

A KAVARÓ DÖRZSHEGESZTÉS SZERSZÁMÁNAK FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEI ALUMÍNIUM ÖTVÖZETEK ESETÉBEN

DEVELOPMENT POSSIBILITIES OF TOOLS OF FRICTION STIR WELDING FOR ALUMINIUM ALLOYS

Kozák Emese⁰⁰⁰⁹⁻⁰⁰⁰⁵⁻³³⁴⁰⁻²⁹⁶⁷^{1*}, Kovács Zsolt Ferenc⁰⁰⁰⁰⁻⁰⁰⁰²⁻⁶⁹⁹⁵⁻⁶⁵⁰⁸¹,

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem,
Magyarország

<https://doi.org/10.47833/2025.1.ENG.010>

Kulcsszavak:

kavaró dörzshegesztés
FSW szerszám
alumínium kötés
hegesztés
anyagvizsgálat

Keywords:

friction stir welding
FSW tool
aluminium joint
welding
material testing

Cikktörténet:

Beérkezett 2025. január 8.
Átdolgozva 2025. április 1.
Elfogadva 2025. április 3.

Összefoglalás

Kedvező tulajdonságai miatt, az alumínium és ötvözeire az elmúlt években jelentősen megnövekedett a kereslet, mivel mechanikai tulajdonságai közel azonosak a hagyományos szerkezeti acélokéhoz, viszont tömegük megközelítőleg azok egyharmada. A technológia fejlesztése leginkább a hagyományos olvadási hegesztéssel nehezen hegeszthető fémek, mint például az alumínium ötvözetek hegesztését teszi lehetővé. Az eljárás neve angolul Friction Stir Welding (FSW), magyarul kavaró dörzshegesztés. Ezen cikk során röviden bemutatásra kerül a kavaró dörzshegesztés, illetve annak alkalmazása. A kutatás során 5053-as alumínium ötvözetek hegesztése valósult meg az említett technológiával, melyekhez egyedileg tervezett FSW szerszámokat alkalmaztunk. Ezen szerszámok 3D nyomtatás technológiájával készültek, mely biztosította a bonyolult geometriák gyártását. A hegesztések elvégzése után a darabokon a következő anyagvizsgálatok kerültek elvégzésre: szemrevételezés, szakítóvizsgálat, keménységmérés, illetve metallográfiai vizsgálat.

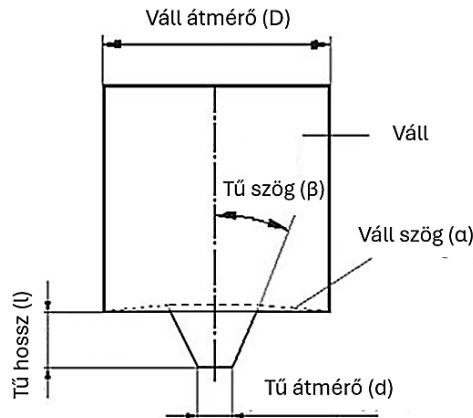
Abstract

In recent years, the demand for aluminum and aluminum alloys has been increasing because of their favorable properties. The properties of aluminum alloys are almost the same as structural steel, but their weight is approximately one third of theirs. The development of the technology makes it possible to weld metals that are difficult to weld with traditional fusion welding, such as aluminum alloys. The procedure is Friction Stir Welding (FSW). This article briefly introduces FSW procedure and its application. During this research, 5053 aluminum alloys were welded with the mentioned technology, for which we used customized FSW tools. 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.

* Kapcsolattartó szerző. E-mail cím: kozak.emese@nje.hu

1. Bevezetés

A kavarási dörzshegesztés (angolul: Friction stir welding, FSW), egy szilárdtest-hegesztési eljárás, mely során az alapanyagok megolvadása nélkül hozhatunk létre kötést [1]. A művelet alapelve, hogy az anyagok között úgy alakít ki szilárd fázisú kötést, hogy az eljárás során nem éri el azok olvadáspontját. A hegesztéshez egy kopásálló forgó szerszámot alkalmaznak, mely behatol a hegesztetni kívánt rögzített munkadarabokba. A szerszám váll része súrlódási hőt termel, mely következtében a munkadarabok szilárdsága csökken, anélkül, hogy elérné azok olvadáspontját, az anyag tehát meglágyul. Ebben fázisban, a szerszám állandó forgó mozgása közben, végig vonul a hegesztési illesztés mentén, majd a lehűlés során szilárd fázisú kötés alakul ki a munkadarabok között. A szerszám fő paramétereit a 1. ábra foglalja össze [2] [3] [4].



