



# Acél és alumínium vékony lemezek hegesztőforrasztott kötéseinek vizsgálata

# Examination of the Weld Brazed Joints of Steel and Aluminium Thin Plates

Nagy Dániel,<sup>1</sup> Katula Levente Tamás<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék. Budapest, Magyarország, dnagy.shiftd@gmail.com
- <sup>2</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék. Budapest, Magyarország, katula.levente@gpk.bme.hu

## Abstract

In our research, overlapped thin sheets of hot-dip galvanized steel and aluminum alloy were bonded by braze welding, for which we used the CMT (Cold Metal Trasnfer) sub-versions of the welding manufacturer Fronius. The settings of the welding parameters were based on the smallest possible heat input and the thickness of the zinc layer. Cohesive bonds on the aluminum side and adhesive bonds on the coated steel side were subjected to metallographic test and the composition and distribution of the resulting intermetallic compounds were determined with the help of literature sources. Based on visual inspection, aesthetic and well reproduciable joints were formed, but large amounts and sizes of porosites were formed on the cross-sectional grinds due to the burning of the zinc layer. We also deduced the strength characteristics of the joints from the shear-tensile tests and the fracture surfaces. The fracture of the test specimens occurred at the junction of the weld metal and the alumnium base material.

Keywords: braze welding, CMT, mixed joint, intermetallic compound.

# Összefoglalás

Kutatásunkban tűzi horganyzott acél és alumíniumötvözet vékony lemezeket átlapolva kötöttünk össze hegesztőforrasztással, amihez a Fronius hegesztőgépgyártó CMT (Cold Metal Transfer) eljárásváltozatait használtuk. A hegesztési paraméterek beállításait a minél kisebb hőbevitel és a horganyréteg vastagsága mentén választottuk meg. A kötéseket metallográfiai vizsgálatoknak vetettük alá, és szakirodalmi források segítségével meghatároztuk a létrejött intermetallikus vegyületek összetételét és eloszlását. Szemrevételezés alapján esztétikus, jól reprodukálható varratok képződtek, de a keresztmetszeti csiszolatokon nagy mennyiségű és méretű porozitások tárultak fel a horganyréteg leégése miatt. Nyíró-szakító vizsgálatokból és a töretfelületekből a kötés szilárdsági jellemzőire is következtettünk. A próbatestek törése a varratfém és az alumínium alapanyag találkozásánál következett be.

Kulcsszavak: hegesztőforrasztás, CMT, vegyes kötés, intermetallikus vegyület.

# 1. Bevezetés

Az alumínium és acél közötti vegyes kötések megjelenését a járműipar szorgalmazta az ezredforduló után. A tömegcsökkentés és a szerkezeti elemek igénybevételekkel szembeni egyre nagyobb ellenállása olyan megoldásokat követel, amelyekben szükségessé válik különböző ötvözetek kötése. Az iparban leggyakrabban a ragasztást vagy hegesztést részesítik előnyben. Hegesztéskor az acél felülete nem olvad meg, és a hozaganyaggal adhéziós vagy kohéziós kötés létesül, míg az alumínium kis olvadáspontja miatt a hozaganyaggal varratfémet alkot.

Az acél szilárd állapotban is képes kismértékben alumíniumot oldani, ami intermetallikus vegyületek kiválását eredményezi **[1]**. A 6 stabil (FeAl<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, FeAl<sub>3</sub>, FeAl, Fe<sub>3</sub>Al) és a 3 metastabil (Fe<sub>2</sub>Al<sub>9</sub>, Fe<sub>2</sub>Al<sub>7</sub>, FeAl<sub>6</sub>) vegyület többsége rideg, és a korrózióval szembeni ellenállást rontja. A vasnak nagyobb a diffúziós tényezője az alumíniumban **[2]**, ezért nagyobb valószínűséggel alakulnak ki alumínium-túlsúlyos vegyületfázisok, amelyek ridegek. Hegesztéstechnikai szempontból a hozaganyag kémiai összetétele és az impulzusos eljárásváltozatok alkalmazása is befolyásolhatja a rideg fázisok megjelenését **[1, 2]**.

