



Akrilnitril-butadién-sztirol (ABS) lemezek kavará dörzshegesztésének erőtani és kötőszilárdsági vizsgálata

Investigation of Welding Forces and Weld Strength for Friction Stir Welding of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Plates

Stadler Róbert Gábor,¹ Horváth Richárd²

¹ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. 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

The purpose of this study is to investigate the applicability of the friction stir welding technology to acrylonitrile butadiene styrene (ABS) type polymer and the effect of welding parameters on the force values and weld strength during he-welding. The tests were carried out on 4 mm thick ABS sheets using a conventional mould design. The input parameters (speed – n , feed rate – v_f) were varied in 3-3 steps and a complete set of experiments was performed. From the force measurements, it was concluded that the force values in the feed direction (F_y) and axial direction (F_z) are the dominant force values during welding. The force components decrease with increasing speed and n/v_f ratio, while they increase with increasing feed rate. The tensile strength of the weld improves with increasing speed and n/v_f ratio, while they deteriorate with increasing feed rate. The best weld strength (10.69 MPa) was measured at 1000 rpm and 50 mm/min feed rate.

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

Összefoglalás

Jelen tanulmány célja, hogy megvizsgáljuk a kavará dörzshegesztés technológia alkalmazhatóságát akrilnitril-butadién-sztirol (ABS) típusú polimerre, valamint a hegesztési paraméterek hatását a hegesztés során fellépő erőkre és a hegesztési varrat szilárdságára. A vizsgálatokat 4 mm vastag ABS-lemezekon hajtottuk végre, hagyományos szerszámkialakítás mellett. A bemeneti paramétereket (fordulatszám, előtolási sebesség) 3-3 szinten változtattuk, és teljes kísérlettervet hajtottunk végre. Az erőmérésekből azt a következtetést vontuk le, hogy a hegesztés során fellépő erőértékek közül az előtolási irányú erő (F_y) és az axiális irányú erő (F_z) a domináns. A fordulatszám és az előtolási sebesség (n/v_f) arányszáma növelésével csökkennek az erőkomponensek, míg az előtolási sebesség növekedésével nőnek. A varrat szakítószilárdsága a fordulatszám és az n/v_f arányszám növelésével javul, míg az előtolási sebesség növelésével romlik. A legjobb varratszilárdságot (10,69 MPa) 1000 1/perc fordulatszámon és 50 mm/perc előtolási sebességnél mértük.

Kulcsszavak: *kavará dörzshegesztés, ABS, hegesztési erő, hegesztési hatékonyság.*

1. Bevezetés

A kavará dörzshegesztés (FSW) egy mechanikai súrlódás elvén alapuló hegesztési eljárás, amelyet a 90-es évek elején szabadalmaztattak [1]. Az eljárás kifejezetten sikeres és népszerű lett, például az alumínium esetén. Olyan iparágakban alkal-

mazzák, mint a repülőgépipar [2, 3, 4]. Egyelőre ipari szinten csak alumínium esetén alkalmazzák, de kutatási szinten már vannak publikációk magnezium [5], titán [6] és réz [7] anyagok hegesztési kísérleteiről. A kavará dörzshegesztést nem csak a fémek anyagok hegesztésére vizsgálják. Számos tanulmány foglalkozik a különböző polimerek és

szálerősítésű, hőre lágyuló műanyagok [8] kavaró dörzshegesztésének vizsgálatával. Az eljárás egyik legnagyobb előnyének azt tartják, hogy szálerősített, hőre lágyuló műanyagok hegesztésére is alkalmas [9]. A kavaró dörzshegesztés ezenkívül energiahatékony, illetve környezetbarát, ugyanis nincs szükség sem segédanyagra, sem védőgázra [10].

