

Polipropilén (PP) kavará dörzshegesztésének erőtani és kötés szilárdsági vizsgálata

Weld forces and joint strength investigation of friction stir welding of polypropylene (PP)

¹ Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimerteknika tanszék

³ Óbudai Egyetem – Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, horvath.richard@bgk.uni-obuda.hu

Absztrakt

A kavará dörzshegesztés egy korszerű kötéstechnológia, amit kifejezetten a rosszul hegeszthető anyagok (pl.: polimerek, nem vas fémek) hegesztésére fejlesztettek ki. Az elmúlt két évtizedben egyre több kutatás jelent meg az eljárás polimer anyagokon történő alkalmazhatóságával és fejlesztésével kapcsolatban. Jelen tanulmány célja, hogy megvizsgáljuk a módszer alkalmazhatóságát polimer anyagok hegesztése esetén, valamint a dörzshegesztés paramétereinek hatásvizsgálatát is elemezzük. A vizsgálatok során 4 mm vastag polipropilén (PP) lemezeket hegesztettünk össze két hegesztési paraméter (szerszám fordulatszám – n és előtolási sebesség – v_f) négy-négy szinten történő változtatása mellett. Így a vizsgálatok során teljes kísérlet tervet alkalmaztunk, 16 mérési ponttal. A hegesztési folyamat során mértük a szerszámmra-munkadarabra ható erő komponenseit, amelyből eredő hegesztési erőt számoltunk, valamint a kötések szilárdságát szakítóvizsgálattal jellemeztük. A szakítóvizsgálat során kapott eredmények és az alapanyag szakítószilárdságának hányadosából kötési hatékonysággal (JE) jellemeztük a folyamatot. A hegesztés során az axiális irányú erő komponens (F_z) volt a domináns erőérték. Az eredőerők (F_e) a szerszám fordulatszám növelésével csökkentek, míg az előtolási sebesség emelésével növekedtek. A kötés szakítószilárdsága, és ezzel együtt a kötési hatékonyság a szerszám fordulatszám növelésével javult, míg az előtolási sebesség növelésével romlott. A 16 mérési pont közül 2 mérési pontban nem jött létre értékelhető kötés. A vizsgálatok során elemeztük még a szerszám fordulatszám és az előtolási sebesség hányadosából származtatott arányszámot, amelynek növelésével az eredő hegesztési erő csökkenő, míg a kötési hatékonyság javuló tendenciát mutatott.

Kulcsszavak: polipropilén (PP), kavará dörzshegesztés (FSW), hegesztés erőtani vizsgálata, kötési hatékonyság (JE)

Abstract

Friction stir welding is a modern joining technology, which was developed for welding materials that are difficult to weld (e.g., polymers, non-ferrous metals). In the past two decades, more and more studies have been published about its use and improvement for polymer materials. The aim of the present study is to examine how this method can be used for welding polymers. The effects of welding parameters were also analyzed. During the experiments, 4 mm thick polypropylene (PP) plates were welded. Two welding parameters were changed: tool rotation speed (n) and feed rate (v_f), each at four levels. So, a full experimental design was used with 16 measurement points. During welding, the force components acting on the tool and workpiece were measured. From these, the resulting welding force was calculated. The strength of the joints was tested with tensile tests. From the results and the tensile strength of the base material, the joint efficiency (JE) was calculated. The axial force component (F_z) was found to be dominant. The resulting forces (F_e) decreased with increasing tool rotation speed and increased with higher feed rate. The joint strength and joint efficiency improved with higher rotation speed but became worse with increasing feed rate. In 2 out of the 16 points, no proper joint was formed. A ratio value (tool rotation speed divided by feed rate) was also analyzed. It was found that increasing this ratio led to lower welding force and better joint efficiency.

Keywords: Polypropylene (PP), Friction Stir Welding (FSW), Welding Strength, Joint Efficiency (JE)

1. Bevezetés

A kavaró dörzshegesztés (Friction Stir Welding, FSW) a 90-es évek elején szabadalmaztatott mechanikai súrlódás elvén működő hegesztési eljárás [1], amelyet kifejezetten kedvezőtlen hegeszthetőséggel jellemezhető szerkezeti anyagok, mint például alumínium alkatrészek [2,3,4,5] hegesztésére fejlesztették ki. Polimer anyagra történő alkalmazását 2004-ben Nelson és társai vizsgálták először [6]. Az elmúlt évtizedekben több vezető iparágban (pl.: járműipar) [7] a polimer anyagok vezető anyagcsoporttá váltak, így ezeknek az anyagoknak a gyors, gazdaságos és jól automatizálható hegesztése fontos ipari és kutatási téma lett. A polimerek hegesztési eljárásai közül a számos előnyös tulajdonság (gyorsaság, kötésszilárdság) miatt kiemelhető az ultrahangos hegesztés [8], a lézeres hegesztés [9], valamint a forrógázos hegesztés [10]. A hagyományos technikák mellett az olvasztott szálgyártás (FFF) 3D nyomtatás is szóba jöhet a polimerhegesztés eszközeként [11,12].

