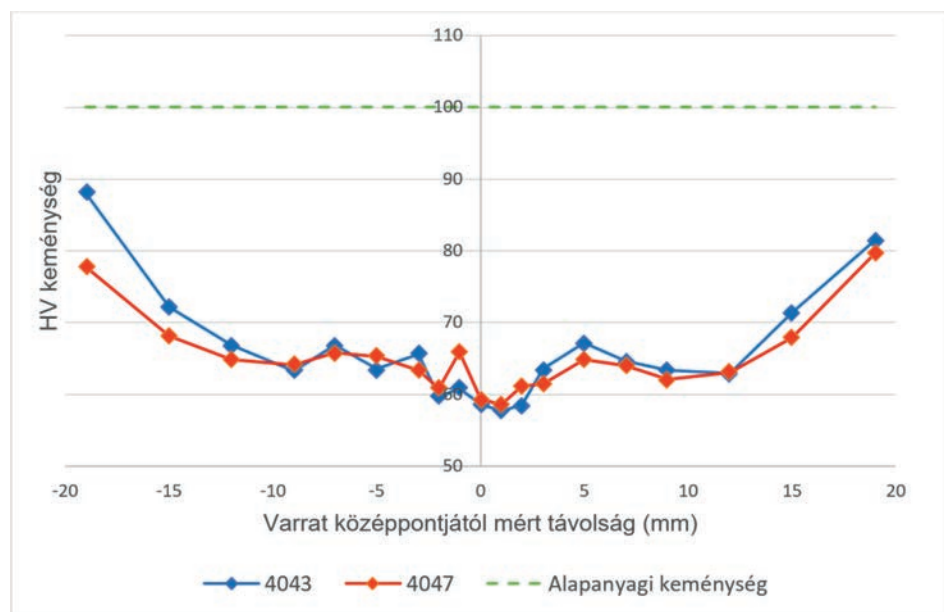


7. ábra: Hegesztett halszálla próbatestek koronaoldali felvételein látható kristályosodási repedések:

a): 4043 hozaganyag, 4. kísérlet,  
b) 4047 hozaganyag, 7. kísérlet



8. ábra: A 6082 T6 alumíniumötvözetből készült halszálla próbatesteken mért repedéshosszak 4043-as és 4047-es hozaganyagok esetén



9. ábra: Az mért keménységértékek összehasonlítása 4043 és 4047 hozaganyaggal készített varratok esetében

különbség adódott a két vizsgált hozaganyaggal készült próbadarabok között. A 4043-as hozaganyaggal készült varratokon átlagosan ötször hosszabb repedések alakultak ki. A 1. képlet alapján számított repedéshosszakot a 8. ábra mutatja be. Az ábrán a kísérletsorozatban a leghosszabb és legrövidebb repedést mutató próbadarabokat piros színnel jelöltük.

A 8. ábrából látható, hogy a 4047-es hozaganyagnak jelentősen kisebb

a kristályosodási repedéssel szembeni érzékenysége, mint a 4043-nak, mivel sokkal rövidebb repedéshosszak voltak az előbbi esetében mérhetők. Ez a különbség a 4047-es hozaganyag nagyobb Si tartalmának köszönhető. Ennek megfelelően a 2. képlet alapján számított relatív repedésérzékenységi mérőszám ( $A_r$ ) a 4047-es hozaganyagnak 37%, míg a 4043-es hozaganyagnak 234%-ra adódott.

## 5. A 6082 T6 ötvözet lágyulása a hegesztés során

Kiválasztottan keményíthető alumíniumötvözetek, így a 6082 T6 alumíniumötvözet is, hegesztése során a varratfém, a hőhatásövezet és az alapanyag lágyulhat [27].

A 4043-as és 4047-es hozaganyaggal a hegesztőautomata segítségével tompavarratokat is vizsgáltuk. Az alapanyagból kimunkált 50x150x3 mm-es próbatest keménységét, az alapanyagi keménységet, 1 mm átmérőjű, 100 kp terhelésű keménységmérővel 55-60 HRB értékűnek mértük. Ezek az értékek 100-110 HV keménységnek felelnek meg.

A tompavarratokat 130 A hegesztőárammal, 13 V feszültséggel és 0,71 kJ/mm hőbevitellel készítettük a korábban bemutatott hegesztő automatával. A nagyobb hőbevitelre azért volt szükség, hogy a tompavarratoknál a megfelelő beolvadás elérhető legyen.

A keménységméréshez Buehler IndentaMet 1105 mikrokeménység mérő berendezést alkalmaztunk. A tompavarratokból 25 mm széles darabokat vágunk ki, amelyekből metallográfiai csiszoltokat készítettünk. A keménység mérő berendezésen 500 g terhelést használtunk.