Az eljárás lényege, hogy egy forgó, speciális vállú és csapgeometriájú szerszámmal végighaladunk az érintkező és egymással összehesztendő munkadarabok között. A munkadarabok és a forgó szerszám között fellépő súrlódás állítja elő a hegesztéshez szükséges hőmérsékletet. Emellett a szerszám fontos feladata, hogy a megömlesztett anyagot keveri, áramoltatja a hegesztési zónában, ezzel biztosítva az egyenletes varratot. A hegesztési folyamat közben alkalmazott szerszámot a hegesztendő lemezek vastagságát megközelítő fogásmélységgel süllyeszti a hegesztendő anyagok közé. Miután a szerszám a hegesztési pálya végére ér, kiemelik a hegesztési zónából. A kavaró dörzshegesztés sematikus ábráját, valamint az eljárás során fellépő és mért erőkomponenseket az 1. ábra mutatja.

Az ABS az egyik legelterjedtebb, hőre lágyuló műanyag, amelyet gépjárművekben és sok háztartási készülékben is nagy mennyiségben megtalálunk. Köszönhető ez annak, hogy könnyen feldolgozható, illetve nagy a merevsége, karcállósága és tartóssága [11].

Az elmúlt években számos publikáció foglalkozott az ABS kavaró dörzshegesztésével is.

Arvin és tsi. [12] ABS-lemezek kavaró dörzshegesztését tanulmányozták. A hegesztéshez speciális, fűtött vállú szerszámot használtak. A szerszám átmérője 10 mm, a csapgeometria pedig menetes volt. A vállat elektromos fűtőtesttel látták el, amivel a váll hőmérsékletét szabályozni

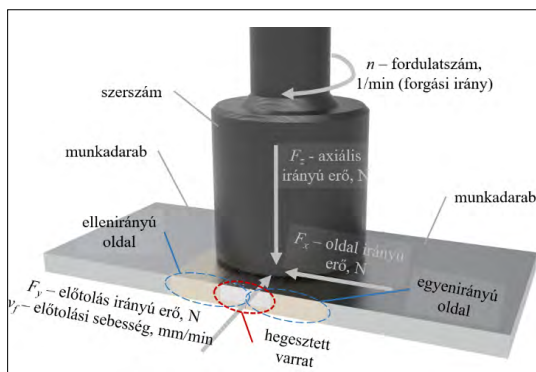
tudták. A vizsgálataik során három paramétert (szerszámfordulatszám, előtolási sebesség és a szerszám kezdeti hőmérséklete) változtattak három szinten. Teljes kísérlettervet alkalmaztak, így 27 mérési pontban végeztek kísérleteket. A mérések során a kimenő paraméterek a varrat szakítószilárdsága és a kötési hatékonyság (a varrat és az alapanyag szakítószilárdságának aránya) volt. A mérési eredményeiket variációanalízis (ANOVA) és válaszfelületi módszer (RSM) segítségével elemezték ki. Az eredmények azt mutatták, hogy a fordulatszám és a szerszámhőmérséklet növelésével nő, míg az előtolási sebesség növelésével csökken a varrat szakítószilárdsága. A legjobb hegesztési hatékonyságot (az alapanyag szakítószilárdságának 88%-át) 1600 1/perc fordulatszám-nál, 20 mm/perc előtolási sebességnél és 100 °C-os szerszámhőmérsékletnél érték el.

Sadeghian és Givi [13] 8 mm vastag ABS-lemezek kavaró dörzshegesztését tanulmányozták, hengeres és kúpos csapgeometriájú szerszámok alkalmazása mellett. A váll álló kialakítású volt, de nem fűtött. A bemenő paraméterek közül három szinten változtatták a fordulatszámot, az előtolási sebességet, a szerszám dőlésszögét, valamint a váll- és csapátmérőt és ezen átmérők arányát. A kimenő paraméterek itt is a varrat szakítószilárdsága és a kötési hatékonyság volt. A mérési eredményeiből a szerzők azt a következtetést vonták le, hogy a kúpos csapgeometria, a nagyobb szerszámdőlésszög és átmérőarány, valamint a kis előtolási sebesség javítja a szakítószilárdságot.