A kavaró dörzshegesztés a fent említett hegesztési eljárásokhoz hasonlóan számos előnnyel rendelkezik, ilyen például az alacsony energiaszükséglet, a technológia gyorsasága, a könnyű automatizálhatóság, valamint a hegesztési eljá-

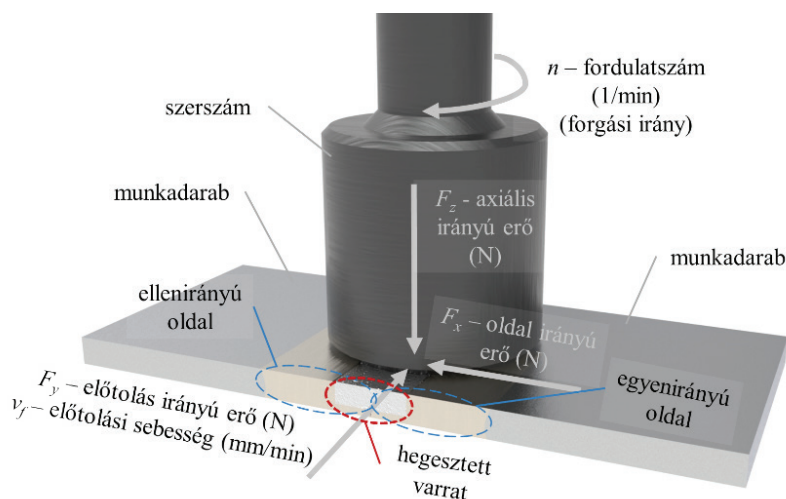
rás során nem szükséges hozaganyag alkalmazása, illetve nem keletkezik káros melléktermék sem [13,14]. Az eljárás további nagy előnyei közé tartozik, hogy vastag polimer anyagok is jól hegeszthetőek, illetve a szálerősítésű hőre lágyuló polimerek hegesztésére kifejezetten alkalmas ez a hegesztési technológia [15].

Az eljárás során egy gyorsan forgó speciális kialakítású vállal és csapgeometriával rendelkező szerszám segítségével végig haladunk az egymással érintkező, összehegesztendő alkatrészek között. A forgó szerszám és az alkatrészek érintkezése során fellépő súrlódás állítja elő az anyagok megömlesztéséhez szükséges hőmérsékletet, valamint a forgó mozgás biztosítja a megömlesztett anyagok összekeveredését is, ezáltal a varrat kialakulását. A hegesztés során alkalmazott szerszámot a hegesztendő lemezek vastagságát megközelítő fogásmélységgel süllyeszti a hegesztendő anyagok közé. A varrat elkészülte után pedig a szerszámot kiemelik a hegesztési zónából. Az 1. ábrán látható a kavaró dörzshegesztés sematikus ábrája, valamint a hegesztés során fellépő és mért hegesztési erőkomponensek [16].

Az elmúlt években számos kutatás foglalkozott a kavaró dörzshegesztés vizsgálatával. Hajideh és társai [17] négy különböző szerszám geo-

metria hatását vizsgálták polietilén (PE) és polipropilén (PP) lemezek egymással történő kavaró dörzshegesztése során. A vizsgált szerszám geometriák, a menetes hengeres, a sima hengeres, a négyszög keresztmetszetű, valamint a háromszög keresztmetszetű geometriák voltak. A szerszámok H13-as szerszámacélból készültek és mindegyik 10 mm átmérőjű volt. Kísérleteik során álló vállkialakítást alkalmaztak, amelynek átmérője 19 mm volt, míg anyaga 7075 alumínium ötvözet. A csapgeometria mellett 3-3 szinten változtatták a fordulatszámot és az előtolási sebességet. A kötés minőségének értékeléséhez szakító- és keménységi vizsgálatokat végeztek. A vizsgálatok során a polietilén és polipropilén lemezek összehegesztése minden esetben sikeresen megtörtént. A polietilén alapanyag szakítószilárdságához képest 98%-os kötési szakítószilárdságot is sikerült elérni, míg a szerszámok közül a legjobb minőségű hegesztési varratot a menetes hengeres kialakítású szerszám biztosította, $n = 1860$ 1/min fordulatszám és $v_f = 12,5$ mm/min előtolási sebesség mellett.

Sahu és társai [18] szintén a különböző szerszámgeometriák hatását vizsgálták polipropilén (PP) kavaró dörzshegesztése során. Vizsgálatuk során három különböző szerszám geometriát – a kúpos, a hengeres, és a négyszög keresztmetszetűt elemezték. A szerszámok itt is H13 szerszámacélból készültek, viszont ebben a kutatásban forgó váll kialakítású szerszámot alkalmaztak. A hegesztési paraméterek közül a fordulatszámot és az előtolási sebességet változtatták 3-3 szinten. A hegesztési folyamat során mérték az axiális irányban fellépő erőkomponenst, illetve a szakítóvizsgálattal jellemezték a kötések. Az erőmérések során azt a következtetést vonták le, hogy a fordulatszám növelésével csökken



1. ábra A kavaró dörzshegesztés elve

az axiális irányú erő, míg az előtolási sebesség növelésével növekszik. A kúpos csap geometriával nem sikerült értékelhető kötést létrehozni, a hengeres és a négyszög keresztmetszetű szerszám geometria közül utóbbi alkalmazása volt kedvezőbb. A maximális 19,74 MPa kötési szakítószilárdságot a négyzetes csapgeometriával ($n = 750$ 1/min, $v_f = 15$ mm/min) tudták elérni, ami az alapanyag 33 MPa szakítószilárdságának 59,82%-a.

