



A szerszám fejlesztése alumíniumötvözetek kavaró dörzshegesztéséhez

Tool development for friction stir welding of aluminium alloys

Kozák Emese,¹ Kovács Zsolt Ferenc²

¹ Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország, kozak.emese@nje.hu

² Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország,

Abstract

In recent years, the demand for aluminium and aluminium alloys has increased due to their favourable properties. The properties of aluminium alloys are almost the same as structural steel, but their weight is approximately one third. Technological developments have made it possible to weld metals that are difficult to weld with traditional fusion welding, such as aluminium alloys, using Friction Stir Welding (FSW). This article briefly introduces the FSW procedure and its application. During this research, 5053 aluminium alloys were welded with the mentioned technology, for which customized FSW tools were used. These tools were made with 3D printing technology, which ensured the manufacturing of complex geometries. After welding, the pieces were subjected to the following material tests: visual inspection, tensile tests, hardness tests and metallographic analysis.

Keywords: *friction stir welding, FSW tool, aluminium, material testing.*

Összefoglalás

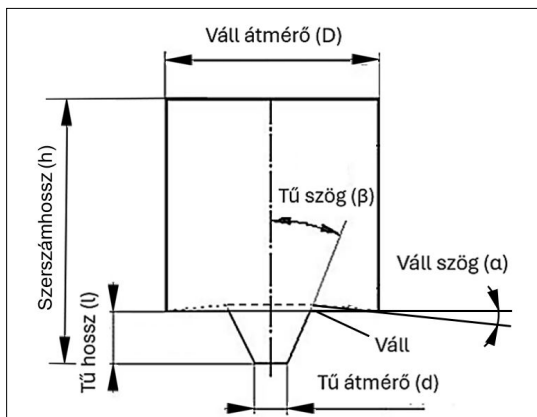
Kedvező tulajdonságai miatt az alumíniumra és annak ötvözeire az elmúlt években jelentősen megnövekedett a kereslet, mivel mechanikai tulajdonságai közel azonosak a hagyományos szerkezeti acélokéival, azonban tömegük megközelítőleg azok egyharmada. A kavaró dörzshegesztési eljárás fejlesztése leginkább a hagyományos ömlesztőhegesztéssel nehezen hegeszthető fémek, így például az alumíniumötvözetek hegesztésére irányul. Ebben a cikkben röviden bemutatjuk a kavaró dörzshegesztést, illetve annak alkalmazását. A kutatás során 5053-as alumíniumötvözetek hegesztése valósult meg az említett eljárással, amihez egyedileg tervezett szerszámokat alkalmaztunk. E szerszámok additív gyártással készültek, ami biztosította a bonyolult geometriák gyártását. A hegesztési kísérletek elvégzése után a következő anyagvizsgálatokra került sor: szemrevételezés, szakítóvizsgálat, keménységmérés, illetve metallográfiai vizsgálat.

Kulcsszavak: *kavaró dörzshegesztés, FSW-szerszám, alumínium, anyagvizsgálat.*

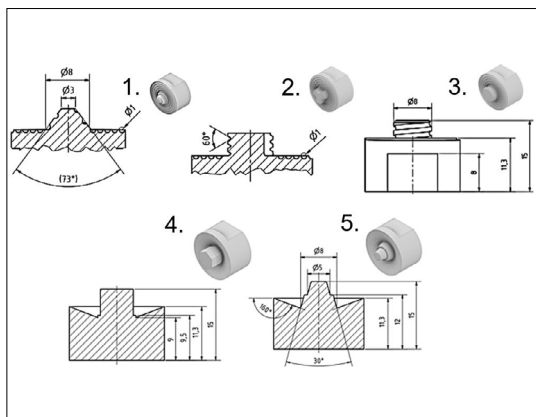
1. Bevezetés

A kavaró dörzshegesztés szilárd fázisú hegesztési eljárás, mely során az alapanyagok megolvadása nélkül hozhatunk létre kötést [1]. Alapelve az, hogy egy forgó szerszámot alkalmaznak, mely behatol a hegeszteni kívánt, rögzített munkadarabokba. A szerszám válla súrlódási hő termel,

aminek következtében a munkadarabok szilárdsága csökken, az anyag tehát kilágyul. Ebben a fázisban a szerszám, állandó forgómozgás közben, végigvonul az illesztési vonal mentén, összekavarja a képlékenyen alakváltozó anyagrészeket, majd a lehűlés során szilárd fázisú kötés alakul ki a munkadarabok között [2, 3, 4]. A szerszám