Mendes és tsi. [14] robotrendszer segítségével tanulmányozták az ABS kavaró dörzshegesztését. Tanulmányukban fűtött, álló váll kialakítású szerszámot alkalmaztak. A vizsgált hegesztési paraméterek a fordulatszám, az előtolási sebesség, valamint az axiális erők voltak. A hegesztés után vizsgálták a varrat szilárdságát és keménységét. Eredményeik azt mutatták, hogy a robottal végzett kavaró dörzshegesztéssel jó minőségű varratokat lehet elérni. Következtetésük szerint a nagy axiális erő elősegíti az ömledék állapotban lévő polimer összenyomódását, a fordulatszám pedig a hőtermelésért felelős, amit növelve javul a varrat szilárdsága.

Az eltérő polimerek egymással történő hegesztésének vizsgálata is egyre népszerűbb kutatási téma napjainkban [15].

Gao és társai [16] ABS és nagy sűrűségű polietilén- (HDPE) lemezek kavaró dörzshegesztéssel történő hegeszthetőségét vizsgálták. A szerzők ezen a két anyagon kívül szén nanocsöveket ve-



1. ábra. A kavaró dörzshegesztés sematikus ábrája

zettek be a kötésbe, hogy ezzel is erősítsék a varrat szilárdságát. A tanulmányban a hegesztett lemezek vastagsága 4 mm volt, a hegesztés során a két anyagot egymással átlapolva helyezték el, ahol az alsó anyag mindig az ABS volt. Az alkalmazott szerszám csapja kúpos menetes volt. A bemenő paraméterek a fordulatszám, az előtolási sebesség és a szerszámmerülési (hegesztési) mélység volt. Ezeket a paramétereket 3-3 szinten változtatták. Munkájukban a folyamatparaméterek változásának hatását elemezték a varrat szilárdságára és mikroszerkezetére. Mérési eredményeik alapján a legjobb varrat-szakítószilárdságot (14,7 MPa) 30 mm/perc előtolási sebességgel, 2500 1/perc fordulatszámmal és 0,2 mm merülési mélységgel érték el. Ezen kívül kiemelik, hogy a kisebb előtolási sebesség növeli a keverési időt, ami így jobb keveredést biztosít a hegesztési zónában, míg a fordulatszám növelése több hőt eredményez.

Hajideh és tsi. [17] szintén ABS és polipropilén (PP) kavaráó dörzshegesztését vizsgálták. Egyes mérési pontoknál a hegesztési zónába rézport vezettek be, hogy vizsgálják annak a varrat szilárdságára és keménységére gyakorolt hatását. Az alkalmazott szerszám fűtött, álló váállal és menetes csappal rendelkezett. A rézpor alkalmazása mellett a bemeneti paramétereket (fordulatszám, előtolási sebesség és szerszámhőmérséklet) három szinten változtatták. Teljes kísérlettervet alkalmaztak. A vizsgált kimeneti paraméter a varrat szilárdsága és keménysége volt. Az eredmények azt mutatták, hogy a rézpor jelentősen növeli a varrat szilárdságát és keménységét.

Jelen tanulmányban 4 mm vastag ABS-lemezek kavarási dörzshegesztését tanulmányozzuk. A be-
meneti paraméterek függvényében vizsgáljuk a
hegesztési folyamat során fellépő erőkomponen-
seket, illetve a varratok szilárdságát.

2. Anyag és módszertan

A vizsgálatok során 4 mm vastag DOCA-ABS R (Quattroplast Kft., Budapest, Magyarország) lemezeket hegesztettünk össze. Annak érdekében, hogy az összehegesztett próbatestekből legalább három szabványos szakítópróbatestet ki tudjunk vágni, a próbadarabok befoglaló méreteit 90×85 mm-re határoztuk meg. A próbatestek kivágását és számozását a **2. ábra** mutatja.