Kordestani és társai [19] is a csapgeometria hatását vizsgálták polipropilén kompozit lemezek kavará dörzshegesztése során. Vizsgálataik során 4 különböző szerszám geometriát vizsgáltak kétféle (30% üveg- és 30% szénszál) polipropilén kompoziton. A kötések minőségét szakítóvizsgálattal és Izod-féle ütővizsgálattal jellemezték. A vizsgálatok alapján a szerzők arra a következtetésre jutottak, hogy a csap geometria nagy hatással van a keletkező kötés esztétikai kialakítására és mechanikai tulajdonságaira. A legjobb hegesztési kötések szakítószilárdsága az alapanyag szakítószilárdságának 30% (üvegszál), illetve 34% (szénszál), míg az ütővizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy a hegesztési varratok ütési szilárdsága az alapanyag 40%-a (üvegszál), illetve 50%-a (szénszál) volt.

Nath és társai [20] fűtés nélküli és fűtött váll konstrukciót hasonlítottak össze. Vizsgálataik során mérték a hegesztés során fellépő nyomatékot, az előtolás irányú és axiális irányú erő komponenseket. A munkadarab anyaga 3 mm vastagságú polipropilén lemez volt, amely hegesztésénél 3 szinten változtatták az előtolási sebességet. A hegesztési folyamatok után vizsgálták a kötések morfológiáját és szakítószilárdságát. Megállapították, hogy a fűtetlen váll konstrukció esetében nagyobb erők keletkeznek a hegesztés során, míg a nyomatékban nem jelentkezett kü-

lönbség. Az előtolási sebesség emelésével növekedtek az erőértékek mindkét irányban. A kötések szakítószilárdságának vizsgálata során a fűtött vállal történő hegesztési kötések teljesítettek jobban.

Mooschani és társai [21] szintén polipropilén lemezek kavará dörzshegesztésének vizsgálatát végezték el, fűtött, álló váll kialakítású szerszámmal. A hőhiány kompenzálást azzal indokolták, hogy a polimereknek alacsony hővezető képességgel és sűrűlódási együtthatóval rendelkeznek. Szerszám konstrukciójukba egy külső változtatható hőmérsékletű meleg levegős rendszert kötöttek, továbbá egy infravörös hőmérséklet szenzort a pontos szerszám hőmérséklet beállításának érdekében. A nem fűtött szerszámú vizsgálattal összehasonlítva megállapították, hogy a külső fűtés nagy hatással van a kötés szakítószilárdságára, így sikerült az alapanyag szilárdságához viszonyítva 96% kötési szilárdságot elérni.

Hajideh és társai [22] akrilnitril-butadién-sztirol (ABS) és polipropilén (PP) lemezek kavará dörzshegesztését tanulmányozták. A hegesztéseket fűtött álló váll kialakítású szerszámmal hajtották végre. Az alkalmazott hengeres kialakítású csap anyaga H13 szerszámacél volt. A vizsgálatok során előmart hornyokba rézport tettek, hogy a hegesztési folyamat során azok a hegesztési kötésbe keveredjenek. A hegesztési paraméterek közül a fordulatszámot, az előtolási sebességet, valamint a szerszám hőmérsékletet változtatták 3-3 szinten. A kimeneti paraméterek a kötés szakítószilárdsága és a keménység volt. A vizsgálati eredményeik során megállapították, hogy a rézpor jelentős javulást eredményez a kötés szakítószilárdság és keménység értékében.

Hamza és Jalal [23] áttekintő tanulmányban mutatja be azokat a kutatásokat, amelyek a kavará dörzshegesztés egy különleges változatával

az FSP-vel (Friction Stir Processing) foglalkoznak. A technológia során a kötés szilárdsági jellemzői javítása érdekében különböző erősítőanyagokat alkalmaznak (pl.: grafit, SiO_2) az egyes tanulmányokban. A szerzők az áttekintés után tanulmányukban többek között arra a következtetésre jutottak, hogy az erősítőanyag keveredését, a hőtermelést, valamint a felületi minőséget nagyban befolyásolja a fordulatszám és az előtolási sebesség.

Eslami és társai [24] nagy molekulatömegű polietilén (HMW-PE) kavará dörzshegesztése során végeztek többtengelyes erőmérést, amely során alkalmazott szerszám PTFE anyagú álló vállal lett kialakítva. A vizsgálat során 7 mérési pontot definiáltak, változtatták többek között az előtolási sebességet, a fordulatszámot és a szerszámtátmérőt is. A szerzők megállapították, hogy az erőmérő rendszer alkalmas volt a hegesztés során fellépő erőkomponensek mérésére, valamint, hogy az előtolás irányú (F_x) és oldal irányú (F_y) erőre a legnagyobb befolyással az előtolási sebesség és a fordulatszám volt. Az erőképet 4 jól elkülöníthető fázisra osztották, és elemezték az egyes fázisokban történő erőváltozásokat.

