



Polikarbonátlemezek kavaródörzs-hegesztett kötésének vizsgálata

Investigation of Friction Stir Welded Polycarbonate Plates

Stadler Róbert Gábor,¹ Horváth Richárd²

¹ Óbudai Egyetem, Anyagok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest, Magyarország,
stadler.robert@bgk.uni-obuda.hu

² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország,
horvath.richard@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

This study investigates how different input parameters (speed and feed rate) affect the force components during welding and weld strength. In addition, we used microscopic imaging to observe the welding defects that occurred and their effects on failure. The measurement results show that welding forces decrease with increasing tool speed. The highest weld strength (28.5 MPa) was obtained at 1000 rpm and a feed rate of 8 mm/min.

Keywords: *friction Stir Welding, polycarbonate, welding force, joint efficiency.*

Összefoglalás

Jelen tanulmány célja annak vizsgálata, hogy különböző bemeneti paraméterek mellett (fordulatszám és előtolási sebesség) hogyan alakulnak a hegesztés közben fellépő erőkomponensek, valamint a varratok szilárdsága. Emellett mikroszkópos vizsgálattal figyeltük a fellépő hegesztési hibákat és azoknak a hatásait a tönkremenetelre. A mérési eredmények alapján a szerszám fordulatszámát növelve csökkennek a hegesztési erők. A legnagyobb varratszilárdságot (28,5 MPa) 1000 1/min fordulatszámon és 8 mm/min előtolási sebesség mellett kaptuk.

Kulcsszavak: *kavaró dörzshegesztés, polikarbonát, varratszilárdság, hegesztési hibák.*

1. Bevezetés

Napjainkban a polimereket széles körben alkalmazzák a különböző iparágakban. Az elterjedéssel párhuzamosan meg kellett oldani az anyagcsoport jó minőségű és gazdaságos kötéstechnológiáját. Ahogyan a fémeknél, úgy itt is a leggyakrabban alkalmazott kötéstechnológia a hegesztés. Az erős ipari alkalmazás miatt a mai napig népszerű kutatási területnek számít a polimerek ultrahangos hegesztése [1], lézeres hegesztése [2], valamint kavaró dörzshegesztése [3].

Utóbbi eljárás egy, a mechanikai súrlódás elvén alapuló hegesztési eljárás, amelyet az 1990-es évek elején szabadalmaztattak [4]. A folyamat során az összeilleszteni kívánt lemezek éle mentén végigvezetnek egy forgó szerszámmal. A szerszám

és a lemezek között súrlódás lép fel, ami biztosítani fogja a hegesztéshez szükséges hőmérsékletet és a varrat létrejöttét. Az eljárással jó minőségű kötés hozható létre, emellett gazdaságos, környezetbarát és energiahatékony [5].

Bár ipari szinten napjainkban főként alumíniumra alkalmazzák, a polimereken történő alkalmazás lehetőségét már a 2000-es évek eleje óta kutatják [6]. A fentebb említett előnyök mellett érdemes kiemelni, hogy az eddigi vizsgálatok alapján az eljárás alkalmas vastagabb polimer lemezek hegesztésére, valamint hőre lágyuló polimer mátrixú kompozitok hegesztésére [7].

A kavaró dörzshegesztés sematikus ábráját, valamint az eljárás során fellépő és mért erőkomponenseket az 1. ábra ismerteti.



1. ábra. A kavará dörzshegesztés sematikus ábrája [8]

A polikarbonátot olyan iparágakban alkalmazák előszeretettel, mint az autóipar, építőipar vagy éppen az egészségügyi ipar [9]. Remek mechanikai és termikus tulajdonságokkal bír, továbbá azon kevés polimerhez tartozik, amelyeket tisztán, tehát optikai minőségben lehet gyártani.

A széles körű alkalmazási terület és a víztiszta tulajdonság miatt az elmúlt években számos publikáció foglalkozott a polikarbonát kavará dörzshegesztésének vizsgálataival.