A 9. ábrán a 4043 és 4047 hozaganyaggal hegesztett próbadarabok csiszolatán mért keménységértékek láthatóak. Megfigyelhető, hogy jelentős kilágyulás történt, az eredeti 100 HV alapanyagi keménységhez képest a varrat közepén, mindkét hozaganyag esetében. A minimális keménység a 4043-as hozaganyag esetében 57,8 HV, a 4047-es hozaganyagnál 58,6 HV volt.

A varrattengelytől 20 mm távolságban sem érte el a keménység az alapanyagi keménységet. A kilágyulás szempontjából a 4043-as hozaganyaggal készített kötések mutattak némileg kedvezőbb értéket. Ennek egy lehetséges magyarázata,

hogyan a nagyobb kristályosodási hőköz és olvadási hőmérséklet révén a 4043-as hozaganyag több hőt von el az alapanyagtól, így az kevésbé lágyul. Ez a jelenség azonban további vizsgálatokat igényel, akár további hozaganyagok bevonásával.

## 6. Összefoglalás

Elvégeztük a halszálla próbatest szimulációs vizsgálatát azzal a céllal, hogy kimutassuk, az MSZ 4312-2:1978 szabvány szerint kialakított halszálla próbatest nagyobb kristályosodási repedésérzékenységet mutat, mint egy azonos geometriájú bemetszetlen lemez. A számítások kimutatták, hogy a halszálla próbatest varratában ébredő von Mises feszültségek 22%-al nagyobbak, mint az azonos geometriájú bemetszetlen lemezben ébredők, Al 99,5 alapanyag modell esetében.

A Houldcroft vizsgálatot gyakorlatban is elvégezve bemutattuk a 4047 és 4043 jelű hozaganyagok repedésérzékenységre gyakorolt hatását 6082 T6 alumíniumötvözet alapanyagon. A kísérletek alapján kijelenthető, hogy 4047-es hozaganyag használata kedvezőbb a kristályosodási repedés elkerülésének szempontjából, mint a 4043-as. A relatív repedésérzékenységi mérőszám a 4043 hozaganyag esetében 234%, míg a 4047 esetében 37% volt.

A 6082 T6 ötvözet egy kiválóan keményíthető alumíniumötvözet, így hajlamos a lágyulásra. A kilágyulás mértékét mikrokeménység méréssel vizsgáltuk 4043 és 4047 hozaganyaggal hegesztett tompavarratokon. Mindkét hozaganyaggal végzett hegesztés esetben jelentős lágyulást mérünk a varratengelyben. A keménység az 100-110 HV alapanyag keménységéhez képest 55-60 HV keménységre csökkent. A varratengelytől távolodva (20 mm) a 4043-as hozaganyaggal készített minták mutattak nagyobb keménységet a 4047-es hozaganyaggal készített mintákhoz képest.

A vizsgálati eredményeket egybevetve 6082 T6 alapanyag hegesztéséhez a 4047-es hozaganyag ajánlható. Ezzel a hozaganyaggal a kristályosodási repedéssel szembeni érzékenység jelentősen csökkenthető, azonban figyelni kell a varratfém és a hőhatásövezet lágyulására.

## Felhasznált források:

- [1] Német Gréta, Kovács Judit, Raghawendra Sisodia, és Gáspár Marcell: Hőhatásövezeti tulajdonságok fizikai szimulációra alapozott vizsgálata különböző szilárdságú autóiipari alumínium ötvözetek esetén, Hegesztéstechnika 30, vol. 2, no. 10, pp. 41–50, 2019.
- [2] Szalva Péter: Vákuumöntésű nyomásos alumínium alkatrészek fogyóelektródás, védőgázos hegesztése, Bányászati és kohászati lapok, vol. 151, no. 1, pp. 14–18, 2018.
- [3] Gáspár Marcell, Jámbor Péter, Kaijalainen Antti, Tervo Henri és Török Imre: A hőkezeltégi állapot hatása az AlSi1Mg alumínium ötvözet ellenállás ponthegesztésére, Hegesztéstechnika 29, vol. 4, no. 6, pp. 53–58, 2018.
- [4] Kovács Tünde és Szilágyi Mihály: Alumínium vékony lemezek ultrahangos hegesztése, Hegesztéstechnika, vol. 27, no. 3, p. 69, 2016.
- [5] Mejlinger Ákos és Lukács János: Két alumíniumötvözet lineáris dörzshegesztéssel készült kötések viselkedése ismétlődő igénybevétel esetén, GÉP 64, vol. 8, no. 6, pp. 25–30, 2013.
- [6] Dr. Béres Lajos, Dr. Gáti József, Dr. Gremsperger Géza, Dr. Komócsin Mihály és Dr. Kovács Mihály: Hegesztési Zsebkönyv, Debrecen, Magyarország, COKOM Mérnökiroda Kft., 2003.
- [7] Aluminium-Schweissen, Schu-

lungsunterlage. Fronius GmbH.

