



Kavaró dörzshegesztett PP lemezekben fellépő hibák megjelenése CT felvételeken

Appearance of defects in friction stir welded PP plates on CT images

¹Stadler Róbert Gábor, ²Horváth Richard, ³Fábián Enikő Réka

¹Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország, stadler.robort@bgk.uni-obuda.hu

²Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország, horvath.richard@bgk.uni-obuda.hu

³Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország, fabian.reka@bgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás

Jelen tanulmányban 4 mm vastagságú polipropilén lemezek kavaró dörzshegesztését végeztük el 12 mm átmérőjű forgó váll kialakítású szerszámmal különböző hegesztési paraméterek (szerszám fordulatszám és előtolási sebesség) mellett. A szerszám fordulatszámot és az előtolási sebességet is 4-4 szinten változtattuk, így 16 mérési pontot fogalmaztunk meg. A hegesztések után a varratokról 2D-s CT felvételeket készítettünk, majd pedig szakító próbatesteket kivágva (mérési pontonként 3 darabot) vizsgáltuk a varratok szilárdságát. A szakító vizsgálatok eredményének ismeretében a CT felvételeket értékeltük.

Kulcs szavak: Kavaró dörzshegesztés (FSW), Polipropilén (PP), műanyag hegesztés, CT

Abstract

In the present study, a friction stir welding of 4 mm thick polypropylene sheets was welded with a 12 mm diameter rotary shoulder tool at different welding parameters (tool speed and feed rate). We changed the tool speed and the feed rate parameters in 4-4 levels, so 16 measurement points were created. After welding, 2D CT scans of the welds were taken, and then tensile specimens were cut (3 per measurement point) to test the strength of the welds. The results of the tensile tests were used to evaluate the CT scans.

Keywords: friction stir welding (FSW), polypropylene (PP), plastic welding, CT

1. Bevezetés

Napjainkban a hegesztés tudományterülete egy nagyon népszerű, és széles körben kutatott témakör. Kezdvé az egyes anyag típusok hegeszthetőségétől (pl.: ausztenites rozsdamentes acél [1], hőre lágyuló kompozit anyagok [2]) a különböző hegesztési technológiák (pl.: robbantásos hegesztés [3], ultrahangos hegesztés [4]) vizsgálatáig és optimalizálásáig.

A kavaró dörzshegesztés egy a mechanikai súrlódás elvén működő hegesztési technológia, amelyet a kifejezetten nehezen hegeszthető anyagok, mint például a különböző alumínium ötvözetekre fejlesztettek ki a 90-es évek elején [5]. Az összehegeszteni kívánt anyagok illesztésénél bevezetett forgó szerszám biztosítja a hegesztési hőmérsékletet, aminek köszönhetően az anyagok összehegednek. A forgó mozgást végző szerszám a megömlesztett anyagok homogén eloszlását is biztosítja a hegesztési zónában, így már napjainkban egyre több olyan kutatás van, amely a különböző fémkompozitok hegesztését vizsgálja ezzel a hegesztési eljárással [6].

A 2004-ben Nelson és tsi. [7] sikeres hegesztési kísérleteket hajtottak végre a technológiával polimer anyagon, amely anyagcsoport szintén a nehezen hegeszthető anyagok csoportjába sorolható. Ezekután a polimerek kavará dörzshegesztéssel történő összeillesztése az évek során népszerű kutatási területté vált. A kutatások többek között kitérnek a különböző polimer és polimer kompozit anyagok hegeszthetőségére [8], a hegesztések során alkalmazott és a hegesztési varrat minőségét befolyásoló szerszám konstrukciókra és csap geometriákra [9,10].

Ezeken kívül számos olyan kutatást végeztek polimerek kavará dörzshegesztése során, ahol a hegesztési varratot, illetve morfológiai változásait vizsgálták.