Derazkola és társai [10] polikarbonát (PC-) lemezek kavará dörzshegesztési kísérleteit végezték el. A céljuk az volt, hogy összefüggést keressenek a hegesztési paraméterek és a varrat mechanikai tulajdonságai között. A vizsgálataikhoz 4 mm vastag PC-lemezeket hegesztettek. A hegesztési kísérletek során a bemenő paraméterek közül változtatták a szerszámfordulatszámot, az előtolási sebességet, a bemerülési mélységet és a szerszámdőlésszöget is. Vizsgálták a szakítószilárdságot, a keménységet és a fajlagos ütmunkát. A legjobb szakítószilárdságot (55 MPa) és hajlítószilárdságot (61 MPa) 2200 1/perc fordulatszám, 105 mm/perc előtolási sebesség, 2,5°-os szerszámdőlésszög és 1,2 mm bemerülési mélység mellett kapták.

Ahmed és társai [11] szintén PC-lemezek kavará dörzshegesztési vizsgálatát végezték el. A fordulatszámot 3 szinten (1000, 1500, 2000 1/), míg az előtolási sebességét 4 szinten (25, 50, 75, 100 mm/min) változtatták. A legtöbb vizsgált paraméternél hibamentes kötések tudtak létrehozni. A két legjobb szakítószilárdságot (66 MPa) 1500 1/perc fordulatszámon és 50 mm/min előtolási sebességen, illetve 1000 1/min fordulatszámon és 50 mm/min előtolási sebességen érték el.

Lambiase és társai [12] PC-lemezek kavará dörzs-ponthegesztését végez-

ték el. Vizsgálataik során a fordulatszámot 3 szinten (2000, 4000, 6000 1/min), míg az előtolási sebességet 5 szinten (20, 40, 60, 80, 100 mm/min) változtatták. A mérési eredményeik alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a nagy előtolási sebesség elvékonyítja a varratot. A legnagyobb szakítószilárdságot (32 MPa) 60 mm/min előtolási sebesség mellett kapták.

Vidakis és társai [13] 4 mm PC-lemezek kavará dörzshegesztését vizsgálták. A hegesztési folyamat során mérték a fellépő erőkomponenseket. A hegesztési paraméterek mellett a szerszám csap- és vállátmérőit is változtatták. Az elkészített varratok morfológiai jellemzőit optikai mikroszkóppal, míg a varratok porozitását mikrotomográfiával vizsgálták. Mérési eredményeik alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a kis előtolási sebesség csökkenti a hegesztési varrat porozitását és befolyásolja a méretpontosságát. Továbbá a kis előtolási sebesség és a nagy fordulatszám csökkenti a folyamatban fellépő erőket.

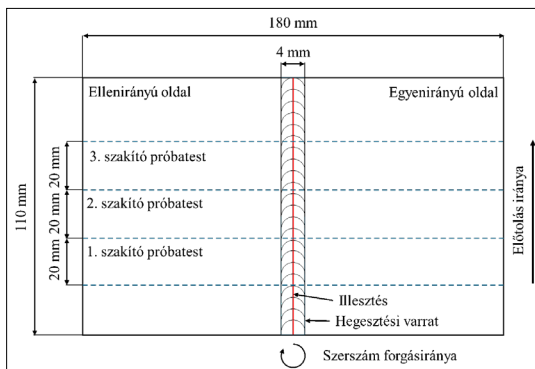
Kumar és társai [14] polikarbonát (PC) és akrilnitril-butadién-sztirol (ABS) eltérő polimerek hegeszthetőségét vizsgálta kavará dörzshegesztéssel. A vizsgálataik során 6 mm vastag PC- és ABS-lemezeket alkalmaztak. A vizsgálatok során a bemeneti paramétereket három szinten változtatták. A paraméterek között volt a fordulatszám (800, 1200, 1600 1/perc), az előtolási sebesség (6, 12 és 18 mm/perc), illetve a szerszám dőlésszöge (0, 1, 2°) is. Az alkalmazott szerszám menetes volt. A mért eredmények alapján megállapították, hogy a fordulatszám és a szerszám dőlésszögnövelésével nő a szakítószilárdság, valamint 12 mm/perc előtolási sebesség mellett érték el a legnagyobb szakítószilárdságot (22,42 MPa).