- [8] Gruber Györgyné: Szabványos könnyűfémek és ötvözeteik jellemzői, alkalmazása, Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, Budapest, pp. 9–14, 2008, Online: [https://www.nive.hu/Downloads/Szakkepzesi\\_dokumentumok/Bemeneti\\_kompetenciak\\_meresi\\_ertekelesi\\_eszkozrendszerenek\\_kialakitasa/5\\_0225\\_006\\_101115.pdf](https://www.nive.hu/Downloads/Szakkepzesi_dokumentumok/Bemeneti_kompetenciak_meresi_ertekelesi_eszkozrendszerenek_kialakitasa/5_0225_006_101115.pdf). (Utoljára megnyitva: 2021.01.02)
- [9] MSZ EN 573-1:2005 Szabvány, Alumínium és alumíniumötvözetek. Az alakított termékek vegyi összetétele és alakja. 1. rész: Számjelölési rendszer. Magyar Szabványügyi Testület, 2005.
- [10] Gene Mathers: The Welding of Aluminium and its Alloys, Abington Hall, Abington Cambridge CB1, 6AH, England, 2002.
- [11] Elisa Fracchia, Federico Simone Gobber, and M. Rosso: About weldability and welding of Al alloys : case study and problem solving, Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering, vol. 85, no. 2, pp. 67–74, 2017.
- [12] MSZ EN ISO 4063:2016 Szabvány, Hegesztés és rokon eljárások. A hegesztési eljárások megnevezése és azonosító számuk, Magyar Szabványügyi Testület, 2016.
- [13] Hirt Péter: Diplomatervezés - Alumínium ötvözetek hegeszthetőségének vizsgálata különböző hozaganyagok esetén, Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2020.
- [14] MSZ EN ISO 14175 Szabvány, Hegesztőanyagok. Gázok és gázkeverékek ömlesztőhegesztéshez és rokon eljárásokhoz, Magyar Szabványügyi Testület, 2008.
- [15] MSZ 4312/2-78 Szabvány, Alumínium és alumíniumötvözetek



- hegeszthetőségi vizsgálata. Alapanyag melegrepedés-érzékenységi vizsgálata 'halszájka'-próbatesttel, Magyar Szabványügyi Testület, 1978.
- [16] John C. Lippold: Welding Metallurgy and Weldability, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2015
- [17] D. Podder, N. R. Mandal, and S. Das: Heat source modeling and analysis of submerged arc welding, Welding Journal, vol. 93, no. 5, pp. 183–192, 2014.
- [18] V. M. Varma Prasad, V. M. Joy Varghese, M. R. Suresh, and D. Siva Kumar: 3D Simulation of Residual Stress Developed During TIG Welding of Stainless Steel Pipes, Procedia Technology, vol. 24, pp. 364–371, 2016
- [19] Carlos Roberto Xavier, Horácio Guimaraes Delgado Junior, and José Adilson De Castro: An experimental and numerical approach for the welding effects on the duplex stainless steel microstructure, Materials Research, vol. 18, no. 3, pp. 489–502, 2015.
- [20] Alloy Data Sheet - EN AW-6082 (AlSi1MgMn), Nedal Aluminium. Online: <https://www.nedal.com/wp-content/uploads/2016/11/Nedal-alloy-Datasheet-EN-AW-6082.pdf>. (Utoljára megnyitva: 2021.01.02)
- [21] Silvia Cecchel, D. Ferrario and Giovanna Cornacchia: Heat treatments of EN AW 6082 aluminum forging alloy: Effect on microstructure and mechanical properties, Metallurgia Italiana, vol. 112, no. 3, pp. 6–13, 2020.
- [22] Christian Vargel: Corrosion of Aluminium, Elsevier Science, 2004, pp. 52-56
- [23] Tony Anderson: Welding Aluminium — Questions and Answers, Miami: American Welding Society.
- [24] Hegpont, ML 4043 (AlSi5) aluminium hegesztőanyag Online: [https://www.hegpont.hu/docs/ML\\_4043\\_AlSi5.pdf](https://www.hegpont.hu/docs/ML_4043_AlSi5.pdf). (Utoljára megnyitva: 2021.01.02)
- [25] Hegpont, ML 4047 (AlSi12) aluminium hegesztőanyag Online: [https://www.hegpont.hu/docs/ML\\_4047\\_AlSi12.pdf](https://www.hegpont.hu/docs/ML_4047_AlSi12.pdf). (Utoljára megnyitva: 2021.01.02)
- [26] Yewu Wang, Volker Schmidt, Stephan Senz, and Ulrich Go: Epitaxial growth of silicon nanowires using an aluminium catalyst, Nature Nanotechnology vol. 1, no. December, pp. 8–11, 2006
- [27] A. Sili and S. Missori: Mechanical behaviour of 6082-T6 aluminium alloy welds, Metallurgical Science and Technology, vol. 18, no. 1, 2013.

## PYLON<sup>94</sup>



### IPARI RADIOLÓGUS VÉGZETTSÉGGEL VÁLLALKOZÓT KERESÜNK.

Pylon 94 Gép és Acélszerkezetgyártó Kft.