1. ábra. A kavarószerszám felépítésének egyszerűsített vázlata [5]



2. ábra. A megtervezett kavarószerszámok

fő részeit az 1. ábra mutatja. Mivel az [5] forrásból származó kép elvi hibás vázlaton mutatta be a kavarószerszám egyszerű felépítését, ezért mi azt kijavítva közöljük.

A folyamat során változó paraméternek tekintjük a hegesztendő anyagokat, azok anyagminőségét, anyagvastagságát, illetve befolyásoló tényező többek között, ha 2 vagy több egymástól eltérő anyagot kívánunk hegeszteni. A folyamat technológiai változói közé sorolható a szerszám dőlésszöge, az előtolási sebesség, a fordulatszám, a kavarószerszámot az anyagban tartó, tengelyirányú erő, illetve esetenként a folyamat során alkalmazott hűtés megléte is. A szerszám tervezésénél meghatározó szerepet tölt be a szerszám anyaga, a szerszámváll átmérője, a láb geometriája, átmérője és hosszúsága [6, 7, 8, 9].

A kutatásban korunk legdinamikusabban fejlődő gyártási eljárása, az additív gyártás is fontos szerepet kapott. A kavarószerszámok forgácsolással (anyagleválasztással) készülnek, de abban az esetben, ha az ilyen gyártás szempontjából bonyolult láb- és vállgeometriát kívánunk létrehozni, csak az additív gyártás jöhet szóba, mivel ily módon tér nyílik az összetett, a forgácsolás szempontjából túl bonyolultnak tekinthető elemek kivitelezésére is, ami többek között gazdasági szempontból is előnyt jelent.

2. A kavarószerszám tervezése

A fémtermékek additív gyártása által tér nyílik, a hagyományos megmunkáláshoz képest, gyorsabban és költséghatékonyabban legyártani a bonyolult geometriájú elemeket, így a kavaró dörzshegesztéshez szükséges szerszámot is. Az

additív gyártás a kavaró dörzshegesztésnél még csak úgy jelent meg, hogy ezzel az eljárással készített termékeket hegesztettek össze [10]. Jelen kutatás éppen ezért úttörőnek számít, hiszen e kutatás keretében vizsgáltuk Magyarországon először az additív gyártással készült szerszámok alkalmazását.

Elsősorban figyelembe vettük a hegesztendő munkadarabokat; jelen esetben ez 2 db, 4 mm vastagságú alumíniumlemez. A lemez vastagsága befolyásolja a láb hosszát, mivel az nem lehet egyenlő vagy nagyobb, mint a hegesztendő anyagvastagság. Érdemes valamivel rövidebbre tervezni a láb hosszát, hogy az ne érjen át az anyagon. Ebből eredően a szerszámláb 3,7 mm hosszúságúra lett kialakítva. A szerszámváll átmérője jelentősen befolyásolja a hegesztési varrat kialakulását. Alumíniumötvözetek esetén elmondható, hogy a szerszámváll átmérője a láb átmérőjének 2,5–3,0-szorosa. A szerszámváll átmérője befolyásolja a varrat szélességét, illetve a termelődő súrlódási hő mennyiségét.

Ebben a kutatásban minden szerszámot azonos, $D = 20$ mm vállátmérővel terveztünk meg, de a kutatás folytatásában érdemes lehet azonos paraméterek mellett különböző vállátmérők vizsgálata is. A kavarószerszám teljes hossza minden esetben $h = 15$ mm, ami elegendő a befogásra, és emellett költséghatékony is a gyártás szempontjából.