Mivel nem lehet megakadályozni a rideg vegyületfázisok létrejöttét, legtöbbször cinkbevonatos, tűzihorganyzott acéllemezt használnak, ami javítja a varrat korróziós tulajdonságait [1], és kötést képezve az alumíniummal, hátráltatja a vas-alumínium vegyületek kialakulását [1], továbbá hőelvonó hatást fejt ki, ami kedvezőbb, kis hőbevitelű varratot eredményez [3]. Ezzel szemben a kis forráspontja miatt párolgás esetén porozitást és vas-cink rideg vegyületeket képezhet a varratban [1, 3]. Jelen kutatásunkban a varratokban megjelenő intermetallikus vegyületek meghatározását, elhelyezkedését és alakját vizsgáltuk. Vékony lemezek összekötése általában átlapolással történik, ezért releváns a nyíró-szakító vizsgálatnak való alávetés és a töretfelületek vizsgálata. A kutatás részeként összefüggést kerestünk a szilárdsági jellemzők és az áramforrás beállításai között.

#### 2. Anyagok és kísérleti módszerek

#### 2.1. Felhasznált anyagok

Az iparban gyakran alkalmazott AlSi1MgMn és tűzihorganyzott S355J2 lemezek 0,8 mm, 1 mm és 2 mm vastag próbadarabjaiból 23 varratot hegesztettünk, 100 mm hosszan, AlSi<sub>5</sub> hozaganyaggal, az 1. ábra szerinti összeállításban. Az acéllemezek három eltérő vastagságú horganybevonattal készültek – 24 µm (0,8 mm), 17 µm (1 mm), 123 µm (2 mm) –, melynek a kötésekre gyakorolt hatását szintén vizsgáltuk.

Alumínium és acél vegyes kötéséhez gyakran alkalmaznak nemvasfém hozaganyagokat, például CuSi<sub>3</sub>, AlSi<sub>5</sub>, AlSi<sub>12</sub> huzalt. A felsorolt hozaganyagok olvadáspontjának legalább az acél olvadáspontja alatt kell lennie, illetve jó nedvesítőképességűnek kell lennie.



1. ábra. Acél és alumínium átlapolt lemezek az égő pozíciójának felvétele közben

#### 2.2. A hegesztőforrasztás eljárásváltozatainak jellemzői

A kutatás megvalósításához a CMT Universal és CMT Cycle Step (CMT CS) eljárásváltozatokat használtuk, amelyeket a vegyes kötések, a vékony, bevont lemezek és a jó hővezető anyagok hegesztésére fejlesztettek ki. Ezeket az eljárásokat kis hőbevitel, stabil villamos ív és ezáltal kontrollált cseppleválás jellemzi. Egy hegesztési ciklusban a huzalelektróda előtolásával villamos ív gyullad, majd rövidre zárás jelensége lép fel, és a huzalt egy beépített rendszer visszahúzza. A huzal ellentétes irányú mozgása a villamos ív által megolvasztott huzalvéget leválasztja, és a megolvadt elektródavég az ömledékbe jutva megszilárdul, majd a folyamat ismétlődik. A rövidzárlat létrejöttekor ad a rendszer utasítást a huzal visszahúzására, tehát a vezérlés időben változó frekvenciával működteti az előretolást és a visszahúzást [4].

A rövidzárlatos anyagátviteli mód hagyományos cseppleválasztásával ellentétben ez az eljárásváltozat detektálja a rövidzárlatot, és megakadályozza a nagy áramfelvételt, ezáltal biztosítva a fröcskölésmentes anyagátvitelt és a nagy térfogatú varratfém kialakulását. A CMT CS az Universal bővítése, amely a hegesztési ciklusok száma és a köztük lévő üres ciklusok váltakozásával képes állandó haladási sebesség mellett "pikkelyezett" varratfelületet létrehozni. A felhasználó által megadott számú, a CMT Universal esetében bemutatott ciklust végez, majd adott idejű szünetet tartva újrakezdi a folyamatot, így a bevitt hőmennyiség a CMT Universalhoz képest még kisebb **[4, 5]**.