H-800 Zalaegerszeg, Baross Gábor u. 2. | Telefon: +36 (92) 550 845 | Mobil: +36 (30) 330 2498

## Volfrámelektrodák oxidtartalmának hatása az elektrodák élettartamára

### 2. rész

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és Technológia Tanszék

\*katula@att.bme.hu

#### 6. Metallográfiai vizsgálatok

##### 6.1. Metallográfiai próbatest-előkészítés

A metallográfiai vizsgálatok elvégzéséhez a folyamatos hegesztéssel hegesztett munkadarabokból csiszolati mintákat készítettünk. Mindegyik hegesztési varratnál, a varrat végétől 20 mm-re egy 15 mm széles sáv került kivágásra – lásd **6. ábra**. Ezekből metallográfiai mintákat készítettünk; a WP00 elektrodával hegesztett lemezből 4 db mintát, a WLa15 és a WCe20 elektrodákkal hegesztett lemezekből pedig 8-8 db mintát.

Mivel a hegesztés során a hegesztési változókat állandó értéken tartottuk, így a csiszolatok alkalmasak voltak a beolvadási mélység és a varratlak összehasonlító vizsgálatára.

##### 6.2. Varratgeometria meghatározása

A beolvadási mélység és varratszélesség változását a varrathossz mentén a **7. ábrán** mutatjuk be.

A mért értékekre a legkisebb négyzetek módszerével egyenest illesztve megállapítható, hogy a WCe20 és WLa15 elektrodákkal készült varratok beolvadási mélysége növekvő és egymással azonos értéket mutat a hegesztési varrat hossza mentén – lásd **7. ábra**. A WP00 elektrodával hegesztett varratok esetén a beolvadási mélység szintén enyhén növekvő tendenciát mutat.

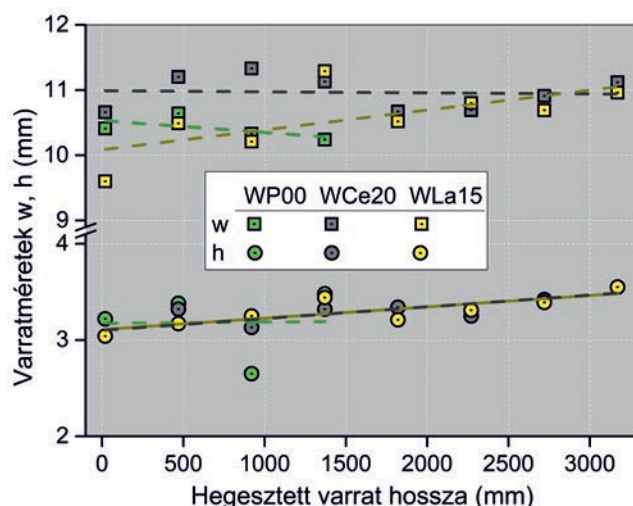
A varratszélesség a WCe20 elektrodával hegesztett munkadarabokon – ahogyan azt az illesztett egyenes meredeksége a **7. ábrán** mutatja – állandónak tekinthető. A WLa15 elektrodával hegesztett munkada-

rabok esetén a varratszélesség – hasonlóan a beolvadási mélységhez – növekvő jellegűt mutat. A varratszélesség WLa15 elektrodával hegesztve kezdetben ~ 9 %-kal kisebb, mint a WCe20 elektrodával hegesztett munkadarab esetén. Ez a különbség a varratszélességben az utolsó mérési pontban, 3170 mm hosszú varrat hegesztése után, megszűnik.

A WP00 elektrodával végzett hegesztés során a beolvadási szélesség kismértékű csökkenést mutat. Ugyanakkor meg kell jegyeznünk, hogy az illesztés jósága a WP00 elektrodán mért értékek esetében kisebb a WCe20 és WLa15 elektrodákon mért értékekkel összehasonlítva, mert a kiértékeléshez rendelkezésre álló illesztési pontok száma – a rövidebb hegesztési hossz miatt – csupán a fele.



6. ábra: Csizsolati minták készítéséhez levágott darab. (A lemezen látható furatok a cikkben nem részletezett optikai mérésekhez szolgáltak pozicionálására.)



7. ábra: A beolvadási mélység (h) és a varratszélesség (w) változása a meghegesztett varrat hosszának függvényében (A szaggatott vonalak egyenes illesztések.)



## 7. Az elektródák elhasználódása

### 7.1. A folyamatos hegesztésnél mért elektródakopások

Az elektródák tömeg- és hosszváltozását 1800 mm és 3600 mm varrat hegesztése után ellenőriztük. A mérési eredményeket az **3. táblázat** foglalja össze.

A tömegméréseket Denver Instrument APX-200 típusú, 0,1 mg mérési pontosságú digitális mérleggel, míg a hosszmeréseket 0,01 mm mérési pontosságú Mitutoyo digitális hosszmérő géppel végeztük.