A láb átmérőjét, geometriáját, illetve a váll homlokfelületét és profilját szerszámonként eltérő módon terveztük meg, figyelembe véve, hogy a hegesztés közbeni anyagáramlást javítani tudjuk (2. ábra).

3. A hegesztési kísérletek ismertetése

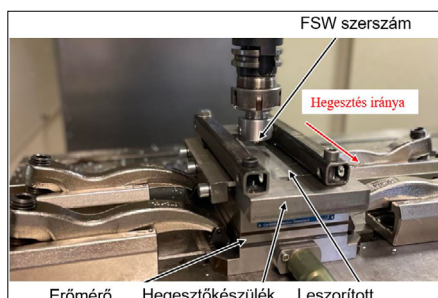
A hegesztendő lemezek anyagminősége 5053-as alumíniumötvözet, befoglaló méretei 50×90×4 mm. A kutatás során kerestük, meghatározott hegesztési beállítások mellett, a tervezett szerszámgeometriák közül a legmegfelelőbbet, a varrat minőségének roncsolásos és roncsolásmentes anyagvizsgálatával.

Összesen 15 hegesztést végeztünk konstans, 1000 min⁻¹ fordulatszámon, 3 különböző előtolási sebességgel. A szerszám dőlésszöge a mérések során 0°. Hűtést nem alkalmaztunk (1. táblázat).

1. táblázat. A hegesztés technológiai paramétereit

Mérések száma	Szerszám jele	Előtolás v_f (mm/min)
1.	1.	80
2.		125
3.		170
4.	2.	80
5.		125
6.		170
7.	3.	80
8.		125
9.		170
10.	4.	80
11.		125
12.		170
13.	5.	80
14.		125
15.		170

A hegesztés során a lemezek ugyanabban a síkban helyezkednek el, és az érintkező éleik mentén jön létre a kötés. A szerszámok spirális kialakítása miatt a főorsó a hegesztés során óramutató járásával ellentétes irányba forog (M4), hogy az anyagáramlás a szerszámkialakításnak megfelelően történjen. A kísérlet elrendezése a 3. ábrán figyelhető meg.



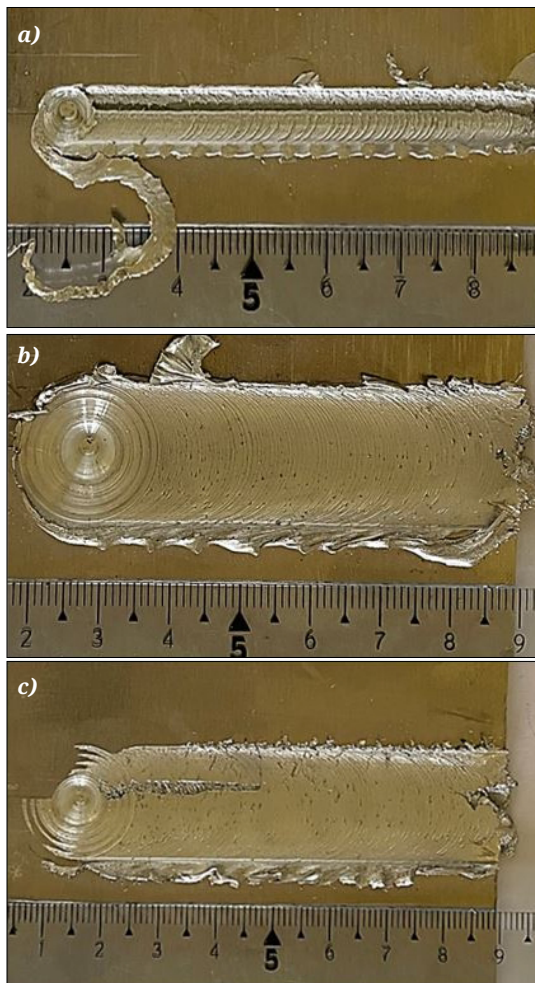
3. ábra. A kísérlet elrendezése

4. Anyagvizsgálatok

Ebben a fejezetben a hegesztett mintadarabok vizsgálatának folyamatát és eredményeit összegeztük. A varratokat szemrevételezéssel, szakítóvizsgálattal, keménységméréssel és metallográfiai úton értékeltük.