Jelen tanulmányban 4 mm vastag PC-lemezek kavará dörzshegesztését tanulmányozzuk. A bemeneti paraméterek függvényében vizsgáljuk a hegesztési folyamat során fellépő erőkomponenseket, illetve a varratok szilárdságát. Továbbá vizsgáljuk a fellépő hegesztési hibákat.

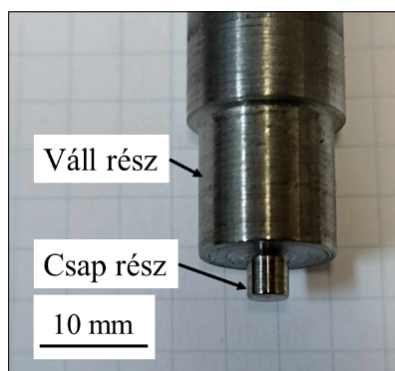
2. Anyag és módszertan

A vizsgálatok során 4 mm vastag optikai minőségű DOCANAT clear 099 (Quattroplast Kft., Budapest, Magyarország) lemezeket hegesztettünk össze. A próbadarabokat 90×110 mm-es befoglaló méretre vágtuk, így a hegesztés után ki tudtuk munkálni a szabványos lapos szakítópróbatesteket. A próbatestek kivágását és számozását a 2. ábra szemlélteti.

A hegesztési kísérleteket MAZAK Nexus VCN



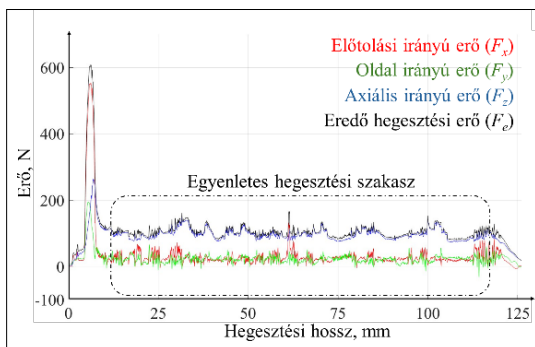
2. ábra. Hegesztési próbatestek kivágása és számozása



3. ábra. Vizsgálatok során használt hegesztőszerszám

1. táblázat. A hegesztési paraméterek értékei

Paraméterek		Szintek		
		-1	0	1
x_1	fordulatszám – n , 1/perc	600	800	1000
x_2	előtolási sebesség – v_f , mm/perc	6	8	10



4. ábra. Az erőkomponensek alakulása a hegesztés során

410A-II típusú marógépen végeztük el. A hegesztési folyamat során fellépő erőkomponenseket (F_x , F_y , F_z 1. ábra) a gépsatu alá befogott Kistler9257B típusú piezoelektromos elven működő erőmérővel mértük. Az erőmérő mérési tartománya $F_x = F_y = -5-5$ kN és $F_z = -5-10$ kN [15].

A három mért erőkomponens segítségével a hegesztéskor fellépő eredő erőt az alábbi módon számoltuk:

$$F_e = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

A varratonként 3 darab szakítópróbatest szakítóvizsgálatát Zwick Z005 szakítógépen hajtottuk végre, 10 mm/perc vizsgálati sebesség mellett. A hegesztési varratokról egy Dino-lite AM3113T típusú mikroszkóppal készítettünk felvételeket.

A hegesztési vizsgálatok során alkalmazott szerszámot a szakirodalom alapján választottuk [13]. Az alkalmazott csapgeometria hengeres volt. A csap átmérője 4 mm, míg a váll átmérője 10 mm, a szerszám anyaga pedig C45 acél. Az alkalmazott hegesztőszerszám a 3. ábrán látható.