1. ábra FSW szerszám fő paramétereit [5]

A folyamat során változó paraméternek tekintjük első sorban a hegesztendő anyagokat, azok anyagminőségét, anyag vastagságát, illetve befolyásoló tényező többek között, ha 2 vagy több egymástól eltérő anyagot kívánunk hegesztetni. A folyamat technológiai változói közé sorolható a hegesztés során beállított szerszám dőlésszöge, előtoló sebesség, fordulatszám, a tengely irányú erő nagysága, illetve esetenként a folyamat során alkalmazott hűtés megléte is. A szerszám tervezésénél meghatározó szerepet tölt be a szerszám anyaga, szerszámváll átmérő, tű geometriája, átmérője és hosszúsága [6] [7] [8] [9].

A kutatásba jelen korunk legdinamikusabban fejlődő gyártási eljárása, a 3D fémnyomtatás is beintegrálásra kerül. Az FSW- szerszámok gyártása forgácsolással készül (szubtraktív gyártással), de abban az esetben, ha komplex tű és váll geometriát kívánunk létrehozni csak additív gyártás jöhet szóba, mivel a 3D fémnyomtatással tér nyílik az összetett, forgácsolás szempontjából túl bonyolultnak tekinthető elemek kivitelezésére is, mely többek között gazdasági szempontból is előnyt jelent.

2. FSW szerszám tervezése

A 3D fémnyomtatás által tér nyílik, a hagyományos megmunkáláshoz képest, gyorsabban és költséghatékonyabban legyártani a bonyolult geometriával rendelkező elemeket, így a FSW-hez szükséges szerszámot is. A 3D nyomtatás az FSW-nél még csak úgy jelent meg, hogy e technológiával készített termékeket hegesztettek össze [10]. Jelen kutatás éppen ezért úttörőnek számít, hiszen e tanulmányban kerül először megvizsgálásra a 3D nyomtatással készült szerszámok tesztelése.

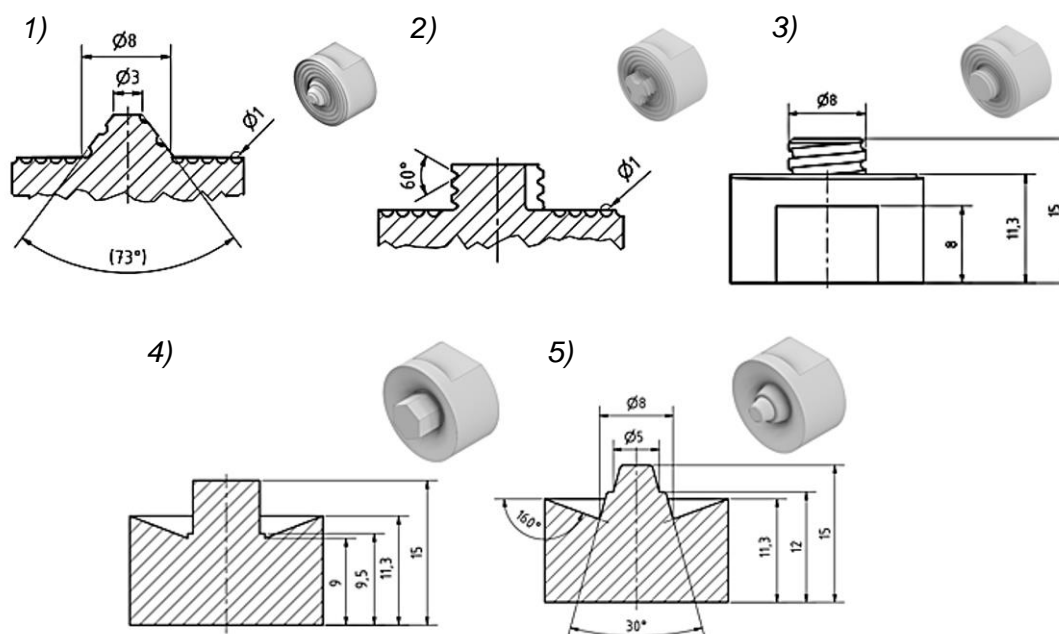
Első sorban figyelembe vettük a hegesztendő munkadarabokat, mely jelen esetben 2 db 4 mm vastagságú alumínium lemez. A lemez vastagsága befolyásolja a tű hosszát, mivel az nem lehet egyenlő vagy nagyobb, mint a hegesztendő anyagvastagság. Érdekes valamivel rövidebbre tervezni a tű hosszát, hogy az ne érjen át az anyagon, ebből eredően a szerszám tű része 3,7 mm hosszúságúra lett kialakítva.