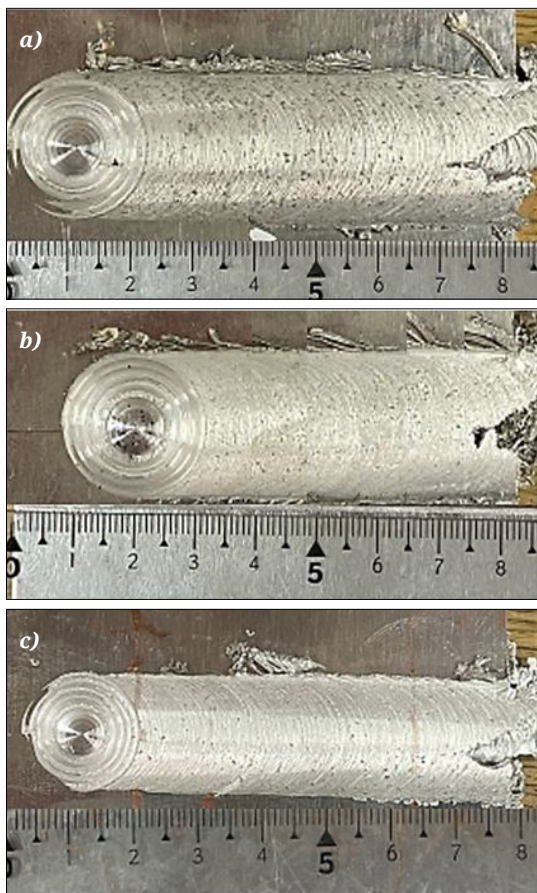
4.1. Szemrevételezés

A szemrevételezés során kiemelendők az 1-es és a 3-as szerszámmal készült hegesztési varratok. Az 1. szerszám 80 mm/min-es előtoláson mindvégig „szántotta” a varratot, nem alakult ki a megfelelő keveredésű varrat. 125 mm/min-es előtolásnál jóval ígérteesebb kötést láthatunk, viszont az előtolás növelésével látható, hogy alagút-porozitási hibák léptek fel a kötésben (4. ábra).



4. ábra. Az 1. szerszámmal készített varratok felületi képei. Előtolás a) 80 mm/min; b) 125 mm/min; c) 150 mm/min

A 3. szerszám esetében mind a 3 kísérletben kialakult a varrat, a felületi érdességük viszont különböző. A 80 mm/min-es előtolás erősebb felületet eredményezett, de az előtolás növelésével az érdesség egyre csökkent. A varrat elején kialakult hibák alagút-porozitási hibákra utalnak a varraton belül (5. ábra).



5. ábra. A 3. szerszámmal készített varratok felületi képei. Előtolás a) 80 mm/min; b) 125 mm/min; c) 150 mm/min

2. táblázat. A szakítóvizsgálat eredményei (részlet)

Próbatest	Max. terhelés (N)	Megnyúlás max. terhelésnél (mm)	Szakítószilárdság (MPa)
1/125a	6869	10,76	215
1/125b	6946	11,63	212
1/125c	6870	10,76	224
3/125a	6111	7,51	186
3/125b	7060	11,99	215
3/125c	7109	13,18	214

4.2. Szakítóvizsgálat

A hegesztett kötések keresztirányú szakítóvizsgálatához 3-3 darab, 10 mm széles próbatestet vágunk ki a hegesztett darabokból. A próbatestek névleges szélessége 8 mm, hossza pedig 98 mm, összesen 36 db próbatest készült el, 33 db a különböző előtolási sebességeken. A szakítóvizsgálat Instron 4482 típusú szakítógépen történt. A legnagyobb terhelést az 1/125 és 3/125 jelű minták viselték el. A szakítóvizsgálat eredményeit a 2. táblázat foglalja össze.