Kiss és Czigány [11] polipropilén (PP) lemezek hegesztési varratait vizsgálta optikai és elektromikroszkópiával. A mérések során alacsonyabb (2000 1/perc) és magasabb fordulatszámon (3000 1/perc) végeztek hegesztéseket. Mérési eredményeik során kimutatták, hogy a varrat középső részein az alapanyag anyagszerkezetéhez hasonló szerkezetek alakulnak ki, míg a varrat határvonalán komplex szupermolekuláris struktúra volt a jellemző. Továbbá azt tapasztalták, hogy a hegesztési zónában a szferolitok átlagos átmérője a fele az alapanyagéhoz képest. Az alacsonyabb hegesztési fordulatszám hatására a határmenti átmeneti zóna összetettebb tulajdonságú volt, mint a magasabb forgási sebesség. Ez a hegesztési varrat szilárdságának romlását eredményezte.

Simões és Rodrigues [12] polimetil-metakriláton (PMMA) végeztek kavará dörzshegesztési kísérleteket, hogy megfigyeljék a hegesztés során tapasztalható anyagáramlást és termomechanikai jelenségeket. A szerzők kiemelik, hogy a fémek kavará dörzshegesztésének termomechanikai jelenségeit széles körben vizsgálták már, míg a polimer anyagoknál hiányos ez a szakirodalom rész. A PMMA nagy átlátszóságának köszönhetően könnyen elemezni tudták a hegesztési folyamat által kiváltott morfológiai változásokat. A hegesztési varratból kereszt- és hosszirányú mintákat is elemeztek. Vizsgálataikból arra a következtetésre jutottak, hogy a polimer anyag reológiai és fizikai tulajdonságaiból adódóan a hegesztés során tapasztalható termomechanikai feltételek nagy mértékben eltérnek a fémek hegesztésétől. Továbbá megfigyelték, hogy az ellenirányú oldalon a hegesztés során jelentős számú makro- és mikroüregek keletkeztek, amely a varrat szilárdságának romlását eredményezi.

Zafar és tsi. [13] 16 mm vastagságú Nylon 6 lemezek kavarádörzshegesztését végezték el A hegesztési kísérletek során a szerszám forgási sebességének (4 szinten változtatták) a hegesztési varratra gyakorolt hatását vizsgálták. A hegesztések során alkalmazott szerszám forgó váll kialakítású volt és menetes csappal volt ellátva. A hegesztési varratokon optikai mikroszkópos, pásztázó elektronmikroszkópos és DSC vizsgálatokat végeztek, illetve a varratok szilárdságát szakító vizsgálattal jellemezték. A szerzők többek között arra a következtetésre jutottak, hogy a Nylon 6 anyagot az alacsony olvadékviszkózitása miatt kisebb fordulatszámon érdemes hegeszteni. A nagy fordulatszámon történő hegesztések során a hegesztési zónában jelentős anyaghiányt és hegesztési hibákat tapasztaltak. A DSC vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy a hegesztési zóna kristályossága csökkent, továbbá az ellenirányú oldalon kisebb volt a kristályosság mint az egyenirányú oldalon. A szakítóvizsgálatok során az összes varrat szakítószilárdsága alacsonyabb volt, mint az alapanyagé.

Alumínium ötvözetek esetén egyre több olyan vizsgálatot végeznek, ahol a kavará dörzshegesztéssel előállított hegesztési varratokat CT vizsgálattal jellemzik, így átfogóbb képet kapva a hegesztés minőségéről és a hegesztési hibákról. [14,15]. A kavará dörzshegesztett polimer varratok CT vizsgálata eddig kevésbé volt kutatott terület, így jelen kutatásban különböző paraméterek mellett hegesztett polipropilén lemezek hegesztési varratait vizsgáljuk CT berendezéssel.

2. Anyagok és módszertan

A hegesztési vizsgálatok során 4 mm vastag polipropilén (PP) lemezeket hegesztettünk össze egy Mazak Nexus VCN 410A-II típusú CNC marógép segítségével. A hegesztések során alkalmazott szerszám forgó váll kialakítású volt, hengeres csap geometriával. A hegesztési kísérletek során teljes kísérlettervet alkalmaztunk, a paraméterek közül a fordulatszámot és az előtolási sebességet változtattuk 4-4 szinten, így 16 mérési pontot határoztunk meg. A vizsgálatok során alkalmazott hegesztési paramétereket az 1. táblázatban tüntettük fel.