A hegesztési paraméterek közül a szerszámfordulatszámot és az előtolási sebességet változtattuk 3-3 szinten. Az alkalmazott paramétereket előkísérletek és szakirodalom alapján határoztuk meg, melyek az 1. táblázatban láthatóak.

A vizsgálatok során teljes kísérlettervet alkalmaztunk, így az összes paraméter-kombinációt végrehajtottuk.

3. Eredmények

3.1. Erőregisztrátumok elemzése

A 4. ábrán a folyamatra jellemző erőkép látható. A 3 mért erőkomponens mellett (F_x , F_y , és F_z) feltüntettük az eredő hegesztési erőt (F_e) is. Jól megfigyelhető, hogy a hegesztés során nem lép fel jelentős oldalirányú (F_x) és előtolás-irányú (F_y) erő. Az axiális irányú erő (F_z) jelentkezik a leginkább a hegesztés során, és ez az erő az, ami nagyban meghatározza az eredő hegesztési erőt is (F_e). Mind a három erőkomponensnél három szakaszra lehet az erőregisztrátumot felosztani a hegesztési folyamat során: egy felfutási szakaszra, ahol a szerszám a hegesztési zónába történő belépése következtében megugrik az erő, az ezt követő, közel állandósult egyenletes hegesztési szakaszra, valamint a szerszám kilépése során tapasztalható lefutási szakaszra.

Az erőértékek kiértékelése során mindig az állandósult szakaszon mért átlag erőértéket értékeltük ki, ugyanis ez jellemzi a legjobban a hegesztési folyamatot.

3.2. Erőtani vizsgálatok eredményei

Az oldalirányú (F_x) és előtolás-irányú (F_y) erő minimálisan jelentkezik a hegesztési folyamat során. Ezért az erőtani elemzések során az axiális irányú (F_z) erőkomponens, valamint az eredő hegesztési erő (F_e) vizsgálatát végeztük el.

Az **5. ábra** az F_z irányú erő hatását mutatja a hegesztési paraméterek függvényében. Az ábrán jól látszik, hogy a fordulatszám növelésével a folyamatra jellemző erőértékek csökkennek. Ez a jelenség megfigyelhető más polimer anyagok kavaró dörzshegesztése során is [8, 13, 16]. A fordulatszám növelésével a hegesztési zónában megnő a hegesztési hőmérséklet, a polimer anyag ezáltal kisebb ellenállást fejt ki a hegesztőszerszámmra. Az előtolási sebesség kisebb hatással van a fellépő axiális irányú erőre (F_z), mint a szerszám fordulatszáma.

A **6. ábrán** láthatóak az F_e irányú erőhöz tartozó főhatás-ábrák, a hegesztési paraméterek függvényében. Annak köszönhetően, hogy a hegesztési folyamat során az axiális irányú erő (F_z) dominál, így hasonló tendenciák figyelhetők meg ebben az esetben is. A fordulatszám növelésével csökken az erőkomponens értéke.

3.3. Szilárdsági vizsgálatok eredményei

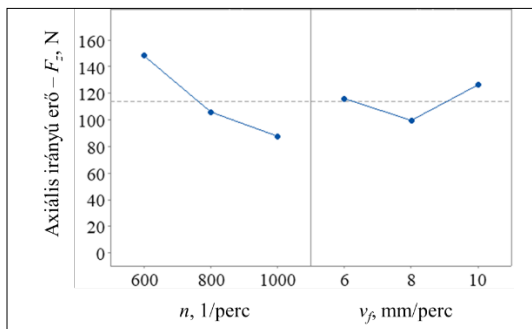
A hegesztési folyamatok során a varratokat szakítóvizsgálattal jellemeztük. Mindegyik hegesztési vizsgálatból 3-3 darab szakítópróbatestet munkáltunk ki és szakítottunk el. A mérések után pedig a 3 mérés átlagát vettük alapul. Az egyes mérési pontokhoz tartozó átlag szakítószilárdság és a 3 mérési eredmény szórása a **7. ábrán** látható.

