

Acéllemez kavaráó dörzshegesztése

* Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar,
Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék
H-6000 Kecskemét, Magyarország
kovacs.zsolt@nje.hu

Összefoglalás

A napjainkban használatos fémek mechanikai és fizikai tulajdonságai egyre jobbak, így téve lehetővé a legextremebb körülmények közötti alkalmazhatóságukat. Az anyagminőségek fejlődésével a kötéstechológiák is fejlődésnek indultak, melyek közül talán a hegesztéstechológiában figyelhetők meg a legnagyobb változások. E cikkben egy viszonylag új eljárás a kavaráó dörzshegesztés kerül bemutatásra acéllemez hegesztésénél. A kavaráó dörzshegesztő eljárást alumínium lemezek hegesztésére fejlesztették ki, de megfelelő szerszámmal az acél is hegeszthető vele. A cikkben S355-ös acéllemez hegesztésére alkalmas szerszám fejlesztése kerül bemutatásra kísérleti körülmények között. Kétféle anyagminőségű szerszámváll vizsgálatával (alumínium-oxid kerámia és keményfém) bizonyosságot nyert, hogy a szerszám nem lehet túl rideg, így a kerámiák nem alkalmasak kavaráó dörzshegesztés szerszámanyagaként. A keményfém jó eredménnyel használható, így tudományos szempontból annak geometriai és technológiai optimalizációja javasolt.

Kulcsszavak: kavaráó dörzshegesztés; acél; kerámia; keményfém; optimalizáció

Abstract

Nowadays, the mechanical and physical properties of the metals are getting better and better which enables their usability in the most extreme conditions. With the development of materials, the joining technologies also began to develop, of which perhaps the biggest changes can be observed in the welding technologies. In this article, a relatively new process, the friction stir welding is presented with the welding of steel sheets. The friction stir welding process was developed for welding of aluminum sheets, but with the right tool it can also be used for steels. This article presents the development of a tool which suitable for welding S355 steel sheets by experimental. By the examination of two types of tool shoulder's materials (aluminum-oxide ceramic and carbide) can be stated that the tool must not be too brittle, so the ceramic as tool material is not suitable for friction stir welding. Carbide can be used with good results, so from a scientific point of view, its geometric and technological optimization is recommended.

Key words: friction stir welding; steel; ceramic; carbide; optimization

1. Bevezetés

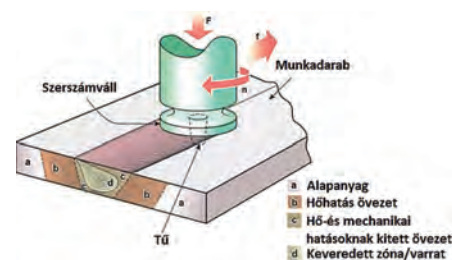
A fémmegmunkálás ősi, 7-8 ezer évvel ezelőtt kezdődött. Az első hegesztési technikák valamikor Krisztus előtt a negyedik vagy harmadik században jelenhettek meg. A mai modern hegesztés kialakulása hosszú, lassú és fokozatos folyamat volt. [1]. Hegesztés során a kohéziós kötést úgy hozzák létre, hogy a munkadarabok egyesíteni kívánt részén egy viszonylag vékony réteget megolvasztanak. E réteget hozaganyag nélkül vagy az alap munkadarabhoz nagyon hasonló kémiai összetételű hozaganyag megolvasztásával kapcsolják össze [2]. Nagy hőmérséklet többféle módszerrel elérhető, akár

pl. súrlódással is. A súrlódás önmagában még nem elegendő így, ha a felhevített fémeket még folyamatosan meghatározott erővel össze is nyomják megvalósul a hegesztett kötés. A dörzshegesztő eljárást körülbelül 130 évvel ezelőtt használhattak először, de csak az 1950-es években szabadalmaztatták [3]. A dörzshegesztés számos változatát fejlesztették ki az elmúlt évtizedek során [2]:

- forgómozgású dörzshegesztés,
- forgó gyűrűs dörzshegesztés,
- felrakó dörzshegesztés,
- rezgő dörzshegesztés,
- orbitális dörzshegesztés.

Az Angliában található A Hegesztési Intézetben (The Welding Institute,

TWI) 1991-ben kifejlesztettek egy új dörzshegesztési eljárást, amely a "friction stir welding, FSW" nevet kapta. Magyar neve az ISO 4063 [4] szabvány alapján kavaráó dörzshegesztés, nemzetközi kódjele a 43-as. Az eljárást egy 1995 novemberében publikált angol szabadalom rögzíti [5], sematikus elrendezése az **1. ábrán** látható.