A szerszám váll átmérője jelentősen befolyásolja a hegesztési varrat kialakulását. Alumínium ötvözetek esetén elmondható, hogy a szerszámváll átmérője a tű átmérőjének 2,5...3 szorososa. A szerszám váll átmérője befolyásolja a varrat szélességét, illetve a termelődő súrlódási hő nagyságát.

Ebben a kutatásban minden szerszám azonos, 20 mm átmérővel lett megtervezve, de kutatás folytatásában érdemes azonos paraméterek mellett, különböző váll átmérők vizsgálata is.

Az FSW szerszám teljes hossza minden esetben 15 mm, mely elegendő a befogásra, és emellett költséghatékony gyártás szempontjából.

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



2. ábra FSW szerszámok 1) 1.-számú szerszám 2) 2.-számú szerszám 3) 3.-számú szerszám
4) 4.-számú szerszám 5) 5.-számú szerszám

3. Kísérlet ismertetése

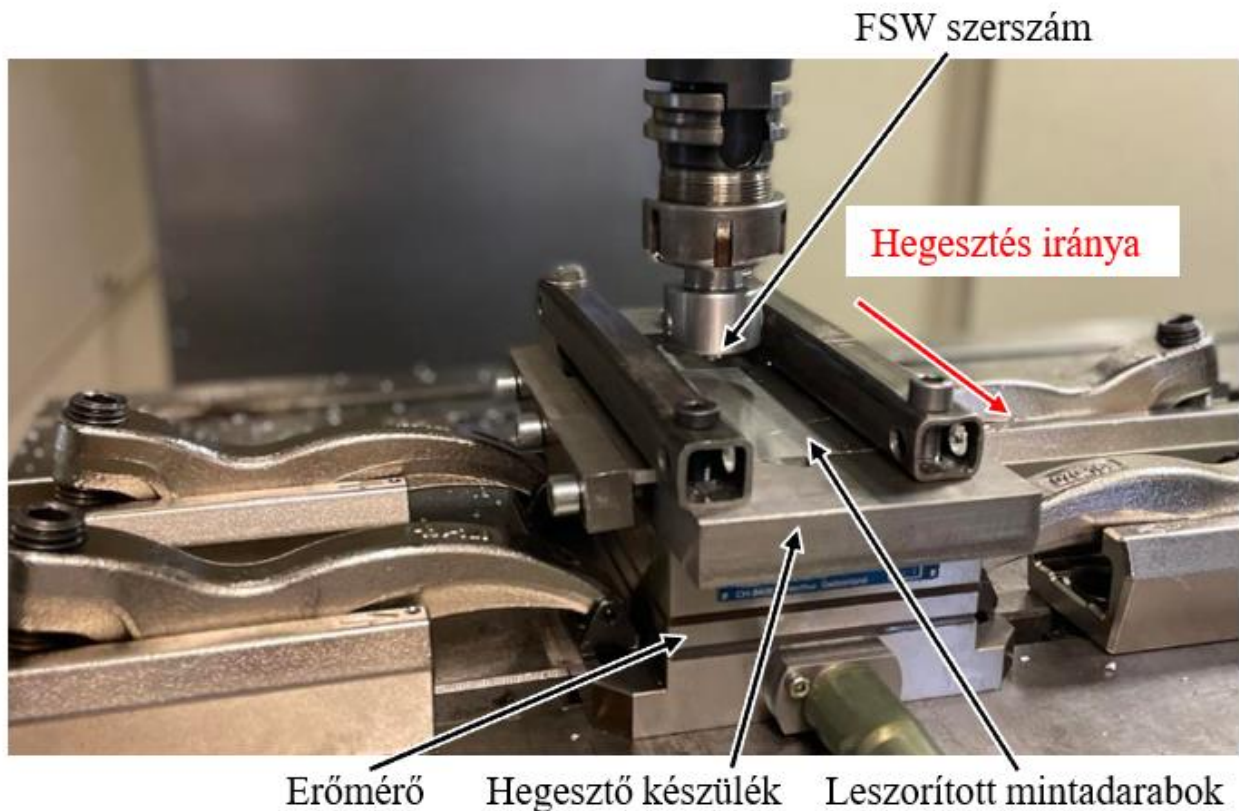
Ezen cikk során a hegesztendő próbalemezek anyagminősége 5053 megnevezésű alumínium ötvözet, mely lemezeknek befoglaló méretei 50x90x4 mm. A kutatás során keressük az optimális szerszám geometriát, - hegesztési beállításokat, - a varrat minőségének roncsolásos és roncsolásmentes anyagvizsgálatával.