1. táblázat: A kísérletek során alkalmazott hegesztési paraméterek

Paraméterek		Szintek			
		1	2	3	4
x_1	Hegesztési fordulatszám – n , 1/perc	500	1000	1500	2000
x_2	Előtolási sebesség – v_f , mm/perc	50	100	150	200

A hegesztési varratokról 2D-s CT felvételeket készítettünk egy Y.Cheetah FXE-160.51 Multifocus X-Ray típusú CT berendezéssel. A CT képek a teljes hegesztési varratról készültek, 70 kV-os csőfeszültség, 22 μ A-es csőáramerősség, illetve 1,2-es Gamma érték mellett. A maszkolás értéke 3, míg a faktor szám 1-re volt állítva a képek készítése során.

A CT vizsgálatok után a hegesztési mintákból 3-3 darab lapos szakítópróbatestet vágunk ki, és a varratok szilárdságát szakító vizsgálattal határoztuk meg. A szakító vizsgálatokat egy Zwick Z005 szakítógépen végeztük el. A hegesztett darabokon kívül az alapanyag szakító szilárdságát is megmértük háromszor, a varrat jósági tényezőjének meghatározásakor a három mérési eredmény átlagát (28,8 MPa) vettük alapul. A kötési hatékonyságot az alábbi képlettel számoltuk:

$$JE [\%] = \frac{\sigma_{\text{hegesztett kötés}}}{\sigma_{\text{alapanyag}}} \quad (1)$$

ahol : $\sigma_{\text{hegesztett kötés}}$ – A varrat szakítószilárdsága
 $\sigma_{\text{alapanyag}}$ – alapanyag szakítószilárdsága,

3. Eredmények bemutatása

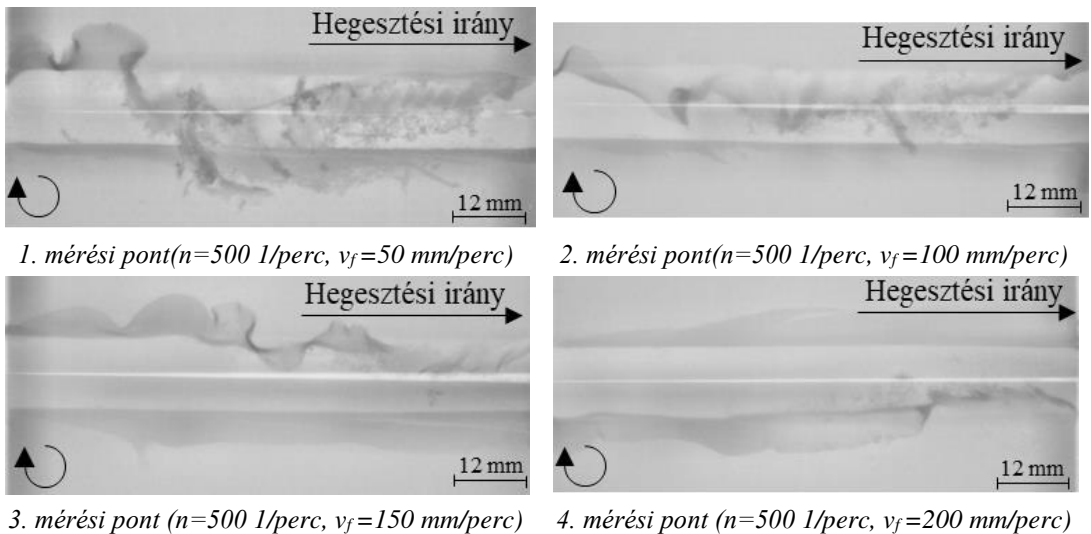
A 2. táblázatban láthatóak az egyes mérési pontokban kapott szakító szilárdságok, valamint az ezekből számolt kötési hatékonyságok.