A hegesztési kísérleteket MAZAK Nexus VCN 410A-II típusú CNC marógépen végeztük el. A hegesztés során fellépő erőkomponenseket (F_x , F_y , F_z – **1. ábra**) pedig a gépsatu alá befogott, Kistler 9257B típusú, piezoelektromos elven működő



2. ábra. Hegesztési próbatestek kivágása és számozása (méretek mm-ben)

erőmérővel mértük. Az erőmérő mérési tartománya $F_x = F_y = -5/+5$ kN és $F_z = 5-10$ kN [18].

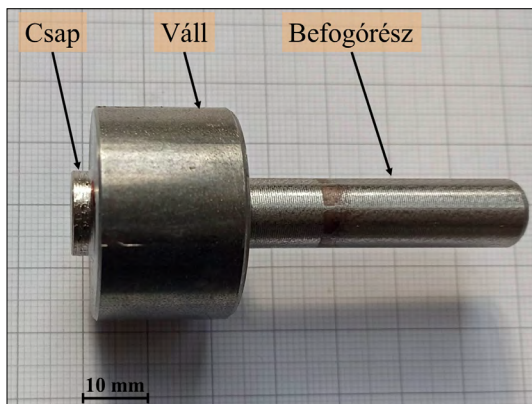
A három mért erőkomponens segítségével a hegesztéskor fellépő eredő erőt számoltuk az alábbi módon:

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

A mérési pontonként három darab szakítópróbatest szakítóvizsgálatát Zwick Z005 szakítógépen hajtottuk végre, 10 mm/perc keresztfejsébség mellett. A varratok szilárdsága mellett az alapanyag szakítószilárdságát is három mérés alapján határoztuk meg (29 MPa). A hegesztési hatékonyság meghatározása során ezt az értéket vettük figyelembe, a hegesztési hatékonyságot az alábbi módon határoztuk meg:

$$JE = \frac{\sigma_{\text{max, hegeszett - probatest}}}{\sigma_{\text{alapanyag}}} \quad (2)$$

A hegesztési vizsgálatok során alkalmazott szerszám csapgeometriája henger volt. A csap átmérője 12 mm, míg a váll átmérője 29 mm, a szerszám anyaga pedig C45 acél. Az alkalmazott hegesztőszerszám a **3. ábrán** látható.



3. ábra. A kísérletek során használt hegesztőszerszám

A hegesztési paraméterek közül kettőt, a szerzám fordulatszámát és az előtolási sebességet változtattuk 3-3 szinten. Az alkalmazott paramétereket előkísérletek alapján határoztuk meg, melyek az **1. táblázat**ban láthatóak.

A vizsgálatok során teljes kísérlettervet alkalmaztunk. A mérési pontokat és a hozzájuk tartozó hegesztési paramétereket a **2. táblázat** ismerteti. A táblázatban továbbá fel van tüntetve az egyes mérési pontokhoz tartozó n/v_f arányszám értéke. Az eredmények értékelése során ennek a paraméternek a függvényében is vizsgáltuk az eredményeket.

3. Eredmények

3.1. Az erőadatok elemzése

A **4. ábrán** látható, hogyan alakulnak a hegesztés során fellépő erőkomponensek (F_x , F_y , F_z). Jól megfigyelhető, hogy a hegesztés során nem lép fel jelentős oldalirányú erő (F_x), az előtolás irányú erő (F_y) és az axiális irányú erő (F_z) értékek dominálnak. Az utóbbi erőkomponensnél két jelentős szakaszra lehet osztani az erőképet: egy felfutási szakaszra, ahol a szerzám hegesztési zónába történő belépése következtében hirtelen megugrik az erő, illetve az ezt követő, közel állandósult szakaszra. Ez az előtolás irányú erő (F_y) esetén nem figyelhető meg, az a hegesztés folyamán mindig közel állandó értéken marad.

Az erőértékek kiértékelése során mindig az állandósult szakaszon mért átlag erőértéket értékeltük ki.