Megfigyelhető, hogy a legnagyobb varratszilárdságot 1000 1/perc szerszám fordulatszámon és 8 mm/perc előtolási sebesség mellett kaptuk. Ekkor az átlag szakítószilárdság elérte a 28,5 MPa-t. A legkisebb varratszilárdságot pedig 1000 1/perc előtolási sebességen és 6 mm/perc előtolási sebesség mellett kaptuk (4,2 MPa).

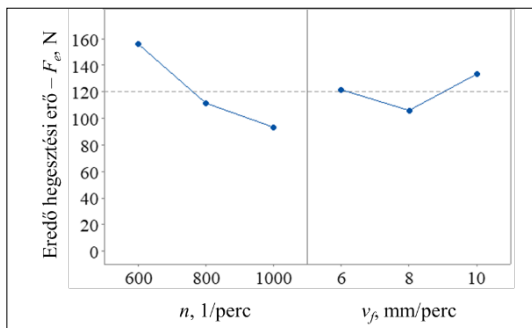
Jól megfigyelhető az ábráról, hogy az egyes fordulatszámok mellett a 8 mm/perc előtolási sebességnél kaptuk a legnagyobb szilárdsággal bíró varratokat. Ezen kívül az is látható, hogy egyes mérési pontokban a szakítóvizsgálat eredményeinél jelentős szórás tapasztalható, ami a varratban fellépő hegesztési hibára vezethető vissza.

3.4. Hegesztési hibák elemzése

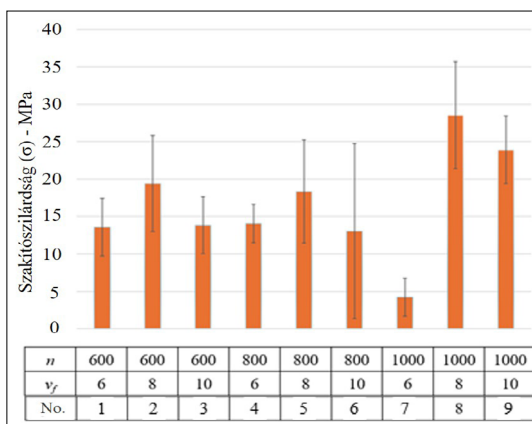
A **8. ábrán** látható egy tipikus varratkép felülnézetből. Megfigyelhető, hogy a csap mellett a vállrész is jelentős szerepet játszik a hegesztési varratkép alakulásában.



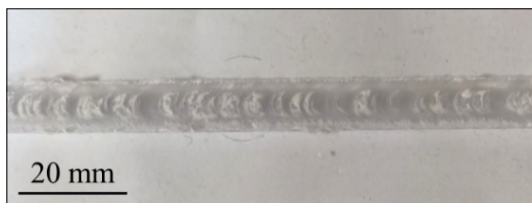
5. ábra. A hegesztési paraméterek hatása az axiális irányú erőre (F_z)



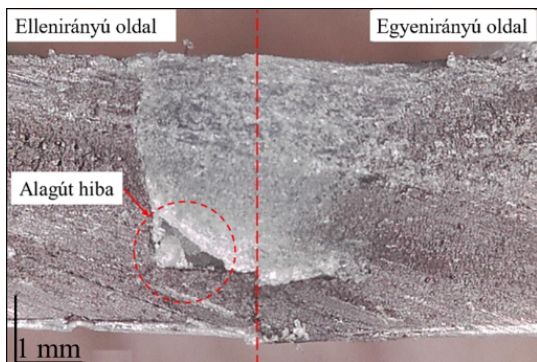
6. ábra. A hegesztési paraméterek hatása az eredő hegesztési erőre (F_e)