A vizsgálat során összesen 15 mérést 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 megnevezése	Fordulatszám n (min^{-1})	Előtolás v_f (mm/min)
1.	1.	1000	80
2.			125
3.			170
4.	2.	1000	80
5.			125
6.			170
7.	3.	1000	80
8.			125
9.			170
10.	4.	1000	80
11.			125
12.			170
13.	5.	1000	80
14.			125
15.			170

A hegesztés során a lemezek ugyanabban a síkban helyezkednek el, és az érintkező felületeik 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 szerszám kialakításnak megfelelően történjen. A hegesztés menete a 3. ábrán figyelhető meg.



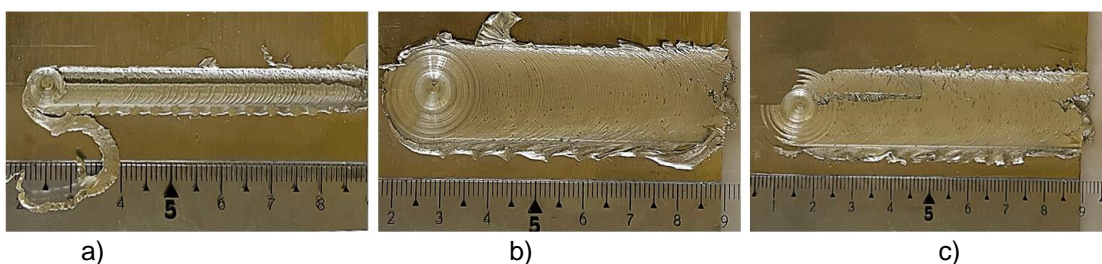
3. ábra Kísérlet elrendezése

4. Anyagvizsgálatok

Ebben a fejezetben a hegesztett mintadarabok vizsgálatának folyamatát és eredményeit összegeztük. A kísérlet során a mintadarabokat szemrevételezéssel, szakítóvizsgálattal, keménységméréssel és metallográfiai úton kerülnek kiértékelésre.