Pereira és társai [25] áttekintő tanulmányban elemezték a kavará dörzshegesztési technikák és a paraméterek hatását a polimerek szakítószilárdságára. Összeállításukban kitértek a szerszám geometria és a váll kialakítás jelentőségére is. A feldolgozott szakirodalmak alapján értékelték, hogy az egyes szerszám geometriák és hegesztési paraméterek mellett milyen minőségű hegesztési kötést kaptak. A tanulmányukban több anyagra is kitérnek, köztük a polipropilénre is. Eredményeik alapján arra a következtetésre jutottak, hogy az alkalmazott 4 mm vastag polipropilén lemez kavará dörzshegesztése esetén a menetes

hengeres kialakítású csap és az álló, fűtött váll kialakítású szerszámmal érhető el a legjobb minőségű kötés.

Ebben a cikkben egy 4 mm vastag polipropilén (PP) dörzshegesztési vizsgálatának eredményeit mutatjuk be, részletesen ismertetjük a hegesztési paraméterek hatását a hegesztéskor fellépő erőkomponensekre és a hegesztett kötések szakítószilárdságára.

2. Anyagok és módszer

A vizsgálataink során 4 mm vastag DOCAPRÉN-H polipropilén homopolimer (Quattroplast Kft., Budapest, Magyarország) lemezeket hegesztettünk össze. A próbatetek befoglaló méretei: 85 mm×180 mm voltak, annak érdekében, hogy a két lemez összehegesztése után legalább három darab szakítópróbatestet lehessen kimunkálni, a megfelelő számú mérési ismétlések érdekében (2. ábra).

A szakítóvizsgálatokat Zwick Z005 szakítógépen hajtottuk végre, 10 mm/min vizsgálati sebesség mellett. Minden mérési pontnál három hegesztett kötésből végeztünk szakítóvizsgálatot, ahogy előzetesen az alapanyag szakítószilárdságát is három méréssel határoztuk meg. A három mérés átlagából állapítottuk meg a 28,8 MPa-t, amelyet a kötési hatékonyság számítása során vettünk fi-

gyelemben. A kötési hatékonyságot az alábbi módon határoztuk meg:

$$JE = \frac{\sigma_{\max, \text{hegesztett kötés}}}{\sigma_{\text{alapanyag}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

ahol, $\sigma_{\max, \text{hegesztett kötés}}$, MPa – a hegesztett és kimunkált próbatetek szakítószilárdsági értéke, $\sigma_{\text{alapanyag}}$, MPa – az alapanyag szakítószilárdsága.

A szakítóvizsgálat előtt roncsolásmentes anyagvizsgálatokkal is értékeltük a varratokat. Egyrészt CT képeket készítettük egy YXLON Cheetah FXE-160.51 típusú Multifocus X-Ray CT berendezéssel. A felvételek elkészítése során a csőfeszültség 70 kV, a cső áramerőssége 22 μ A volt. Emellett a varratokról sztereomikroszkópos felvételeket is készítettünk OPTIKA SZM-2 típusú sztereomikroszkóppal.

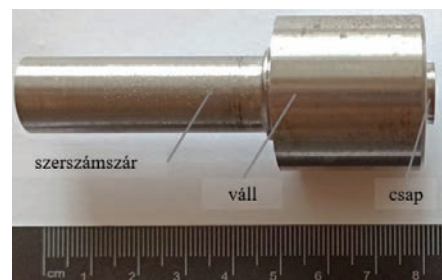
A hegesztési kísérleteket Mazak Nexus VCN 410A-II típusú függőleges megmunkáló központon hajtottuk végre. Az alkalmazott hegesztő szerszám anyaga C45-ös acél volt, amelynél forgó váll kialakítást alkalmaztunk. A csap átmérője 12 mm, a váll átmérője 29 mm, a váll magassága 3,5 mm, a csap geometriája hengeres kialakítású volt. A szerszám a 3. ábrán látható.

A hegesztési folyamatok során az erő komponenseket (F_x , F_y , F_z , - 1. ábra) a munkadarab befogó készü-

léke alá felszerelt Kistler 9257B típusú piezoelektromos elven működő erőmérőcellával mértük. Az erőmérő mérési tartománya $F_x = F_y = -5...5$ kN és $F_z = -5...10$ kN [26].

A három mért erőérték segítségével a hegesztéskor fellépő eredő erőt számoltunk az alábbi módon.

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



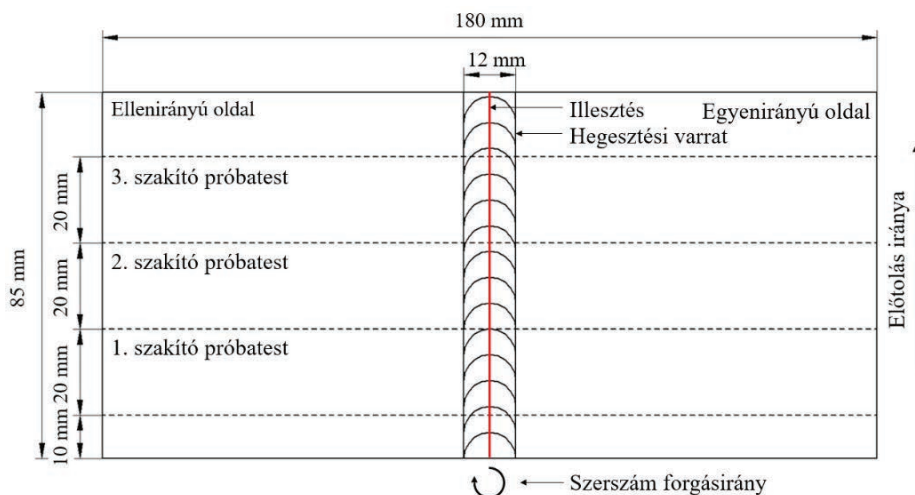
3. ábra Hegesztési kísérletek során alkalmazott szerszám