## 2.3. Metallográfia és próbatestek

#### 2.3.1. Mikroszkópia

A metallográfiai kiértékelést Olympus PMG-3 fémmikroszkóppal és Zeiss EVO MA 10 pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) végeztük [6]. Emellett a hegesztés vonalában a kémiai összetétel meghatározásához vonal menti és pontbéli energiadiszperzív spektroszkópiát (EDS) is alkalmaztunk [7].

## 2.3.2. Szakítópróbatestek

Az átlapolt kötések szilárdságát szabványos nyíró-szakító próbatestek [8] vizsgálatával határoztuk meg MTS 810 szakítógépen. Az átlapolás és a lemezek kihézagolása nélküli erőbevezetés külpontos húzó-, nyíró- és hajlítófeszültségeket is okozott a lemezekben. A törés helye szerint bekövetkezhet a tönkremenetel a hőhatásövezetben, a varratfémben és az alapanyagban, vagy elválhat a varratfém és az acéllemez találkozásánál a varrat, ahogyan azt a 2. ábra mutatja. A kutatásban a szakítóvizsgálat összehasonlító vizsgálatként



 ábra. Húzó-nyíró próbatestek tönkremeneteli módjai átlapolt kötések esetén

szolgált.

## 3. Eredmények és értékelésük

A 23 darab kötésből 18-at értékeltünk a kutatásban. A haladási sebesség és a hőbevitel változtatásával 30 cm/min és 60 cm/min között találtuk meg azt a sebességtartományt, amelynél a horganyréteg leégése nem okoz túlságosan porózus varratot és fröcskölést. Az ívhosszkorrekció értékének méteres beállítása segítette az ívelhajlás minimalizálását, amit az alumínium jobb vezetőképessége okozott.

## 3.1. Általános varratjellemzők

Behatóbb véleményezéshez metallográfiai csiszolatokat készítettünk. A varratgyökök többségénél hiányos átolvadás jött létre a varrat teljes hossza mentén (**3. ábra**).

Ez a hézagmentesen összeszorított lemezek felé távozni akaró cinkgázokból eredhetett [9]. A nagyszámú és nagy méretű porozitás miatt az alumíniumra vonatkozó szabvány [10] D minőségi szintjén sem felelne meg egyik varrat sem, mert a különálló gázporozitások átmérője számos esetben nagyobb 600 μm-nél, és a porozitás százalékos aránya 2,5%-nál nagyobb felülethányadot tesz ki a varratokban.

## 3.2. Intermetallikus vegyületek

Általánosan elmondható, hogy a varratkeresztmetszetben a cinkréteg teljesen elégett vagy kis részben beépült a varratfémbe [11]. Az acél és a hozaganyag érintkezésénél képződtek intermetallikus vegyületek. A rétegekbe rendeződő vegyületfázisok minden esetben az alapanyag és a varratfém érintkezésének vonalában helyezkednek el. Szélességük 0–1,5 mm között változik.



3. ábra. Gázporozitások és hiányos összeolvadás a varratkeresztmetszetben

A varrat hossza mentén eltérő szélességben, foltszerűen is megjelennek a vegyületfázisok, amit az alapanyagok érintkezési vonalában lévő hőmérséklet-különbségek okozhattak. A varratokban képződött vegyületfázisok beazonosítására szakirodalmi kutatásokat vettünk alapul [2, 12]. Összefüggő réteget képez az  $Fe_2Al_5$  vegyületfázis, amely az acél oldaláról a felületre merőlegesen növekszik (4. ábra). Megjelenik továbbá az  $Fe_2Al_5$ réteg felett tűs formában az  $FeAl_3$  vegyületfázis is.