3.2. Erőtani vizsgálatok eredményei

Az erőteni elemzések során az előtolás irányú erő (F_y), az axiális irányú erőkomponensek (F_z), valamint az eredő hegesztési erő (F_e) vizsgálatát végeztük el. Az **5. ábra** az F_y irányú erő hatását mutatja a hegesztési paraméterek függvényében. Jól megfigyelhető, hogy a fordulatszám növelésével az erőértékek csökkennek, míg az előtolási sebesség növelésével növekednek. Ezen kívül a n/v_f arányszám növelésével megfigyelhető az erőérték csökkenése.

A **6. ábrán** láthatóak az F_z irányú erőhöz tartozó főhatásábrák, a hegesztési paraméterek függvényében. Hasonló tendenciák figyelhetők meg ebben az esetben is. A fordulatszám és az n/v_f arányszám növelésével csökken az erőkomponens értéke, míg az előtolási sebesség növelésével növekszik.

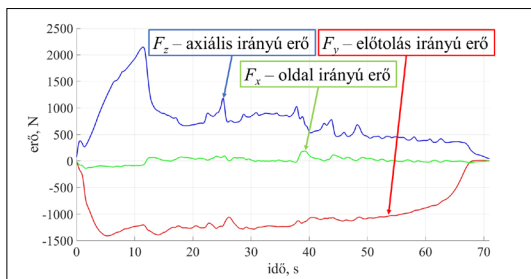
Végezetül a **7. ábrán** láthatók az eredő erő (F_e) főhatásábrái. Mivel ez az érték az előbb bemuta-

1. táblázat. A hegesztési paraméterek értékei

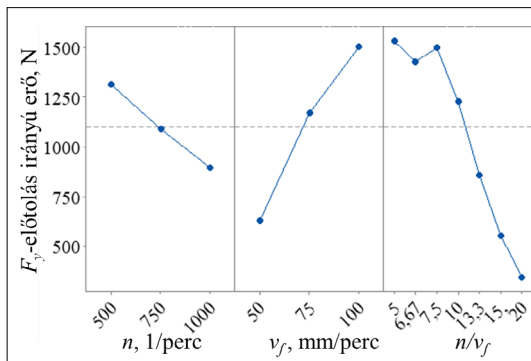
Paraméterek		Szintek		
		-1	0	1
x_1	fordulatszám – n , 1/perc	500	750	1000
x_2	előtolási sebesség – v_f , mm/perc	50	75	100

2. táblázat. A mérési pontok és a hozzá tartozó hegesztési paraméterek

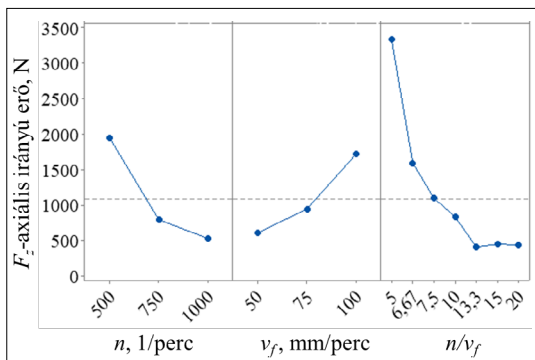
Mérési pont	n (1/perc)	v_f (mm/perc)	n/v_f
1	500	50	10
2	500	75	6,67
3	500	100	5
4	750	50	15
5	750	75	10
6	750	100	7,5
7	1000	50	20
8	1000	75	13,3
9	1000	100	10



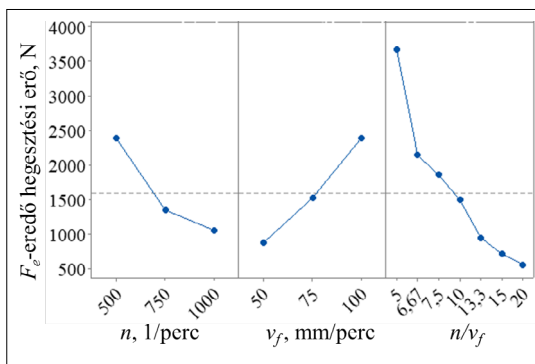
4. ábra. Az erőkomponensek alakulása a hegesztés során