1. táblázat Alkalmazott hegesztési paraméterek

Paraméter	Szintek			
	1	2	3	4
Hegesztési fordulatszám – n , 1/min	500	1000	1500	2000
Előtolási sebesség – v_f , mm/min	50	100	150	200

2. táblázat A kísérleti darabokhoz tartozó hegesztési paraméterek

Mérési pont	n , 1/min	v_f , mm/min	n/v_f
1	500	50	10
2	500	100	5
3	500	150	3,33
4	500	200	2,5
5	1000	50	20
6	1000	100	10
7	1000	150	6,66
8	1000	200	5
9	1500	50	30
10	1500	100	15
11	1500	150	10
12	1500	200	7,5
13	2000	50	40
14	2000	100	20
15	2000	150	13,33
16	2000	200	10



2. ábra Hegesztési próbatetek elrendezése a szakítóvizsgálathoz szükséges próbatetek kivágása és számozása

A hegesztési paraméterek közül a szerszám fordulatszámot és az előtolási sebességet változtattuk 4-4 szinten. A paraméterek meghatározását az előkísérletek és a szakirodalom [18, 22, 27, 28, 29, 30] alapján határoztuk meg. Az alkalmazott hegesztési paramétereket az 1. táblázat tartalmazza.

A vizsgálatok során teljes kísérlettervet alkalmaztunk, így 16 mérési pont került meghatározásra, amelyeket a 2. táblázat ismertet.

3. Eredmények bemutatása

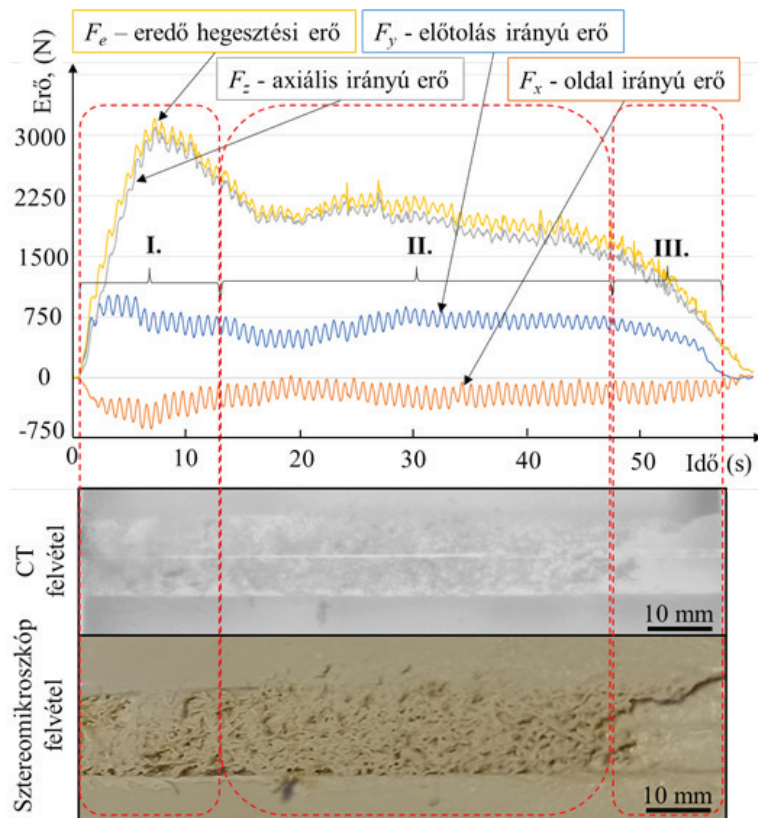
3.1. Erőképek elemzése

Az erőképek alakulását és annak a hegesztési a varratra gyakorolt hatását szemlélteti az 4. ábra a varrat felülnézeti és röntgen CT képén keresztül. A hegesztéskor fellépő erőregisztrátumok alapján a hegesztési folyamatot három szakaszra lehet bontani.

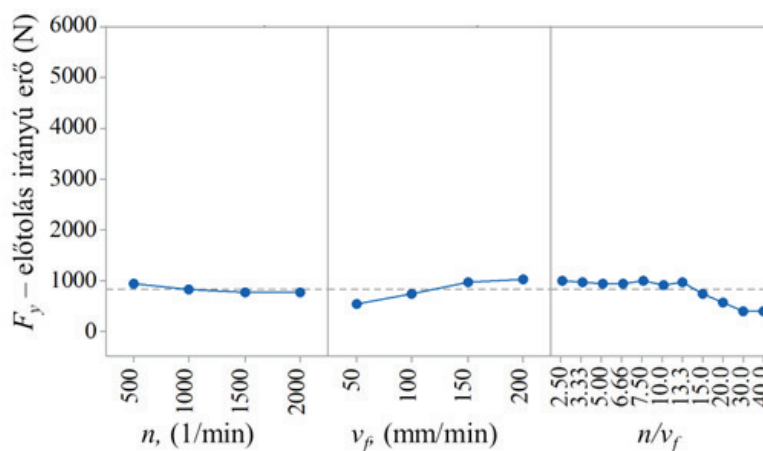
A szerszám munkadarabba történő belépése után a keletkező erők egy maximális érték elérését követően (4. ábra, I. szakasz) jó közelítéssel állandósult szakaszt írnak le (4. ábra, II. szakasz). A szerszám kilépésekor az erők lecsökkennek zérusig (4. ábra, III. szakasz). Ezek az erő-idő diagramban elkülönülő szakaszok a hegesztési kötés röntgen CT képen, és a hegesztés felülnézeti képen is jól elkülöníthetők.