A tömegmérések 1800 mm varrat-hossz elkészítése után a WCe20 elektródánál 0,4 mg-mal nagyobb tömegvesztéset mutatnak, mint a WLa15 elektródánál. Ez a különbség 3600 mm hosszú varrat elkészítése után csak kissé mértékben változott, 0,5 mg-ra nőtt. Ugyanakkor az elektródák hosszmerési eredményei 1800 mm varrathossz elkészítése után azt mutatták, hogy a

WLa15 elektróda csúcsának hosszváltozása a WCe20 elektródához képest háromszoros nagyságú, a különbség közöttük 0,06 mm. A hegesztést folytatva a WLa15 elektróda hossza további 0,01 mm-t csökkent, míg a WCe20 elektróda hossza nem csökkent tovább.

Az elektródatömegek relatív változását a **8. ábra**, a relatív hosszváltozásokét a **9. ábra** mutatja be.

Az elektródák csúcsairól sztereomikroszkóppal készített felvételeket a **10. ábra** mutatja be. A hosszmerési eredményekből és a sztereomikroszkóppal készített felvételekből az állapítható meg, hogy kezdetben az elektródák csúcsa kopik, tompul majd további terhelés során az elhasználódás az elektródák palástján folytatódik.

### 7.2. Az ívponthegeztésnél mért elektródakopások

Az ívgyújtásos terheléses vizsgálat során a hegesztőberendezést ponthegeztő üzemmódba állítottuk és egy

másodperces hegesztési idővel pontszerű ívgyújtásokat végeztünk. Az elektródacsúcsokról készített felvételeket a **11. ábra** mutatja be.

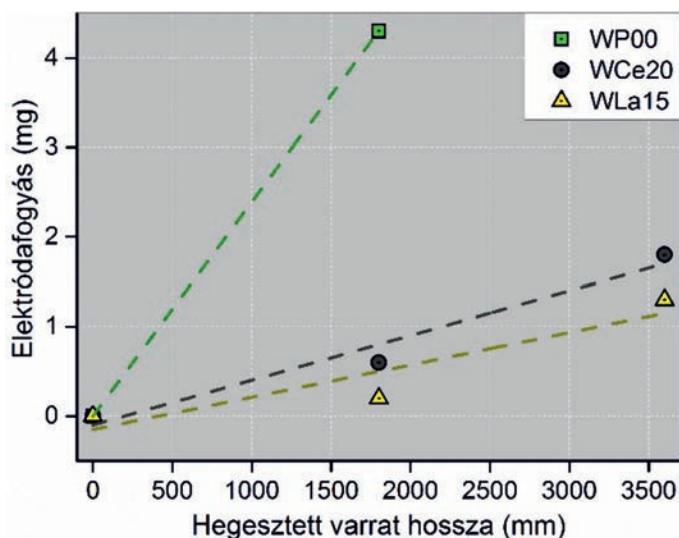
Az elektródák tömeg- és hosszmeréseinek eredményeit a **4. táblázatban** foglaltuk össze.

A **4. táblázat** eredményeiből látható, hogy a WP00 elektróda tömege az ötödik hegesztés után megnőtt a kezdeti tömegéhez képest. Ennek oka, hogy az elektródán az alapanyagból felfröccsenő idegen anyag rakódott le. Ezt a WP00 elektródánál tapasztalt ívinstabilitás okozta, ami a többi elektródánál nem fordult elő. A kiértékelésben a WP00 elektródának ezt az eredményét nem tekintettük relevánsnak. Ugyanakkor a hosszmerés eredményeit – melyet a felfröccsenő anyag mennyisége a mérési pontosság tekintetében elhanyagolható mértékben befolyásolt – felhasználtuk a további kiértékelésben.

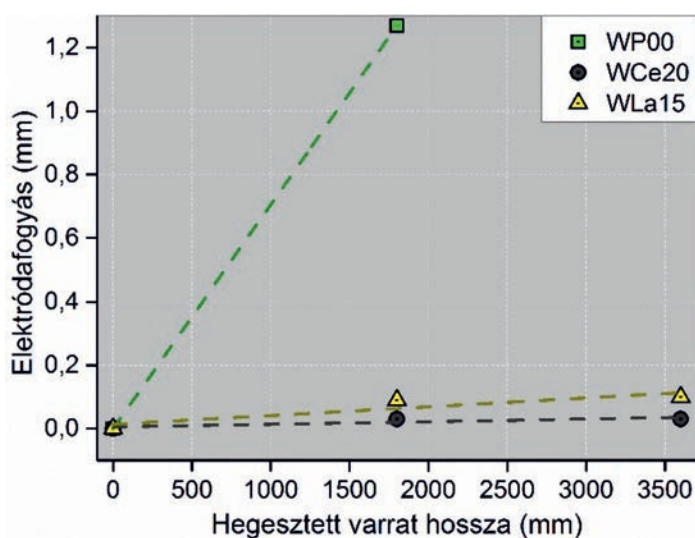
200 ívgyújtás után mind a WLa15, mind a WCe20 elektródán azonos mértékű tömegcsökkenést tapasztaltunk. A hosszváltozás vizsgálata – összhangban a folyamatos hegesztés során megfigyelttel – a WLa15 elektródán mutatott nagyobb elektródahossz csökkenést, ahogy azt a **12. ábra** mutatja.