5. ábra. A hegesztési paraméterek hatása az előtolás irányú erőre (F_y)



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



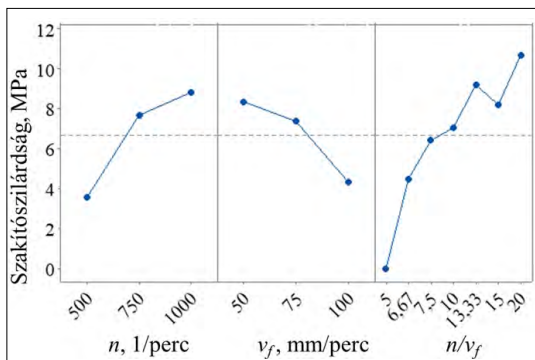
7. ábra. A hegesztési paraméterek hatása az eredő hegesztési erőre (F_e)

tott két erőértékből és az oldalirányú erőkomponensből származik, a tendenciák itt is hasonlóan alakulnak, mint a 6. ábrán. A fordulatszám és n/v_f arányszám növelésével csökken az eredő hegesztési erő, míg az előtolási sebesség növelésével növekszik.

A domináns erőértékek és az eredő hegesztési erő változása az egyes hegesztési paraméterek függvényében arra enged következtetni, hogy a fordulatszám növelésével nő a hegesztési zónában a hőmérséklet, aminek a hatására a polimer ömledék állapotba kerül, így kisebb erőértékek ébrednek a hegesztés során. Az előtolási sebesség a hegesztési idővel hozható párhuzamba: minél nagyobb ez a hegesztési paraméter, annál kisebb ideig tartózkodik a szerszám a hegesztési zónában, így kevesebb ideje van az anyag megfelelő megömlésztésére, és így nőnek a hegesztés során fellépő erők.

3.3. A szilárdsági vizsgálatok eredményei

A másik kimeneti érték a varratok szakítószilárdsága. Minden mérési pontban három mérést végeztünk, és a három kapott eredmény ér-



8. ábra. A hegesztési paraméterek hatása a varrat szilárdságára

tékének az átlagát elemeztük. A varratok szakítószilárdságának főhatásábrái a 8. ábrán láthatók.

Látható, hogy a fordulatszám és az n/v_f arányszám növelésével a varrat szilárdsága javuló tendenciát mutat. Túl kis n/v_f arányszám (3. mérési pont, $n/v_f = 5$) esetén nem jött létre a két lemez között értékelhető kötés. Az előtolási sebesség növelése a varrat szilárdságának a romlását eredményezi. A legjobb varratzilárdságot (10,69 MPa) a 7. mérési pontban kaptuk, 1000 1/perc fordulatszám és 50 mm/perc előtolási sebesség mellett.

4. Következtetések

Jelen cikkben 4 mm vastag ABS-lemezek kavarró dörzshegesztési vizsgálatát végeztük el hagyományos kialakítású szerszámmal. A kísérletek során 3-3 szinten változtattuk a szerszám fordulatszámát és az előtolási sebességet. A kísérletek kiértékelésekor elemeztük a hegesztési paraméterek hatását a folyamat során fellépő erőértékekre és a varrat szilárdságára. A vizsgálatok alapján az alábbi következtetések vonhatóak le:

- A hegesztés során fellépő erőértékek közül az előtolási irányú erőérték (F_y) és az axiális irányú erő (F_z) értékek a dominánsak.
- A fordulatszám (n) és az n/v_f arányszám értékének növelésével a hegesztési folyamat során fellépő előtolási irányú (F_y), axiális irányú (F_z) és eredő hegesztési erő (F_e) értékek csökkennek, míg a varrat szilárdsága javul.
- Az előtolási sebesség (v_f) értékének növelésével a hegesztési folyamat során fellépő előtolási irányú (F_y), axiális irányú (F_z) és eredő hegesztési erő (F_e), értékek növekednek, míg a varrat szilárdsága romlik.
- A legjobb varratzilárdságot (10,69 MPa) 1000 1/perc fordulatszám és 50 mm/perc előtolási sebesség mellett érték el. Ez az alapanyag szakítószilárdságának 37%-a.