3.2. Erőtani vizsgálatok eredményei

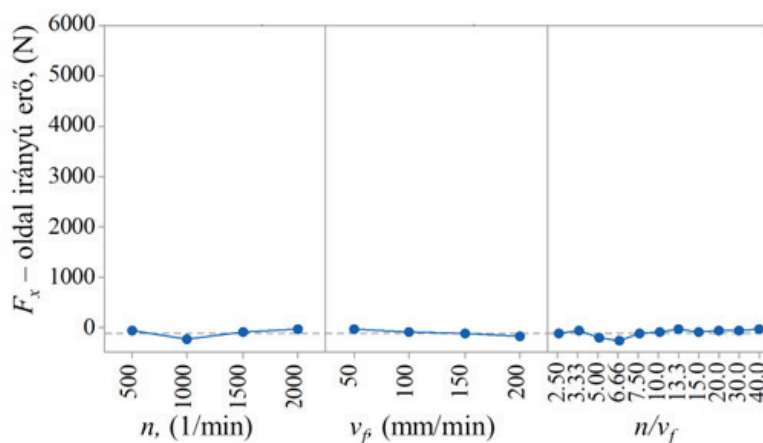
Az erőteni elemzések során az 1. ábrán feltüntetett erő komponensek, valamint az eredő erő (2) vizsgálatát végeztük. Az 5. és 6. ábra az F_x és F_y irányú erők hatását mutatja a hegesztési paraméterek függvényében. Megállapítható, hogy sem a fordulatszám, sem az előtolási sebesség, sem annak aránya nem befolyásolja érdemben a vizsgált két erőkomponenst a vizsgált paraméter tartományban.



4. ábra A hegesztés során fellépő erők és annak hatása a varratra (CT és a varrat felülnézeti képe)



5. ábra Hegesztési paraméterek hatása az oldal irányú (F_x) erőre



6. ábra Hegesztési paraméterek hatása az előtolás irányú (F_y) erőre

A 7. ábra az F_z – axiális erő változását ismerteti forgácsolási paraméterek függvényében. Megállapítható, hogy az axiális erő komponens lényegesen nagyobb értékű, mint az F_x , F_y komponensek. Az F_z erőkomponens értéke csökken a fordulatszám növelésével, valamint növekszik az előtolási sebesség emelésével. A dörzshegesztésre jellemző n/v_f viszonzyszám tekintetében pedig annak növekvő értéke estén csökkenő tendenciát mutat az F_z erőkomponens. Mivel az F_z értéke lényegesen nagyobb, mint a másik két erőkomponensé, ezért az eredő erő meghatározó eleme is egyben, így az eredő erő főhatás ábrái (8. ábra) is megegyező tendenciákkal jellemezhetők.

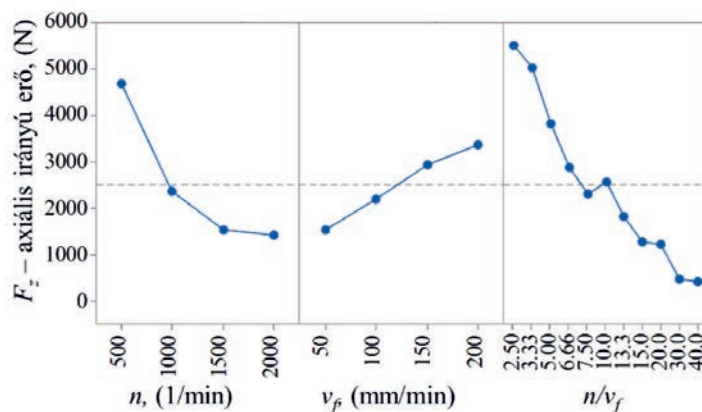
3.3. Kötési hatékonyság

A kötési hatékonyság (1) főhatás ábráit ismerteti a 9. ábra. Az ábrából megállapítható, hogy míg a fordulatszám növelése növeli, addig az előtolási sebesség emelése pedig csökkenti a JE értékét. Elmondható, hogy a dörzshegesztésre jellemző n/v_f viszonzyszám növekedése a kötési hatékonyság javulását vonja maga után a vizsgált paraméter tartományban.