A CMT Universal eljárásváltozattal készült varratok esetén megfigyelhető egy hőbeviteli határérték – 0,72–0,80 kJ/cm között –, ahol az intermetallikus réteg vastagsága mérhetővé válik. Ennél kisebb hőbevitel esetén legfeljebb gyenge oxidréteg vagy néhány µm-es fázisok jelennek meg. 2 µm-nél nagyobb vastagságú, egybefüggő rétegeket lehet találni a varratfém és az acél érintkezésének középvonalában, ahol a legnagyobb a hőbevitel. A szakirodalmi kutatás alapján [13] 10 µm feletti vastagság esetén vannak jelentős hatással az intermetallikus vegyületek a kötés szilárdságára.

#### 3.3. Vonal menti összetétel-vizsgálat

Az intermetallikus zónákról vonal menti EDSanalíziseket készítettünk. Minden varrat esetében a varrat keresztmetszeti csiszolatán tetszőlegesen kiválasztott vonal mentén lévő vegyületeket vizsgáltuk, ahol egyértelműen kimutatható a cink jelenléte a varratfémben.

Az átlagosan 8% cinket tartalmazó eutektikum a vizsgált vonal mentén 100  $\mu$ m hosszan jelen van a varratban (5. ábra), tehát a cink egy része a hegesztőforrasztás során gőz-halmazállapotúvá válás helyett új eutektikus ötvözetet képez a varratfémben (6. ábra) [14, 15, 16].

#### 3.4. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálatokat 80×15 mm-es próbatesteken végeztük. A varratok 90%-ánál a szakadás az alumínium alapanyag és a varratfém kapcso-



 ábra. Intermetallikus vegyületfázisok az acél és a varratfém találkozásánál



6. ábra. Eutektikum a varratfémben [16]



5. ábra. Vonal menti összetétel az acél és a varratfém vonalában

latánál történt, ami a horganygőzök távozására és az alapanyag nem megfelelő megolvadására vezethető vissza. Összehasonlítva a próbatestek erő-elmozdulás görbéit (7. ábra), a vastag cinkréteggel bevont lemezek varratainak teherbírása és alakváltozási képessége messze kiemelkedik a többi kötésnél mérthez viszonyítva.

A töretfelületeken látható számtalan porozitás (8. ábra) nagy szerepet játszott a repedések gyors terjedésében. Több próbatesten előfordult, hogy a kötés csak bizonyos szélességig repedt el, a teljes keresztmetszet-szétválás időben később következett be. Ezt a felületről kiinduló porozitások repedésterjedések útján való összenövése okozta. Mindenhol rideg töréssel ment végbe a folyamat.

#### 4. Következtetések

Összesítve megállapítható, hogy hegesztőforrasztással az alkalmazott hegesztési paraméterekkel jól reprodukálható, megfelelő varratalakú és esztétikus kötések alakíthatók ki acél és alumínium vékonylemezek között. A csiszolati képeken látszódó nagy mennyiségű és méretű porozitások jól mutatják a tűzihorganyréteg kedvezőtlen hatását, amit egyetlen varratnál sem sikerült érdemben csökkenteni. A képződött intermetallikus vegyületfázisok a szakirodalmak alapján jól beazonosíthatók voltak, meglétüket az összetétel-vizsgálatok is igazolták. Annak ellenére, hogy egyes



7. ábra. Szakítóvizsgálatokkal felvett erő-elmozdulás görbék



 ábra. A töretfelületen látható, nagy méretű porozitások, amelyek a repedés terjedését elősegítették

esetekben vastag vegyületrétegek is kialakultak a varratokban, a kötések törésének helye a szakítóvizsgálatok alkalmával szinte mindig a varratfém és az alumínium alapanyag találkozásánál következett be. A cinkréteg vastagságának a vegyeskötés mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatását a legvastagabb cinkréteggel bevont acéllemez kötésének kiemelkedő szakítószilárdsága mutatja.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- Kobayashi S., Yakou T.: Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment. Materials Science and Engineering: A, 338/1–2. (2002) 44–53. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00053-9
- [2] Basak S., Das H., Pal T. K., Shome M.: Characterization of intermetallics in aluminum to zinc coated interstitial free steel joining by pulsed MIG brazing for automotive application. Materials Characterization, 112. (2016) 229–237. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.12.030
- [3] Dong H., Hu W., Duan Y., Wang X., Dong C.: Dissimilar metal joining of aluminum alloy to galvanized steel with Al–Si, Al–Cu, Al–Si–Cu and Zn–Al filler wires. Journal of Materials Processing Technology, 212/2. (2012) 458–464.