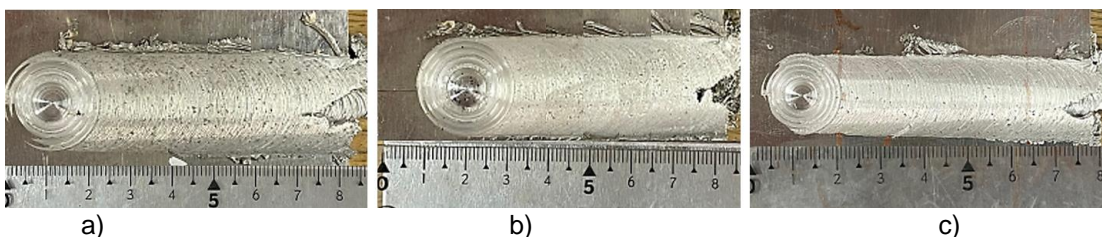
4.1. Szemrevételezés

A szemrevételezés során kiemelendő az 1.-és 3.- számú szerszámmal történő hegesztési varratok. Az hegesztési varratok vizsgálata szemrevételezéssel kezdődött. Az 1. szerszám 80 mm/min -es előtoláson végig „szántotta” a varratot, nem alakult ki a megfelelő keveredési varrat. 125 mm/min-es előtolásnál, egy jóval ígéretesebb kötést láthatunk, viszont az előtolás növelésével látható, hogy alagúthibák léptek fel a kötésben (4.ábra).



4. ábra 1. számú szerszámmal készített varratok felülnézeti képei a) 80 mm/min; b) 125 mm/min; c) 150 mm/min

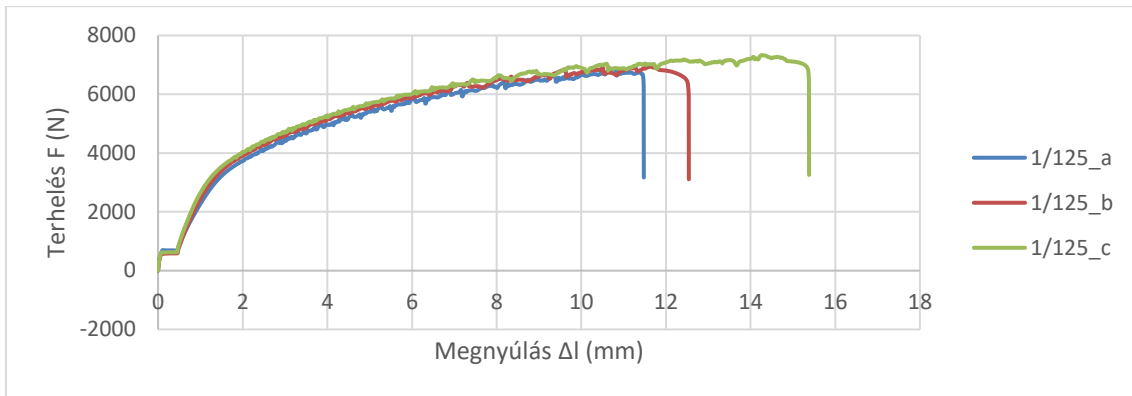
A 3.szerszám esetében mind a 3 mérésnél kialakult a keverési varrat, érdekességük viszont különböző. A 80 mm/min-es előtolás érdekes felületet eredményezett, de az előtolás növelésével az érdekesség egyre csökkent. A varrat elején kialakult hibák alagúthibákra utalnak a varraton belül (5.ábra).



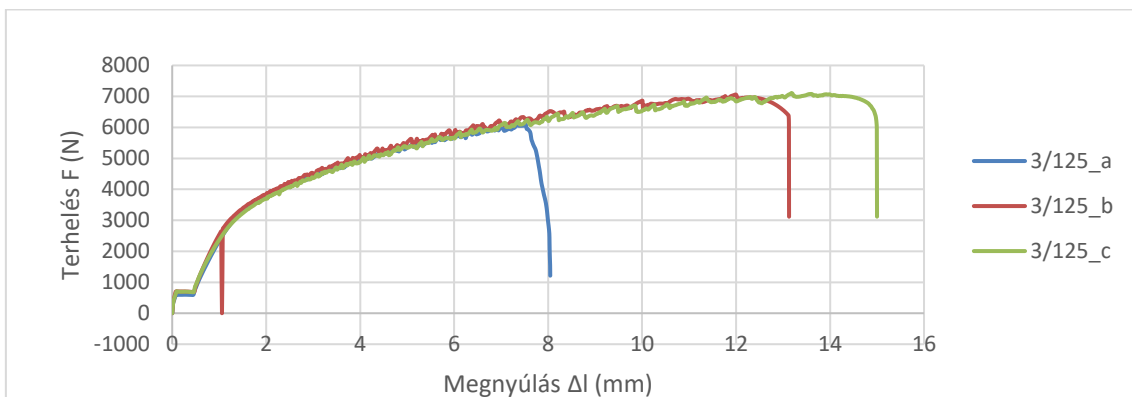
5. ábra 3. számú szerszámmal készített varratok felülnézeti képei a) 80 mm/min; b) 125 mm/min; c) 150 mm/min