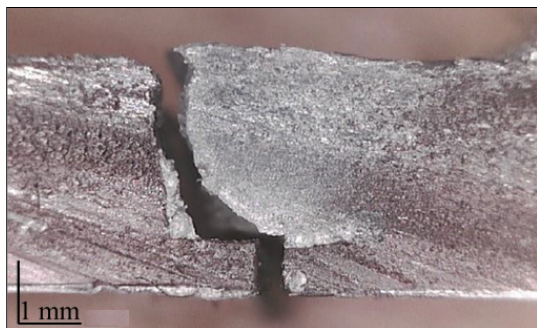
7. ábra. A hegesztési paraméterek hatása a varrat szilárdságára



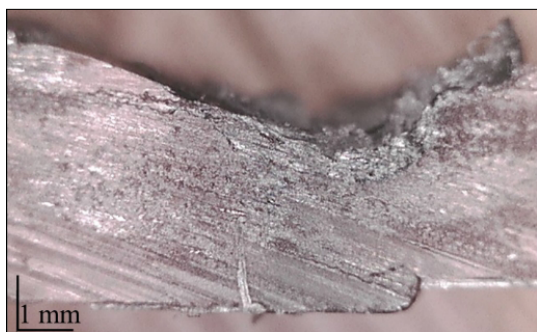
8. ábra. Jellemző varratkép felülnézetből



9. ábra. Alagúthiba a 7. mérési pontnál



10. ábra. 7. mérési pont, szakítás utáni próbatétel



11. ábra. Varratelvekonyodás

A varrat az alapanyaggal ellentétben már nem optikai minőségű. A vállrés határánál minden mérési pontnál tapasztalható volt sorjaképződés.

A hegesztési hibák és azok hatásainak vizsgálata miatt a szakítópróbatestek keresztmetszeti képeiről készítettünk mikroszkópfelvételeket szakítás előtt és után is. A legkisebb szakítószilárdságot eredményező mérési pont ($n = 1000$ 1/perc és $v_f = 6$ mm/perc) keresztmetszeti varratképében jól megfigyelhető volt az alagúthiba, amely a 9. ábrán látható. Az alagúthiba egy jelentős anyaghiányos rész, amely végighúzódik a varratban [17].

A hiba az ellenirányú oldalon jelentkezett és nagy hatással lehetett arra, hogy drasztikusan csökkentette a varrat szilárdságát. A 10. ábrán a próbatétel szakítás utáni mikroszkópi felvétele látható, ahol jól megfigyelhető, hogy a tönkremenetel az alagúthiba mentén következett be.

Nagyobb fordulatszámokon megfigyelhető volt a varrat elvékonyodása, ami szintén tipikus kavarró dörzshegesztési hibának számít [17]. Ilyenkor a lemez vastagsága az eredeti vastagság alá csökken. A 11. ábrán látható a varratelvekonyodás.

4. Következtetések

Jelen cikkben 4 mm vastag polikarbonát (PC) lemezek kavarró dörzshegesztési vizsgálatát végeztük el. A hegesztési folyamat során 3 irányban mértük a fellépő erőket, amelyekből eredő hegesztési erőt számoltunk, valamint vizsgáltuk az erőregisztrátumok alakulását is a hegesztési folyamat során. A varratok minőségét szakítóvizsgálattal jellemeztük. A hegesztési hibákat mikroszkóppal vizsgáltuk. A mérési eredmények alapján az alábbi következtetéseket vontuk le:

- A hegesztési folyamatot jellemző erőképet három szakaszra tudjuk bontani: felfutási szakasz, egyenletes szakasz és lefutási szakasz.
- A hegesztés során fellépő erők közül az axiális irányú erő (F_z) dominál, és ez befolyásolja a legjobban az eredő hegesztési erőt is.
- A fordulatszám növelésével csökken az axiális irányú erő (F_z) és az eredő hegesztési erő (F_e) is.
- A legnagyobb szakítószilárdságot 1000 1/perc fordulatszámon és 8 mm/perc előtolási sebesség mellett kaptuk (28,5 MPa), míg a legkisebbet (4,2 MPa) 1000 1/perc fordulatszámon és 6 mm/perc előtolási sebességen.
- A mikroszkópos képek alapján több mérési pontban megfigyeltünk alagúthibákat és varratelvekonyodást.