2. táblázat: A szakító vizsgálatok eredményei és a számolt kötési hatékonyságok

Mérési pont	n [1/perc]	v_f [mm/perc]	Szakító szilárdság [MPa]			Kötési hatékonyság [%]		
			1.	2.	3.	1.	2.	3.
1	500	50	2,86	5,8	2,29	10%	20%	8%
2	500	100	2,57	4,37	5	9%	15%	17%
3	500	150	-	-	-	0%	0%	0%
4	500	200	-	-	-	0%	0%	0%
5	1000	50	5,52	5,98	6,24	19%	21%	22%
6	1000	100	5	3,48	4,28	17%	12%	15%

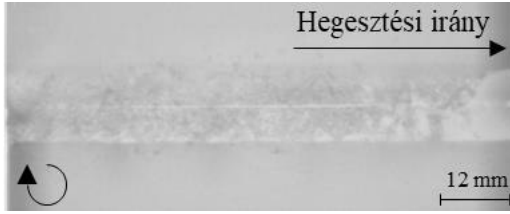
7	1000	150	5,29	2,95	4,61	18%	10%	16%
8	1000	200	2,92	3,47	3,04	10%	12%	11%
9	1500	50	6,57	9,91	7,68	23%	34%	27%
10	1500	100	4,98	6,68	1,02	17%	23%	4%
11	1500	150	3,86	5,7	1,45	13%	20%	5%
12	1500	200	2,97	3,85	2,49	10%	13%	9%
13	2000	50	7,54	7,6	8,16	26%	26%	28%
14	2000	100	5,87	3,19	7,51	20%	11%	26%
15	2000	150	5,5	4,09	1	19%	14%	3%
16	2000	200	4,19	3,48	1,12	15%	12%	4%

Ahogy a táblázatból is jól látható, hogy a legalacsonyabb előtolási sebesség (50 mm/perc) mellett sikerült a legjobb kötési hatékonyságokat elérni, illetve az is látható, hogy 2 mérési pont esetén (3. és 4. mérési pontok) nem jött létre, értékelhető kapcsolat. A mérési eredmények ismeretében érdemes megvizsgálni az egyes mérési pontok mellett kapott varratok 2D-s CT felvételeit. Az 1. ábrán láthatóak az 500 1/perc fordulatszámra hegesztett kötések.

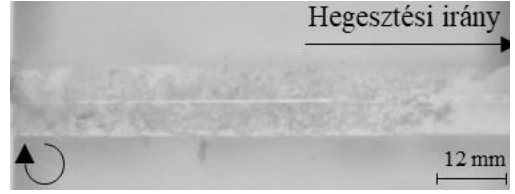


1. ábra: Az 500 1/perc fordulatszámra történő hegesztési varratok CT-s felvételei

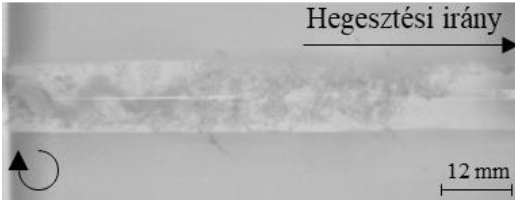
Az 1. ábrán látható CT-s felvételek mindegyikéről el lehet mondani, hogy nagyobb mennyiségű anyag került ki a hegesztési zónából sorja formájában, illetve mindegyik hegesztés esetén jól kivehetőek az illesztések. Ezenkívül jól megfigyelhető, hogy az előtolási sebesség növelésével ez az anyagvesztés növekszik, aminek köszönhetően a 3. és 4. mérési pontban már nem is jött létre értékelhető kötés. A kapott varratok arra engednek következtetni, hogy ilyen alacsony fordulatszám mellett a szerszám nehezebben tud felmelegedni, ezáltal nehezebben tudja az anyagot megömlasztani. Az előtolási sebesség növekedésével pedig a hegesztési idő csökken, amely szintén nagy szerepet játszik a hegesztés során. A 3. és 4. mérési pontban a túl alacsony fordulatszám (alacsony hegesztési hőmérséklet) és túl nagy előtolás (csökkentett hegesztési idő) miatt nem jöhetett létre értékelhető kötés. A 2. ábrán az 1000 1/perc fordulatszám mellett kapott varratok 2D-s CT felvételei láthatóak.