Köszönetnyilvánítás

Jelen cikk az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-22-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Thomas W. M., Nicholas E. D., Needhan J. C., Murch M. G., Temple-Smith P., Dawes C. J.: *Friction-stir butt welding*. "International patent application PCT/GB92/02203 and GB patent application 9125978.8." UK Patent Office, London 6. 1991.
- [2] Kovács Zs., Hareancz F.: *Joining of non-weldable AA7075 and weldable AA6082 aluminium alloy sheets by friction stir welding*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 448/1. (2018) 012001.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012001>
- [3] Çam G.: *Friction stir welded structural materials: beyond Al-alloys*. International Materials Reviews, 56/1. (2011) 1–48.
<https://doi.org/10.1179/095066010X12777205875750>
- [4] Salih O. S., Ou H., Sun W., McCartney D. G.: *A review of friction stir welding of aluminium matrix composites*. Materials & Design, 86. (2015) 61–71.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.071>
- [5] Singh K., Singh G., Singh H.: *Review on friction stir welding of magnesium alloys*. Journal of magnesium and alloys, 6/4. (2018) 399–416.
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.06.001>
- [6] Gangwar K., Ramulu M.: *Friction stir welding of titanium alloys: a review*. Materials & Design, 141. (2018) 230–255.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.12.033>
- [7] Rao A. N., Naik L. S., Srinivas C.: *Evaluation and impacts of tool profile and rotational speed on mechanical properties of friction stir welded copper 2200 alloy*. Materials Today: Proceedings, 4/2. (2017) 1225–1229.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.141>
- [8] 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>
- [9] 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, 2011. 21–26.
- [10] Gibson B. T., Lammlein D. H., Prater T. J., Longhurst W. R., Cox C. D., Ballun M. C., Dharmaraj K. J., Cook G. E., Strauss A. M.: *Friction stir welding: Process, automation, and control*. Journal of Manufacturing Processes, 16/1. (2014) 56–73.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.04.002>
- [11] Arif M., Kumar D., Siddiquee A. N.: *Friction stir welding and friction stir spot welding of acrylonitrile butadiene styrene: A review*. Materials Today: Proceedings, 62/1. (2022) 300–308.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.269>
- [12] Bagheri A., Azdast T., Doniavi A.: *An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets*. Materials & Design, 43. (2013) 402–409.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.059>
- [13] Sadeghian N., Givi M. K. B.: *Experimental optimization of the mechanical properties of friction stir welded Acrylonitrile Butadiene Styrene sheets*. Materials & design, 67. (2015) 145–153.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.11.032>
- [14] Mendes N., Loureiro A., Martins C., Neto P., Pires J. N.: *Morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene welds performed by robotic friction stir welding*. Materials & Design, 64. (2014) 81–90.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.047>
- [15] Rudrapati R.: *Effects of welding process conditions on friction stir welding of polymer composites: A review*. Composites Part C: Open Access, 8. (2022) 100269.
<https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100269>
- [16] Gao J., Li C., Shilpakar U., Shen Y.: *Microstructure and tensile properties of dissimilar submerged friction stir welds between HDPE and ABS sheets*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87. (2016) 919–927.
<https://doi.org/10.1007/s00170-016-8539-y>
- [17] Hajideh M. R., Farahani M., Ramezani N. M.: *Reinforced dissimilar friction stir weld of polypropylene to acrylonitrile butadiene styrene with copper nanopowder*. Journal of Manufacturing Processes, 32. (2018) 445–454.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.03.010>
- [18] KISTLER Multicomponent Dynamometer 9257b datasheet, 2009, Kistler Group