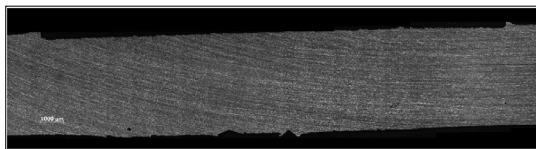
4.3. A varratok metallográfiai vizsgálata

A hideg beágyazással előkészített mintákat 3 fázisban csiszoltuk, először 320, 600 és 1200-as finomságú csiszolópapírral, ezt követően vizsgáltuk meg mikroszkóppal, hogy feltárjuk a lehetséges hibákat.

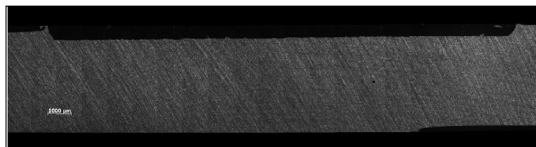
Mindegyik varratban találtunk különböző méretű hibákat. Az összes varratot vizsgálva az 1/125 és a 3/125 jelű varratokban a legkisebb a hibák kialakulásának mértéke (6. és 7. ábrák).

4.4. Keménységmérés

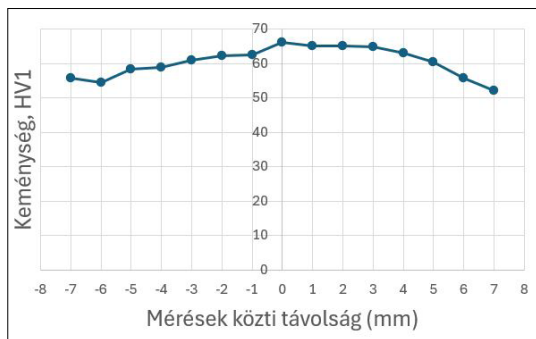
Vickers-keménységmérést végeztünk a beágyazott mintadarabokon Struers Duramin100 típusú gépen. A vizsgálatot az 1/125 és 3/125 jelű mintán végeztük, melyek a korábbi vizsgálatok során a legeredményesebbnek bizonyultak. A terhelés 9,81 N volt. minthogy a hegesztendő darabok azonos anyagúak voltak, ezért várható volt, hogy a keménység is közel azonos lesz a mért pontokon, illetve nagyobb a varratban. A mérést a koronaoldalon végeztük balról (hátra oldaltól) jobbra (előre oldal felé) (8. és 9. ábra) [2].



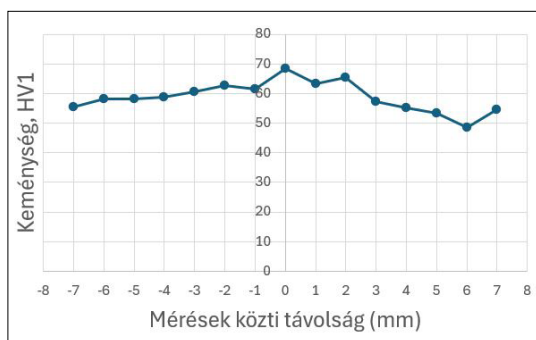
6. ábra. Az 1-es szerszámmal hegesztett mintadarab keresztmetszeti képe 125 mm/min előtolás esetében



7. ábra. A 3-as szerszámmal hegesztett mintadarab keresztmetszeti képe 125 mm/min előtolás esetében



8. ábra. Keménységmérés az 1-es szerszámmal hegesztett mintadarab esetében, előtolás 125 mm/min



9. ábra. Keménységmérés a 3-as szerszámmal hegesztett mintadarab esetében, előtolás 125 mm/min

5. Az eredmények értékelése

A vizsgálatok eredményei közül kiemelkedőnek értékeljük az 1. és a 3. szerszámmal végzett hegesztést, mindkettő 125 mm/min-es előtolással történt. Ezeket a szerszámokat a továbbiakban is érdemes vizsgálni, eltérő hegesztési paraméterek mellett, mint például a szerszámdőlés beállítása (1–3°).