5. mérési pont
($n=1000$ 1/perc, $v_f=50$ mm/perc)



6. mérési pont
($n=1000$ 1/perc, $v_f=100$ mm/perc)



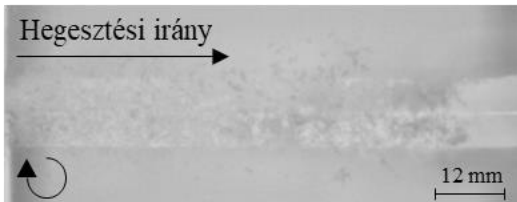
7. mérési pont
($n=1000$ 1/perc, $v_f=150$ mm/perc)



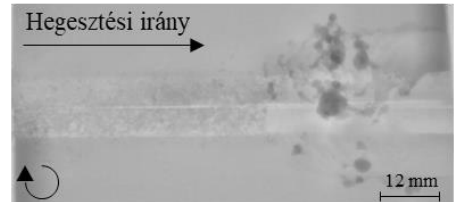
8. mérési pont
($n=1000$ 1/perc, $v_f=200$ mm/perc)

2. ábra: Az 1000 1/perc fordulatszámon történő hegesztési varratok CT-s felvételei

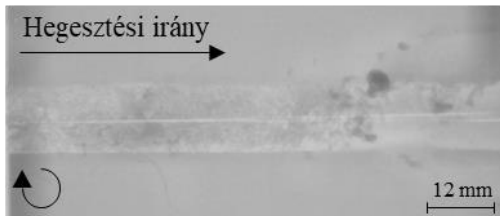
Az 1000 1/perc fordulatszámon történő hegesztések során jelentősen kevesebb anyagvesztés figyelhető meg. A magasabb fordulatszám mellett a szerszám jobban fel tudott melegedni, így az anyagot is jobban meg tudta ömlesztani. A CT felvételeken látszik, hogy a szerszám az ellenirányú oldalra sodorja inkább az anyagot, aminek következtében az egyenirányú oldalnál anyagihiány figyelhető meg, továbbá jelentős anyagihiány van a szerszám kilépő oldalán, ugyanis ott már nem tud megfelelően anyagot visszaáramoltatni a hegesztési zónába. Az illesztések még mindig jól kivehetőek a felvételeken, ami arra következtet, hogy az illesztéseknél nem történ megfelelő összehegedés. A 3. ábra az 1500 1/perc fordulatszámon történő varratok 2D-s CT felvételei láthatóak.



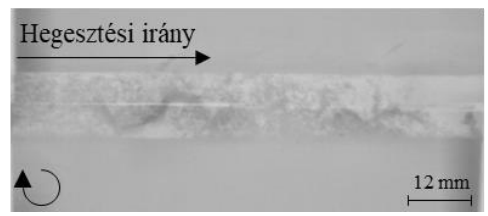
9. mérési pont
($n=1500$ 1/perc, $v_f=50$ mm/perc)



10. mérési pont
($n=1500$ 1/perc, $v_f=100$ mm/perc)



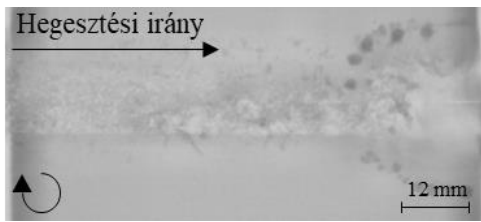
11. mérési pont
($n=1500$ 1/perc, $v_f=150$ mm/perc)