|              |         | Elektróda tömege (mg) |         |         | Elektróda hossza (mm) |        |        |
|--------------|---------|-----------------------|---------|---------|-----------------------|--------|--------|
|              |         | WP00                  | WCe20   | WLa15   | WP00                  | WCe20  | WLa15  |
| Varrat-hossz | 0 mm    | 14501,1               | 13796,3 | 14445,0 | 174,95                | 174,94 | 174,96 |
|              | 1800 mm | 14496,8               | 13795,7 | 14444,8 | 173,68                | 174,91 | 174,87 |
|              | 3600 mm | -                     | 13794,5 | 14443,7 | -                     | 174,91 | 174,86 |

3. táblázat: Mért elektródatömegek és hosszok a hegesztési kísérlet során



8. ábra: Az elektródatömegek kiindulási állapothoz viszonyított csökkenése az elkészített varrathossz függvényében (A szaggatott vonalak egyenes illesztések.)



9. ábra: Az elektródahosszak kiindulási állapothoz viszonyított csökkenése az elkészített varrathossz függvényében (A szaggatott vonalak egyenes illesztések.)



|                        |     | Elektroda tömege (mg) |         |         | Elektroda hossza (mm) |        |        |
|------------------------|-----|-----------------------|---------|---------|-----------------------|--------|--------|
|                        |     | WP00                  | WCe20   | WLa15   | WP00                  | WCe20  | WLa15  |
| Ívgyújtások száma (db) | 0   | 14431,2               | 13811,4 | 14353,2 | 174,18                | 173,92 | 175,53 |
|                        | 5   | 14432,7               | -       | -       | 173,22                | -      | -      |
|                        | 200 | -                     | 13811,0 | 14352,8 | -                     | 173,89 | 175,47 |
| Változás mértéke       |     | +1,5                  | -0,4    | -0,4    | -0,96                 | -0,03  | -0,06  |

4. táblázat: A mért elektródátömegek és hosszok az ívgyújtások számának függvényében

### 7.3. Elektrodacsúcs összetételének változása

Energiadisziperzív röntgenspektromikroszkópia (EDS: Energy Dispersive X-ray Spectrometry) segítségével meghatároztuk a hegesztés során kiégő anyagok mennyiségét, azaz az elektródák összetételváltozását. Az elektródacsúcsok anyagösszetételének vizsgálatát csak a folyamatos hegesztési kísérlethez használt elektró-

dákon végeztük el, mivel ezek tömege nagyobb mértékben változott, mint a pontszerű ívgyújtási kísérletben használt elektródáké.

A WCe20 és a WLa15 jelű elektróda csúcsáról készített felvételeket a **13.** és **14. ábra** mutatja be.

Az EDS mérés során az elektródák cérium és lantán tartalmát vizsgáltuk. A mért eredményeket **5. táblázatban** adjuk meg. A táblázati eredmények

|                      | Adalék mennyisége (at%) |      |
|----------------------|-------------------------|------|
|                      | Ce                      | La   |
| hegesztés előtt      | 2,7                     | 1,85 |
| hegesztés után       | 0,9                     | 0,14 |
| kiegített adalék (%) | 65,3                    | 92,4 |

5. táblázat: Az EDS vizsgálat eredményei cérium- illetve lantán-oxidot tartalmazó volfrám elektródákon hegesztés előtt és után

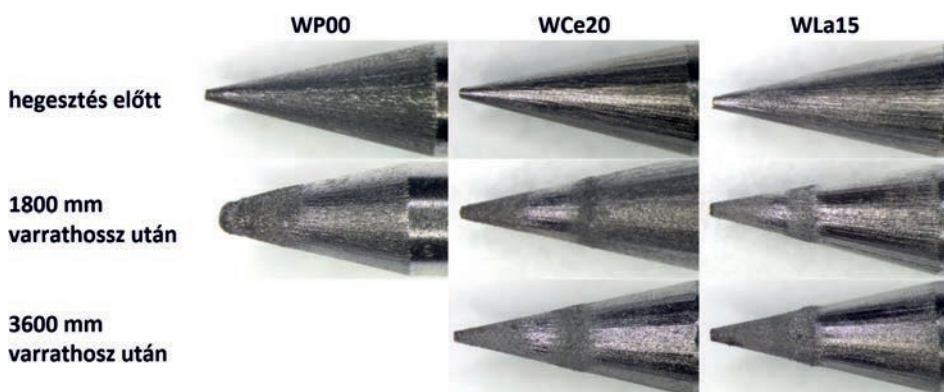
atomszázalékban értendők az elektródák felületén a hegesztés során lerakódott idegen anyagok (Fe, C) miatt.