Köszönetnyilvánítás

Jelen publikáció a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs alaphól finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kiss Z., Temesi T., Bitay E., Bárány T., Czigan, T.: *Ultrasonic welding of allpolypropylene composites*. Journal of Applied Polymer Science, 137/24. (2020) 48799.

<https://doi.org/10.1002/app.48799>

- [2] Temesi T., Czigan T.: *The effect of surface treatment on the shear properties of aluminium-polypropylene joints manufactured by laser beam*. Polymer Testing, 117. (2023) 107882. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107882>
- [3] Tiwari S. K., Sharma H., Rao A. U.: *A comprehensive review of the recent developments in friction stir welding of metals, alloys, and polymers: a review of process parameters and properties*. Journal of Adhesion Science and Technology, (2024) 1–24. <https://doi.org/10.1080/01694243.2024.2334271>
- [4] Thomas W. M., Nicholas E. D., Needhan J. C., Murch M. G., Temple-Smith P., Dawes C. J.: International patent application PCT/GB92/02203 and GB patent application 9125978.8. UK Patent Office, London 6, 1991.
- [5] Majeed T., Wahid M. A., Alam M. N., Mehta Y., Siddiquee A. N.: *Friction stir welding: A sustainable manufacturing process*. Materials Today: Proceedings, 46. (2021). 6558–6563. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.025>
- [6] Nelson T. W., Sorenson C. D., Johns C. J.: *Friction stir welding of polymeric materials*. Brigham Young University, Provo, UT, USA, US 6, 811,632 B2, 2004.
- [7] Czigány T., Kiss Z.: *Friction stir welding of fiber reinforced polymer composites*. In Proceedings of the 18th International Conference on Composite Materials. Jeju, South Korea, ICCM, 2011, August. 21–26.
- [8] Stadler R. G., Horváth R.: *Investigation of Welding Forces and Weld Strength for Friction Stir Welding of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Plates*. Acta Materialia Transylvanica, 6/1. (2023) 53–58. <https://doi.org/10.33924/amt-2023-01-09>
- [9] Gohil M., Joshi, G.: *Perspective of polycarbonate composites and blends properties, applications, and future development: A review*. Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science, (2022) 393–424. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99643-3.00012-7>
- [10] Derazkola Hamed Aghajani, Simchi Abdolreza, Lambiasi Francesco: *Friction stir welding of polycarbonate lap joints: Relationship between processing parameters and mechanical properties*. Polymer Testing, 79, 105999, 2019, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.105999>
- [11] Ahmed M. M. Z., Elnaml A., Shazly, M, El-Sayed Seleman M. M.: *The effect of top surface lubrication on the friction stir welding of polycarbonate sheets*. International Polymer Processing, 36/1. (2021) 94–102, , De Gruyter <https://doi.org/10.1515/ipp-2020-3991>
- [12] Lambiasi F., Grossi V., Paoletti A.: *Advanced mechanical characterization of friction stir welds made on polycarbonate*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104. (2019) 2089–2102, , Springer <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04006-4>
- [13] Vidakis N., Petousis M., David C., Sagris D., Mourtakakis N., Moutsopoulou A.: *The impact of process parameters and pin-to-shoulder ratio in FSW of polycarbonate: welding forces and critical quality indicators*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2024) 1–21. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13033-9>
- [14] Kumar Sudhir, Roy Barnik Saha: *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. (2019) 322–330. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.013>
- [15] KISTLER Multicomponent Dynamometer 9257b datasheet, 2009, Kistler Group
- [16] Stadler G. R., Szebényi G., Horváth R.: *Investigation of weld forces and strength of friction stir welded polypropylene*. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 67/3. (2023) 183–189. <https://doi.org/10.3311/PPme.21899>
- [17] Huang Y., Meng X., Xie Y., Wan L., Lv Z., Cao J., Feng J.: *Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 105. (2018) 235–257. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.12.005>