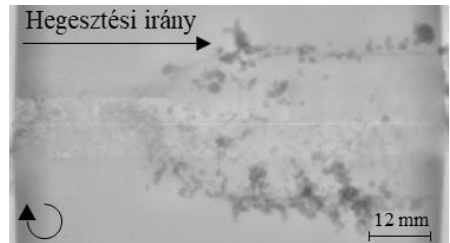
12. mérési pont
($n=1500$ 1/perc, $v_f=200$ mm/perc)

3. ábra: Az 1500 1/perc fordulatszámon történő hegesztési varratok CT-s felvételei

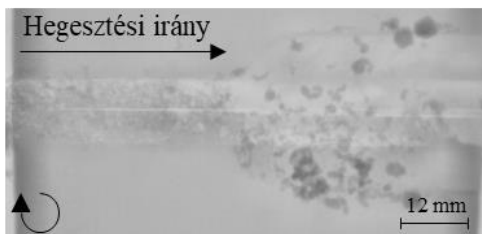
Az 1500 1/perc fordulatszámra történő hegesztési varratokon szintén jól látszik, hogy szerszám kilépési oldalán jelentős az anyagvesztés, valamint itt is megfigyelhető, hogy az ellenirányú oldal felé sodródik az anyag és az egyenirányú oldalon anyaghiány jön létre. A fordulatszám növelésével növekedett a hegesztési hőmérséklet is, ami abból is jól látszódik, hogy van olyan mérési pont (10. és 11. mérési pont) ahol a CT felvételeken jól látható hőhatás zónák alakultak ki, aminek mérete megegyezik a használt hegesztő szerszám váll átmérőjével. A 9. mérési pont kiemelkedő, olyan szempontból, hogy a CT felvételen nem látszik az illesztés, így itt az illesztéseknél is létrejött kapcsolat. Tovább erősíti ezt a tényt, hogy a 9. mérési pontnál volt tapasztalható az egyik legjobb szakító szilárdság. A 4. ábrán látható a legmagasabb 2000 1/perc fordulatszám mellett kapott varratok 2D-s CT felvételei



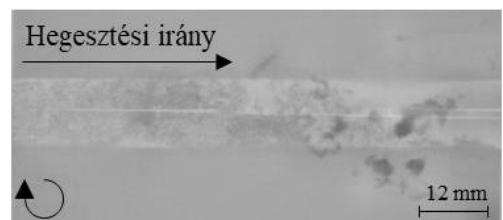
13. mérési pont
($n=2000$ 1/perc, $v_f=50$ mm/perc)



14. mérési pont
($n=2000$ 1/perc, $v_f=100$ mm/perc)



15. mérési pont
($n=2000$ 1/perc, $v_f=150$ mm/perc)



16. mérési pont
($n=2000$ 1/perc, $v_f=200$ mm/perc)

4. ábra: Az 2000 1/perc fordulatszámra történő hegesztési varratok CT-s felvételei

A 2000 1/perc fordulatszámra történő hegesztések során jól megfigyelhető, hogy a hegesztés során a szerszám hőmérséklete folyamatosan növekszik, amíg a szerszám hőmérséklet optimális szinten van tartva, addig a varrat szép és egyenes, azonban a szerszám túl melegevé válása után a szerszám átmérőjénél nagyobb hőhatás zóna alakul ki, ami a varrat esztétikáját nagyban rontja. A 13. mérési pontnál (ahogyan előbb a 9. mérési pontnál) szintén nem látható az illesztés helye a CT felvételen, ez itt is magasabb szilárdsági méréseket eredményezett.