Az EDS mérés alapján a WCe20 jelölésű elektróda csúcsának cérium tartalma ~65 %-kal csökkent, míg a WLa15 jelölésű elektróda csúcsának lantán tartalma ~92 %-kal lett kisebb. Az adalékkiegészítés tehát a WLa15 elektródánál nagyobb mértékű.

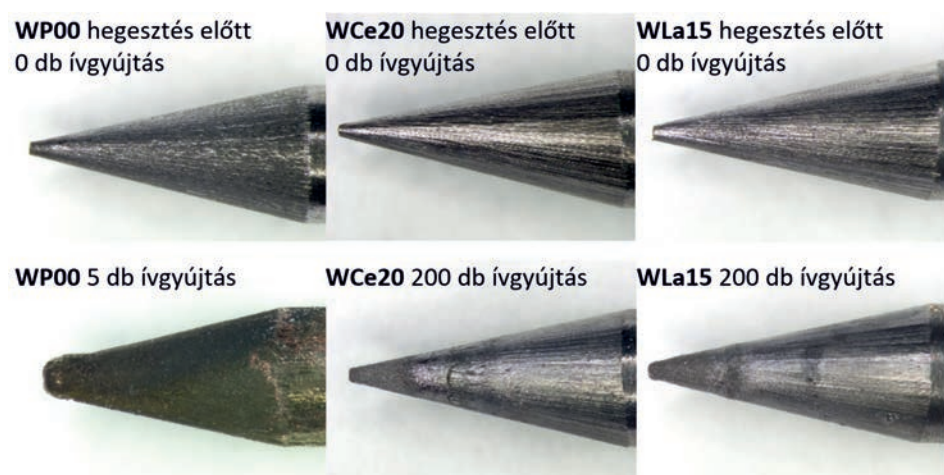
### 8. Következtetések

S235 jelű, ötvözetlen szerkezeti acél vastaglemezen, hozaganyag nélküli TIG-hegesztéssel (142), 200 A áramerősséggel végzett kísérleteinkkel igazoltuk, hogy a WP00, WCe20 és a WLa15 típusú elektródák elhasználódásában jelentős különbségek mutatkoztak.

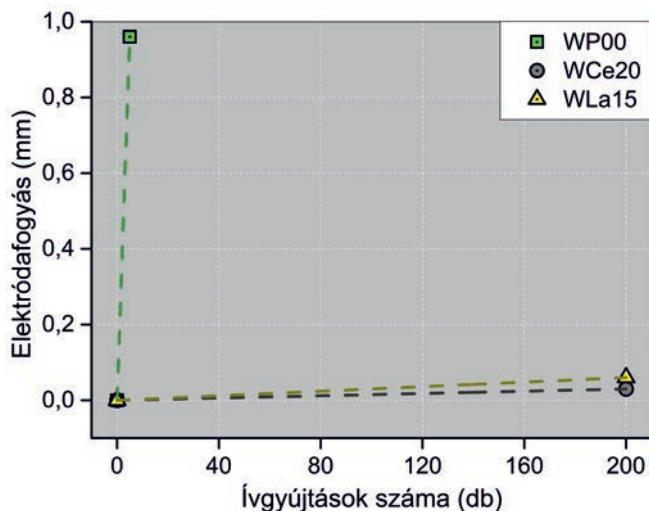
- Folyamatos hernyóvarrat hegesztése
  - A WCe20 és WLa15 elektródákkal készült varratok beolvadási mélysége növekvő és egymással azonos értéket mutat a hegesztési varrat hossza mentén. A beolvadási mélység változása a teljes varrathosszon 0,5 mm-en belüli, így kijelenthető, hogy az elektródák fém-oxid tartalma csekély hatással bír a beolvadási mélységre.
  - A varratszélesség a WCe20 elektródával hegesztett munkadarabokon állandónak tekinthető, míg a WLa15 elektródával hegesztett munkadarabok esetén a varratszélesség növekvő jelleget mutat.
  - A tiszta, avagy oxidtartalom nélküli WP00 elektróda tömegvesz-



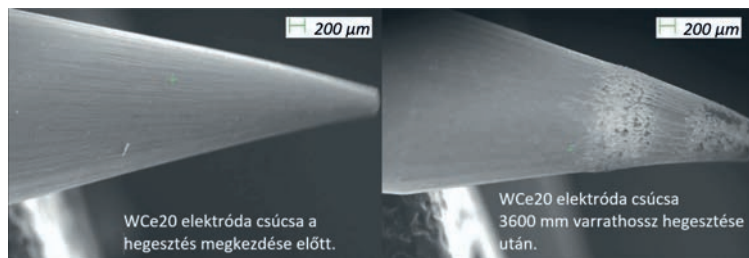
10. ábra: Az elektródacsúcsok a hegesztés megkezdése előtt, majd 1800 mm és 3600 mm varrat-hossz hegesztése után. (Elektrodaátmérő 2,4 mm.)