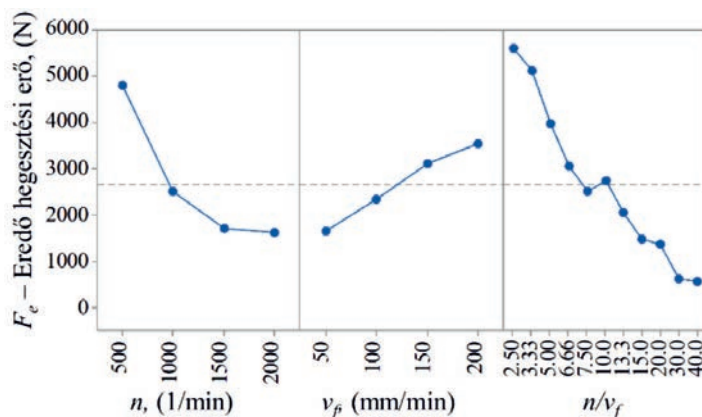
4. Összefoglalás

Az alábbi cikkben 4 mm vastag polipropilén lemezek dörzshegesztési vizsgálatát széles paramétertartományon ($n = 500 \dots 2000$ 1/min; $v_f = 50 \dots 200$ m/min) 16 mérési pontban végeztük el forgóvállas szerszámmal. A kísérletek kiértékelésekor elemeztük a hegesztési paraméterek hatását a dörzshegesztéskor fellépő erőkomponensekre, valamint a hegesztett darabokból kimunkált szakítópróbatestek eredményeiből megállapítottuk a kötési hatékonyságot. A vizsgálataink alapján az alábbi következtetések vonhatóak le:

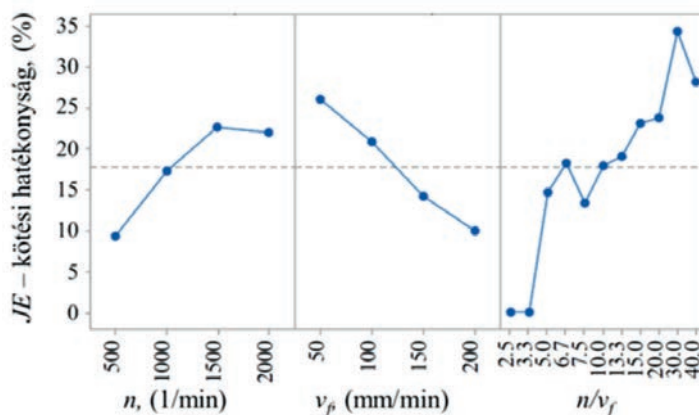
- A hegesztés során fellépő erőkomponensek közül az axiális irányú erő komponens (F_z) a domináns.



7. ábra Hegesztési paraméterek hatása az axiális irányú (F_z) erőre



8. ábra Hegesztési paraméterek hatása az eredő (F_e) erőre



9. ábra Hegesztési paraméterek hatása a kötési hatékonyság eredményei

- A szerszám fordulatszámának növelésével a hegesztés során fellépő axiális irányú (F_z), és ebből adódóan az eredő erők (F_e) értékei csökkennek, míg az előtolási sebesség növelésével növekednek.
- A fordulatszám és előtolási sebesség n/v_f arányának növelésével az F_z axiális irányú erő, és az F_e eredő erő csökkenő tendenciát mutatnak.
- Az erőregisztrátumok alakulásából következtetni lehet a hegesztési varrat minőségére, valamint esztétikai megjelenésére. Az erőképpen történő hirtelen változás

hegesztési hibára hívhatja fel a figyelmet.

- A vizsgált paramétertartományban a JE kötési hatékonyság a fordulatszám növelésével növekedett, míg az előtolási sebesség növekedésével csökkent. A legjobb kötési hatékonyság, és a legkisebb eredő erő a magas n/v_f értéknél található.
- A vizsgálatok során a legjobb kötési hatékonyságot $n=1000$, 1/min fordulatszámon és $v_f=50$ mm/min előtolási sebességen sikerült elérni, ekkor a kötési hatékonyság 34% (9,91 MPa) volt.