https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.10.009

- [4] Somoskői G.: A CMT eljárás elméleti alapjai és gyakorlati alkalmazási lehetőségei. In: 25. Jubileumi Hegesztési Konferencia, Budapest, 2010.
- [5] Peng M., Liu H., Liang Y., Xu W., Zhao Y., Chen Y., Weng J., Yang J.: *CMT welding-brazing of al/steel dissimilar materials using cycle-step mode*. Journal of Materials Research and Technology, 18. (2022) 1267–1280.

https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.043

- [6] Havancsák K., Dankházi Z.: Pásztázó elektronmikroszkópia. ELTE Anyagfizikai Tanszék, 2018. http://metal.elte.hu/oktatas/alkfizlab/meresleirasok/SEM3.pdf (letöltve: 2022. június 14.)
- [7] Gaston B., Protter C.: Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) Franklin & Marchall College Materials Characterization Fundamentals, CHM 412 Collaborative Text (2019) https://chem.libretexts.org/Courses/Franklin\_ and\_Marshall\_College/Introduction\_to\_Materials\_ Characterization\_CHM\_412\_Collaborative\_Text/ Spectroscopy/Energy-Dispersive\_X-ray\_Spectros-
- copy\_(EDS) (letöltve: 2022. június 17.)
  [8] ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, 2022.
- [9] Hoang S. M., Tashiro S., Bang H.-S., Tanaka M.: Numerical analysis of the effect of heat loss by zinc evaporation on aluminum alloy to hot-dip galvanized steel joints by electrode negative polarity ratio varied AC pulse gas metal arc welding. Journal of Manufacturing Processes, 69. (2021) 671-683. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.019

- [10] MSZ EN ISO10042: Hegeszés. Alumínium és ötvözetei ívhegesztéssel készített kötései. Az eltérések minőségi szintjei, 2018.
- [11] Yang J., Hu A., Li Y., Zhang P., Saha D. C., Yu Z.: Heat input, intermetallic compounds and mechanical properties of Al/steel cold metal transfer joints. Journal of Materials Processing Technology, 9/3. (2019) 40–46.

https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.05.004

- [12] Zhang G., Chen M. J., Huang J., Yang F.: Analysis and modeling of the growth of intermetallic compounds in aluminum-steel joints. Royal Society of Chemistry, 7/60. (2017) 37797–37805. https://doi.org/10.1039/C7RA06354G
- [13] Zhang W., Sun D., Han L., Gao W., Qiu X.: Characterization of Intermetallic Compounds in Dissimilar Material Resistance Spot Welded Joint of High Strength Steel and Aluminum Alloy. ISIJ International, 51/11. (2011) 1870–1877.

https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1870

[14] Kakitani R., Konno C., Garcia A. Cheung N.: The Effects of Solidification Cooling and Growth Rates on Microstructure and Hardness of Supersaturated Al-7%Si-x%Zn Alloys. Journal of Materials Engineering and Performance, 31. (2022) 1956– 1970.

https://doi.org/10.1007/s11665-021-06341-8

- [15] Ishaq M., Basariya R., Mukhopadhyay N. K.: Structural and Mechanical Behaviour of Al-Fe Intermetallics Intermetallic Compounds - Formation and Applications. IntechOpen, Irán, 2018. 226. https://doi.org/10.5772/intechopen.73944
- [16] Septimio R., Silva C. A. P., Costa T. A., Garcia A., Cheung N.: Hypereutectic Zn–Al Alloys: Microstructural Development under Unsteady-State Solidification Conditions, Eutectic Coupled Zone and Hardness. Metals, 12/7. (2022) 1076. https://doi.org/10.3390/met12071076