4.2. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálatokhoz 3 darab 10 mm széles próbatest lett kivágva keresztbe a hegesztett darabokból. A próbatestek névleges szélessége 8 mm, hossza pedig 98 mm, összesen 36 db próbatest készült el az előkészületek során, 3-3 db a különböző előtolási sebességen. A szakítóvizsgálat Instron 4482 típusú szakítógépen történt, az eredményeket a gép íratta ki táblázatos és grafikus formában. A legnagyobb terhelést az 1/125 és 3/125-ös minták viselték el. A szakítódigramokat a 6. és a 7. ábra foglalja össze.



6. ábra 1-számú szerszámmal, 125 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja

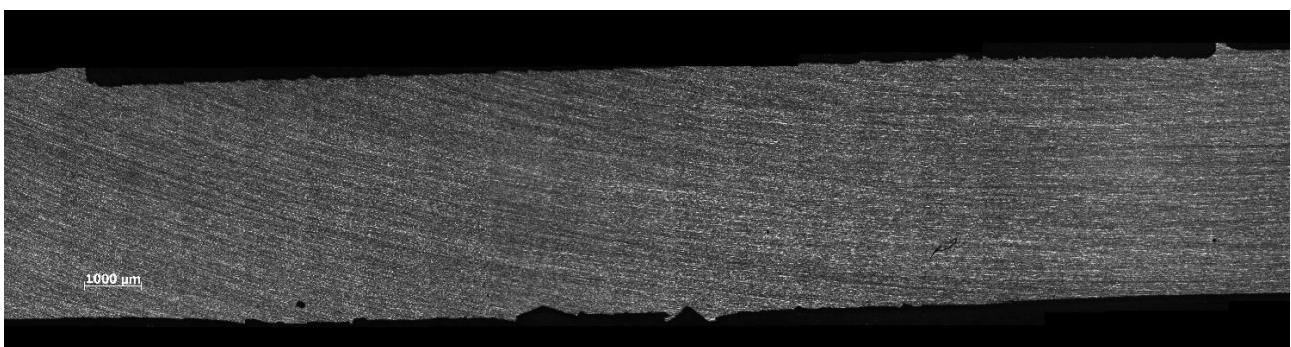


7. ábra 1-számú szerszámmal, 125 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja

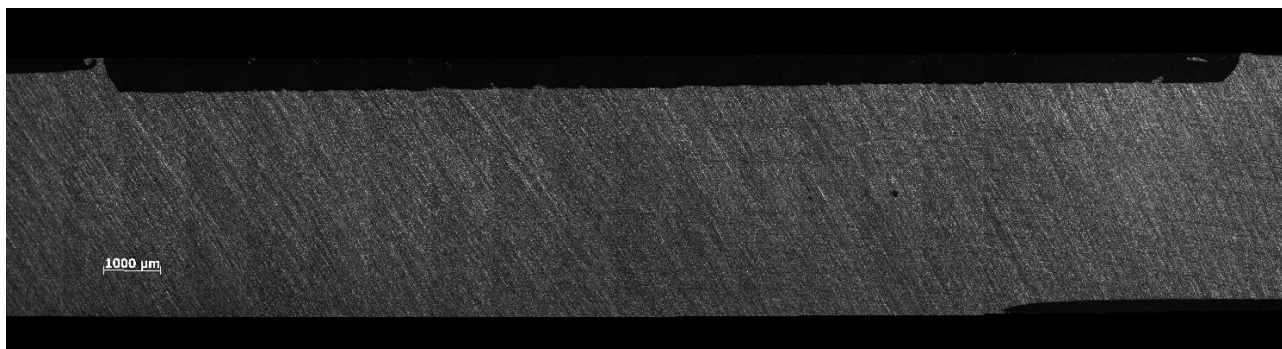
4.3. Varratok metallográfiai vizsgálata

A hidegbeágyazással előkészített mintákat 3 fázisban csiszoltuk, először 320, 600 és 1200-as csiszolópapírral, ezt követően vizsgáltuk meg mikroszkóp alatt, hogy feltárjuk a lehetséges hibákat.