Köszönetnyilvánítás

A cikk a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

Irodalomjegyzék

- [1] Thomas, W. M., E. D. Nicholas, J. C. Needhan, M. G. Murch, P. Temple-Smith, C. J. Dawes. "International patent application PCT/GB92/02203 and GB patent application 9125978.8.", UK Patent Office, London 6, 1991.
- [2] Oyedemi, K., McGrath, P., Lombard, H., Varbai, B. "A Comparative Study of Tool-Pin Profile on Process Response of Friction Stir Welding of AA6082-T6 Aluminium Alloy", *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 61(4), pp. 296–302, 2017. <https://doi.org/10.3311/PPme.11149>
- [3] Kovács, Zs., and Hareancz F. "Joining of non-weldable AA7075 and weldable AA6082 aluminium alloy sheets by friction stir welding", In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 448, no. 1, p. 012001. IOP Publishing, 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012001>
- [4] Janeczek, A., Tomków, J., Fydrych, D. "The influence of tool shape and process parameters on the mechanical properties of AW-3004 aluminium alloy friction stir welded joints", *Materials*, 14(12), 3244, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14123244>
- [5] Srujan Manohar, M. V. N., Mahadevan, K. "Multi-attribute Optimization of Weld Parameters for Micro-friction Stir Welded Al6061/SS304 Sheets Using TOPSIS Approach", *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 66(4), pp. 282–288, 2022. <https://doi.org/10.3311/PPme.17766>
- [6] Nelson, T. W., Sorenson, C. D., Johns, C. J. "Friction stir welding of polymeric materials", U.S. Patent 6,811,632, 2004.
- [7] Mokhena, T. C., Sadiku, E. R., Mochane, M. J., Ray, S. S. "Mechanical properties of fire retardant wood-plastic composites: A review." *Express Polymer Letters*, 15(8), 744-780, 2021. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2021.61>
- [8] Kiss, Z., Temesi, T., Bitay, E., Bárány, T., Czigány, T. "Ultrasonic welding of all-polypropylene composites", *Journal of Applied Polymer Science*, 137(24), p.48799, 2020. <https://doi.org/10.1002/app.48799>
- [9] Gonçalves, L. F., Duarte, F. M., Martins, C. I., Paiva, M. C. "Laser welding of thermoplastics: An overview on lasers, materials, processes and quality", *Infrared Physics & Technology*, 119, 103931, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103931>
- [10] Marcisz, B., Czigan, T. "Interrelationships between welding parameters of hot-gas welded polypropylene", *Polymer Engineering & Science*, 46(9), pp.1173-1181, 2006. <https://doi.org/10.1002/pen.20570>
- [11] Jeantet, L., Regazzi, A., Taguet, A., Pucci, M. F., Caro, A., Quantin, J. "Biopolymer blends for mechanical property gradient 3D printed parts", *Express Polymer Letters*, 15(2), 137-152, 2021. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2021.13>
- [12] Montanheiro, T. L. d. A., Schatkoski, V. M., de Menezes, B., Rossi Canuto, Pereira, R. M., Ribas, R. G., De Sousa, A., ... Thim, G. P. "Recent progress on polymer scaffolds production: Methods, main results, advantages and disadvantages" *Express Polymer Letters*, 16(2), 197-219, 2022. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2022.16>
- [13] Lambiasi, F., Derazkola, H. A., Simchi, A. "Friction stir welding and friction spot stir welding processes of polymers—state of the art", *Materials*, 13(10), 2291, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13102291>
- [14] Gibson, B. T. et al "Friction stir welding: Process, automation, and control", *Journal of Manufacturing Processes*, 16(1), pp.56-73, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.04.002>
- [15] Czigány, T., and Z. Kiss. "Friction stir welding of fiber reinforced polymer composites", In *Proceedings of the 18th International Conference on Composite Materials*, pp. 21-26. Jeju, South Korea: ICCM, 2011.
- [16] Vendan, S. A., Natesh, M., Garg, A., Gao, L. "Polymer welding techniques and its evolution", In *Confluence of Multidisciplinary Sciences for Polymer Joining*, pp. 11-71. Springer, Singapore, 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0626-6_2
- [17] Hajideh, M. R., Farahani, M., Alavi, S. A. D., Ramezani, N. M. "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, pp.269-279, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.018>
- [18] Sahu, S. K. et al. "Friction stir welding of polypropylene sheet", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(2), pp.245-254, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.03.002>
- [19] Kordestani, F., Ashenai Ghasemi, F., Arab, N.B.M. "Effect of pin geometry on the mechanical strength of friction-stir-welded polypropylene composite plates", *Mechanics of Composite Materials*, 53(4), pp.525-532, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11029-017-9682-8>
- [20] Nath, R. K., Maji, P., Barma, J. D. "Development of a Self-Heated Friction Stir Welding tool for welding of polypropylene sheets", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(12), pp.1-13, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-2059-2>
- [21] Moomchani, A., Omidvar, H., Ghaffarian, S. R., Goushegir, S. M. "Friction stir welding of thermoplastics with a new heat-assisted tool design: mechanical properties and microstructure", *Welding in the World*, 63(1), pp.181-190, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40194-018-00677-x>
- [22] 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, pp.445-454, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.03.010>
- [23] Hamza, A. A., Jalal, S. R. "A review on manufacturing the polymer composites by friction stir processing", *European Polymer Journal*, p.111495, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2022.111495>
- [24] Eslami, S., Mourão, L., Viriato, N., Tavares, P. J., Moreira, P. M. G. P. "Multi-axis force measurements of polymer friction stir welding", *Journal of Materials Processing Technology*, 256, pp.51-56, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.01.044>
- [25] Pereira, M. A., Amaro, A. M., Reis, P. N., Loureiro, A. "Effect of Friction Stir Welding techniques and parameters on polymers joint efficiency—A critical review", *Polymers*, 13(13), p.2056, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13132056>
- [26] KISTLER Multicomponent Dynamometer 9257b datasheet, 2009, Kistler Group
- [27] Payganeh, G. H., Arab, N. M., Asl, Y. D., Ghaseemi, F. A., Boroujeni, M. S. "Effects of friction stir welding process parameters on appearance and strength of polypropylene composite welds", *Int. J. Phys. Sci.*, 6(19), pp.4595-4601, 2011.
- [28] Panneerselvam, K., Lenin, K. "Effects and defects of the polypropylene plate for different parameters in friction stir welding process", *Taper*, 40, p.1500, 2013.
- [29] Jaiganesh, V., Maruthu, B., Gopinath, E. "Optimization of process parameters on friction stir welding of high density polypropylene plate", *Procedia Engineering*, 97, pp.1957-1965, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.350>
- [30] Mirabzadeh, R., Parvaneh, V., & Ehsani, A. "Experimental and numerical investigation of the generated heat in polypropylene sheet joints using friction stir welding (FSW)", *International Journal of Material Forming*, 14(5), pp.1067-1083, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12289-021-01622-y>