4. Konklúzió

Jelen publikációban különböző hegesztési paraméterek mellett végeztünk kavarró dörzshegesztéseket polipropilén (PP) lemezekben. Mindegyik mérési pont hegesztési varratjáról 2D-s CT felvételt készítettünk, majd ezután a lemezekből szakító próbatesteket vágunk ki és szakítottunk el. A varratok szilárdsági paramétereinek ismeretében áttekintettük az egyes mérési pontok CT-s felvételeit, és az alábbi következtetéseket tudjuk levonni:

- Alacsony fordulatszámra (500 1/perc) nehezebben melegszik fel a szerszám, így sorja formájában kinyomja az anyagot a hegesztési zónából. Az alacsony fordulatszám gyors előtolási sebességgel párosítva eredménytelen hegesztéshez vezet

- A túl nagy fordulatszám esetén (2000 1/perc) a szerszám a hegesztés során túlmelegszik, így a varratban jelentős hőhatás zóna figyelhető meg.
- Azoknál a mérési pontoknál, ahol az illesztés nem vehető ki a CT-s felvételen, magasabb szilárdsági értékeket mértünk.
- Jól megfigyelhető volt a CT-s felvételeken, hogy a szerszám az ellenirányú oldal felé sodorja az anyagot, így az egyenirányú oldalon mindig anyaghiány jelentkezik.

5. Hivatkozások

- [1] Dománková, M., Adamech, M., Petzová, J., Bártová, K., & Pinke, P. (2018). Microstructure Characteristics of Borated Austenitic Stainless Steel Welds. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, 26(43), 45-52.
- [2] Kiss, Z., Temesi, T., Bitay, E., Bárány, T., & Czigány, T. (2020). Ultrasonic welding of all-polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(24), 48799.
- [3] Nyikes, Z., & Kovács, T. A. (2022). Experimental study of the explosive welding process applicability for train weight decreasing. *Transportation Research Procedia*, 63, 2523-2528.
- [4] Kovács, T., & Pinke, P. (2018). Analysis of the Effect of Ultrasonic Welding on Microstructure. *Acta Materialia Transylvanica*, 1(1), 49-52.
- [5] Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Templesmith, P., & Dawes, C. J. (1991). International patent application no (No. 9125978.8, p. 6). PCT/GB92/02203 and GB patent application.
- [6] Subramanya, P., Amar, M., Arun, S., Mervin, H., & Shrikantha, R. (2018). Friction stir welding of Aluminium matrix composites–A Review. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 144, p. 03002). EDP Sciences.
- [7] Nelson, T. W., Sorenson, C. D., & Johns, C. J. (2004). U.S. Patent No. 6,811,632. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [8] Huang, Y., Meng, X., Xie, Y., Wan, L., Lv, Z., Cao, J., & Feng, J. (2018). Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 105, 235-257.
- [9] Kumar, S., & Roy, B. S. (2019). Novel study of joining of acrylonitrile butadiene styrene and polycarbonate plate by using friction stir welding with double-step shoulder. *Journal of Manufacturing Processes*, 45, 322-330.
- [10] Hajideh, M. R., Farahani, M., Alavi, S. A. D., & Ramezani, N. M. (2017). Investigation on the effects of tool geometry on the microstructure and the mechanical properties of dissimilar friction stir welded polyethylene and polypropylene sheets. *Journal of Manufacturing Processes*, 26, 269-279.
- [11] Kiss, Z., & Czigany, T. (2012). Microscopic analysis of the morphology of seams in friction stir welded polypropylene. *Express Polymer Letters*, 6(1).
- [12] Simões, F., & Rodrigues, D. M. (2014). Material flow and thermo-mechanical conditions during friction stir welding of polymers: literature review, experimental results and empirical analysis. *Materials & Design*, 59, 344-351.
- [13] Zafar, A., Awang, M., Khan, S. R., & Emamian, S. (2016). Investigating friction stir welding on thick nylon 6 plates. *Welding Journal*, 95(6), 210s-218s.

- [14] Roy, R. B., Ghosh, A., Bhattacharyya, S., Mahto, R. P., Kumari, K., Pal, S. K., & Pal, S. (2018). Weld defect identification in friction stir welding through optimized wavelet transformation of signals and validation through X-ray micro-CT scan. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(1), 623-633.
- [15] Hamade, R. F., & Baydoun, A. M. R. (2019). Nondestructive detection of defects in friction stir welded lap joints using computed tomography. *Materials & Design*, 162, 10-23.