Hibák feltárását vizsgálva megállapíthatjuk, hogy mindegyik varratban találhatunk különböző méretű hibákat. Az összes varratot vizsgálva az 1/125 és a 3/125-ös hegesztés eredményezte a legkisebb hibák kialakulását (8-9. ábra).



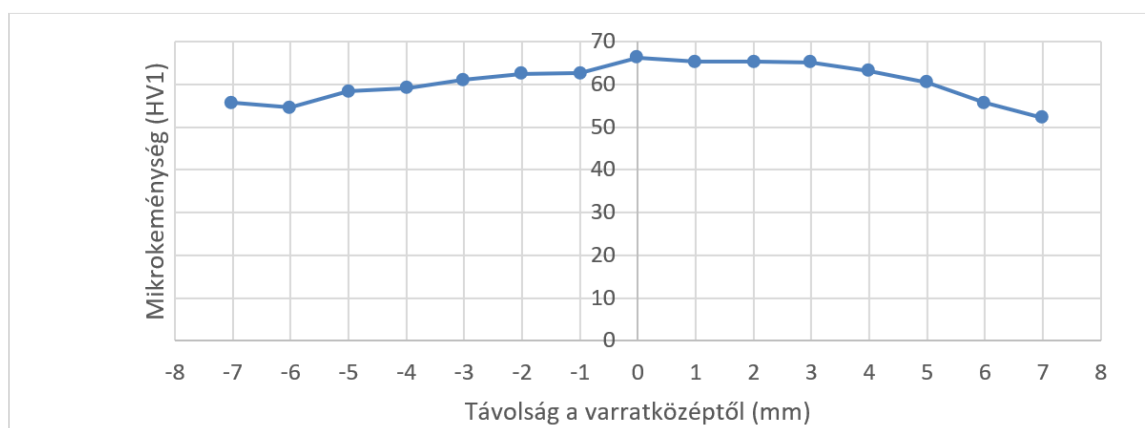
8. ábra 1.-számú szerszám által hegesztett mintadarab keresztmetszeti képe 125 mm/min előtolás esetében előtolás esetében



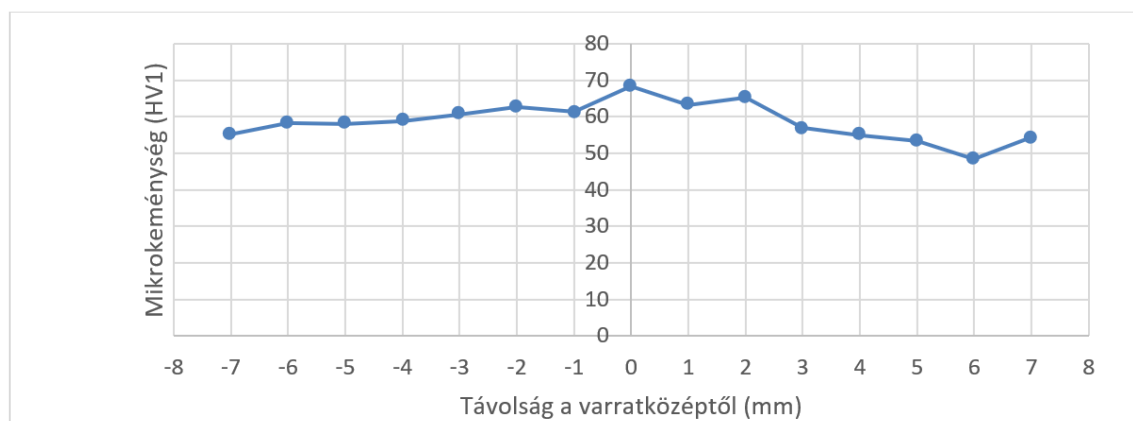
9. ábra 3.-számú szerszám által hegesztett mintadarab keresztmetszeti képe 125 mm/min előtolás esetében előtolás esetében

4.4. Keménységmérés

Vickers keménységmérést végeztem a beágyazott mintadarabokon Struers Duramin-100-as típusú gépen. A vizsgálat az 1/125 és 3/125-ös mintán került elvégzésre, melyek a korábbi vizsgálatok során a legeredményesebbnek bizonyultak. Terhelés 1 kgf. A hegesztendő darabok azonos anyagúak voltak, ezért várható volt, hogy a keménység is közel azonos lesz a mért pontokon, illetve magasabb a varratban. A mérést a koronaoldalon végeztük vízszintes irányba haladva balról (hátra oldaltól) jobbra (előre oldal felé) (10. és 11. ábra) [2].