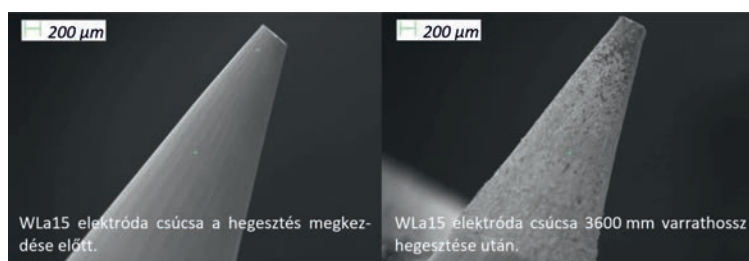
11. ábra: Az elektródacsúcsok a hegesztés megkezdése előtt, majd 5 és 200 ívgyújtás után (Elektrodaátmérő 2,4 mm.)



12. ábra: Az elektródahosszak kiindulási állapothoz viszonyított csökkenése az ívgyújtások számának függvényében (A szaggatott vonalak egyenes illesztések.)



13. ábra: A WCe20 elektródáról készült SEM felvételek a hegesztés előtt és 3600 mm hosszú varrat hegesztése után (Páztázó elektronmikroszkóp, SEM: Scanning Electron Microscope)



14. ábra: A WLa15 elektródáról készült SEM felvételek a hegesztés előtt és 3600 mm hosszú varrat hegesztése után

tesége 1800 mm varrathossznál huszonegyszerese a legkisebb tömegvesztéset elszenvedett WLa15 elektródához képest. A fém-oxid ötvöztetésű elektródák tömegvesztésének eltérése 3800 mm varrathossznál közel azonos (>1,3 mg).

- Az ívterhelés hatására kezdetben az elektródák csúcsa használódik el, megindul az adalékkiegészítés, majd további terhelés során az elhasználódás az elektródák palástján folytatódik. Az elhasználódás és az elektródacsúcs tompulása az oxidtartalom nélküli WP00 elektródán már 1800 mm varrathossznál jelentős. A fém-oxid részecske erősítéses kompozit elektródák elhasználódása lényegesen kisebb. Ezeken az elektródákon az elektródacsúcs tompulása még 3800 mm varrathossznál is minimális.
- Ívponthegeztés
  - A fém-oxid tartalmú elektródák tömegvesztése 200 db ívgyújtás után nem mutatott eltérést. A tömegvesztés mindkét típusnál 0,4 mg volt.

- A fém-oxid adagolású kompozit elektródák hosszváltozásában 200 db ívgyújtás után a WLa15 elektróda kétszeres elhasználódást mutatott a WCe20 típusú elektródához képest.
- Az oxidtartalom nélküli WP00 jelű elektróda hosszváltozása, „tompulása”, már 5 db ívgyújtás után jelentősen, több mint egy nagyságrenddel, meghaladta a fém-oxid adagolású kompozit elektródákét.

Vizsgálataink alapján, ötvöztetlen szerkezeti acél, a WCe20 típusú elektródák használatát javasoljuk.

## Irodalomjegyzék

- [1] MSZ EN ISO 4063:2016, Hegesztés és rokon eljárások. A hegesztési eljárások megnevezése és azonosító számuk, 2016. szeptember
- [2] Baránszky-Jób I. (1985): Hegesztési Kézikönyv. Műszaki könyvkiadó, Budapest
- [3] Vágvolgyi G., Dobránszky J., Gyura L., Reichardt L. (2004): A védőgáz és a volfrámelektrod-csúcskialakítás hatása az ausztenites acélok varrat-

geometriájára. XI. Nemzetközi Hegesztési Konferencia, Budapest: Hegesztés az európai csatlakozás után, 2004.08.23-2004.08.26

- [4] Diamond Ground Products (2013): Tungsten Guidebook
- [5] MSZ EN ISO 6848, Ívhegesztés és -vágás. Nem leolvadó volfrámelektrodák. Osztályba sorolás, 2016. január
- [6] Szunyogh L. (2007): Hegesztés és rokon technológiák Kézikönyv. Gépipari tudományos Egyesület, Budapest
- [7] J. Cornu (1988): Advanced Welding Systems: TIG and Related Processes. IFS
- [8] Kientzl I. (2002): A volfrámelektroda kopási folyamatának vizsgálata az AVI-hegesztésnél. Tudományos diákköri dolgozat
- [9] Dobránszky J., Bella Sz., Kientzl I. (2005): Wear of the tungsten electrode at the TIG arc-spot welding of dissimilar metals. MATERIALS SCIENCE FORUM, 473-74. pp. 73-78. ISSN 0255-5476