A szerszámokon elhelyezett spirális csatornák javítják az anyagáramlást a kavarás közben.

A konkáv váll kialakítását is érdemes tovább vizsgálni, empirikus úton megtalálni az optimális szerszámválszöget, ami kedvezően hat a hegesztési varrat kialakulására.

A 2. szerszám esetében a szerszám lábának függőleges irányú bemarásait kerülni kell ezek mellett a beállítások mellett, mivel ez a megoldás egyik előtolási értéken sem felelt meg. Ugyanakkor érdemes tovább folytatni a kísérleteket, de a hornyokat úgy kell kialakítani, hogy azok mentén az anyag áramlani tudjon a hegesztési folyamat közben.

Köszönetnyilvánítás

A 2024-2.1.1-EKÖP-2024-00008. számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2024-2.1.1-EKÖP pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Michael H., Stefan B., Sven S.: *Influence of surface roughness of tools on the friction stir welding process*. Journal of Welding and Joining, 32/6. (2014) 22–28. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.6.22>
- [2] Kovács Zs. F., Hareancz F.: *A kavaró dörzshegesztés alkalmazási lehetőségei alumínium kompozitok esetén*. Gradus, 8/1. (2021) 294–298. <https://doi.org/10.47833/2021.1.ENG.011>
- [3] Singh Bharat Raj: *A Hand Book on Friction Stir Welding*. LAP Lambert Academic Publishing, UK, 2012. 3–7, 69, 72–74, 90–104. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5088.6244>
- [4] Kilic S., Ozturk F., Demirdogen M. F.: *A comprehensive literature review on friction stir welding: Process parameters, joint integrity, and mechanical properties*. Journal of Engineering Research, 13/1. (2025) 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.09.005>
- [5] Bilici M. K.: *Effect of tool geometry on friction stir spot welding of polypropylene sheets*. Express Polymer Letters, 6/10. (2012) 805–807. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2012.86>
- [6] Kovács Zs. F.: *Acéllemez kavaró dörzshegesztése*. Hegesztés Technika, XXXIV/1. (2023) 51–53.
- [7] Mugada K. K., Kumar A.: *Role of Tool Shoulder End Features on Friction Stir Weld Characteristics of 6082 Aluminum Alloy*. Journal of The Institution of Engineers (India), Series C, 100 (2019) 343–350. <https://doi.org/10.1007/s40032-018-0451-9>
- [8] Tarasov S., Amirov A., Chumaevskiy A., Savchenko N., Rubtsov V. E., Ivanov A., Moskvichev E., Kolubaev E.: *Friction Stir Welding of Ti-6Al-4V Using a Liquid-Cooled Nickel Superalloy*. Tool Technologies, MDPI, 10/118. (2022) 1–2, 13–14. <https://doi.org/10.3390/technologies10060118>
- [9] Abolusoro O. P., Akinlabi E. T., Kailas S. V.: *Impact of tool profile on mechanical behavior and material flow in friction stir welding of dissimilar aluminum alloys*. Materialwissenschaft Werkstofftechnik, 51. (2020) 729–730. <https://doi.org/10.1002/mawe.202000002>
- [10] Javadi M. S., Ehteshamfar M. V., Adibi H.: *A comprehensive analysis and prediction of the effect of groove shape and volume fraction of multi-walled carbon nanotubes on the polymer 3D-printed parts in the friction stir welding process*. Polymer Testing, 117. (2023), 107844. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107844>