10. ábra Keménységmérés 1.-számú szerszám általi hegesztett mintadarab esetében, előtolás 125 mm/min



11. ábra Keménységmérés 3.-számú szerszám általi hegesztett mintadarab esetében, előtolás 125 mm/min

5. Eredmények kiértékelése

A vizsgálatok eredményei közül kiemelkedő eredményeket produkált az 1. számú és a 3. számú szerszámmal végzett hegesztés, mindkettő 125 mm/min-es előtoláson. Ezeket a szerszámokat a továbbiakban is érdemes vizsgálni, eltérő hegesztési paraméterek mellett, mint például szerszámdőlés beállítása ($1^\circ \dots 3^\circ$). A szerszámokon elhelyezett spirális csatornák javítják az anyagáramlást.

A konkáv váll kialakítását is érdemes tovább vizsgálni, empirikus úton meg találni a legoptimálisabb szerszám váll szöveget, ami kedvezően hat a hegesztési varrat kialakulásához.

A 2. szerszám esetében a szerszám tú függőleges irányú bemarkásait kerülni kell ezek mellett a beállítások mellett, egyik előtolási értéken sem felelt meg, viszont 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.

Irodalomjegyzék

- [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. pp. 22-28, DOI:10.5781/JWJ.2014.32.6.22
- [2] Kovács Zsolt Ferenc, Hareancz Ferenc: A KAVARÓ DÖRZSHEGESZTÉS ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI ALUMÍNIUM KOMPOZITOK ESETÉN, *Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország Gradus Vol 8, No 1 2021.* pp. 294-298
<https://doi.org/10.47833/2021.1.ENG.011>.
- [3] Prof. Bharat Raj Singh: *A Hand Book on Friction Stir Welding* (2012), pp. 3-7, 69, 72-74, 90-104
DOI: 10.13140/RG.2.1.5088.6244;
- [4] S. Kilic, F. Ozturk, M. F. Demirdogen: A comprehensive literature review on friction stir welding: Process parameters, joint integrity, and mechanical properties, *Journal of Engineering Research* (2023)
<https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.09.005>.
- [5] M. K. Bilici: Effect of tool geometry on friction stir spot welding of polypropylene sheets (2012), Marmara University, Technical Education Faculty, Department of Materials Technology, 34722 Istanbul, Turkey. *Express Polymer Letters* Vol 6. No 10 2012. pp 805-807 DOI: 10.3144/expresspolymlett.2012.86
- [6] Kovács Zsolt Ferenc: Acéllemez kavaró dörzshegesztése, Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét. *Hegesztés Technika XXXIV.évfolyam 2023/1* pp 51-53
- [7] K. K. Mugada, A. Kumar: 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(3):1-8., DOI: 10.1007/s40032-018-0451-9
- [8] S. Tarasov, A. Amirov, A. Chumaevskiy, N. Savchenko, V.E Rubtsov, A. Ivanov, E. Moskvichev, E. Kolubaev: Friction Stir Welding of Ti-6Al-4V Using a Liquid-Cooled Nickel Superalloy Tool Technologies, *MDPI*, 10, 118 2022. pp 1-2; 13-14, DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies10060118>
- [9] O.P. Abolusoro, E.T. Akinlabi, S.V. Kailas: Impact of tool profile on mechanical behavior and material flow in friction stir welding of dissimilar aluminum alloys, *Materialwiss. Werkstofftech.* 2020, 51, 725–731. pp 729-730. DOI 10.1002/mawe.202000002.
- [10] M. S. Javadi, M. V. Ehteshamfar, H. Adibi: 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* Vol. 117 (2023), 107844, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107844>.