1. ábra: A FSW elvi ábrája [6]

A FSW, létrehozásakor a cél egy olyan eljárás kifejlesztése volt, mellyel nagyszilárdságú alumínium lemezeket tudnak hegeszteni az ívhegesztésnél tapasztalt káros hatásoktól (pl. kilágyulás, vetemedés, ívfény, mérgező gázok) mentesen. A végeredmény egy olyan eljárás lett, melyet megjelenése után rövidesen már az iparban is használták, mivel más eljárásokkal nehezen vagy nem (vagy csak fenntartásokkal) hegeszthető anyagok és anyaggpárok hegesztését is lehetővé teszi, így akár alumíniumot rézzel vagy acéllal is össze lehet vele hegeszteni.

Manapság már széles körben alkalmazzák, elsősorban az űrtechnika, repülés, hajózás és autógyártás iparágaiban. Ezen iparágakban közös, hogy nagyon fontos az alkatrészek kis tömege, ezért előszeretettel alkalmaznak nagyszilárdságú ötvözött alumínium szerkezeti elemeket, melyek hegesztése az új eljárás megjelenésével sokkal megbízhatóbbá vált [7-9].

Az eljárás szilárd halmazállapotban lévő anyagok összekapcsolására szolgál, mely során a súrlódási hő egy különálló, a hegeszteni kívánt anyagoknál keményebb szerszám állítja elő, mely behatol a hegeszteni kívánt alkatrészekbe.

A szerszám forgó mozgás közben belép a hegeszteni kívánt munkadarabokba, válla felütközik a felszínükön, majd, amikor elérte a kellő hőmérsékletet és az anyagok meglágyultak a kapcsolódó felületek közelében, a forgó mozgást fenntartva lineáris mozgásba kezd a tompaillesztés mentén. A meglágyult anyag a két mozgás együttes hatására a szerszám mögé áramlik, ahol összekeveredve kötést alkot a munkadarabok között [7].

Kavaró dörzshegesztés során a szerszám felel a hőtermelésért és a kavaró hatásért, ezáltal pedig a kialakult varrat minőségéért is. A szerszámnak két fontos része van, a

tű és váll. A szerszám készülhet egy darabból, vagy cserélhető túvel több elemből [10].

A szerszámváll geometriája és mérete nagyon fontos, mivel a munkadarab és a váll közti súrlódás teszi ki a hegesztés során termelődő hő nagyobb részét, a szerszám alatt tartja az anyagot és javítja az anyagáramlást is, így váll nélküli szerszámmal a hegesztés nem is lenne kivitelezhető. A szerszámváll átmérőjének növelésével nő a varrat szélessége és a hegesztés hőmérséklete. Az optimum érték elérése utáni további növelés túlzott hőbevitelt okoz, ami a hőhatásövezet növekedéséhez vezet. Az ideális átmérő egyaránt függ a hegeszteni kívánt anyagminőségektől, azok vastagságától, illetve a hegesztés paramétereitől. A tű átmérője alumínium ötvözetek esetén általában a lemeztvastagsággal megegyező, míg a váll átmérője a tű átmérőjének 2,5...3 szoros, azonban nagyobb olvadási hőmérsékletű anyagoknál indokolt lehet a további növelése [11, 12].

A szerszám körüli anyagáramlást legnagyobb mértékben a tű profilja befolyásolja. A legalapvetőbb a hengeres tű, amivel sok esetben kiváló varratot lehet készíteni, azonban a jobb mechanikai tulajdonságok iránti igény miatt egyre több alakkal kísérleteznek. A szerszámon alkalmazott menetek és hornyok csökkentik a hegesztéshez szükséges előtoló erőt, javítják az anyagáramlást a tű körül, megnövelik a tű és a munkadarab közti érintkező felületet, ezzel pedig növelve a súrlódáshőt. Ennek köszönhetően elősegítik az anyagáramlást, szemcsefinomodást és javítják a homogén keveredést a varratban. A menetes/profilos tűk hatásfokuk kiemelkedő, viszont a szerszámra ható terhelés hatására a hornyok és menetek gyorsabban kopnak, így a szerszám élettartama rövidebb. A szerszámon található menet nem mindig kedvező; hengeres menetes csap esetén a varrat

minősége ugyan jobb, mint a sima hengeresé, mert az anyagáramlás intenzívebb, viszont a varrat túlzottan elvékonyodhat. A hengeres menetes tűhöz hasonló varratot készít egy sima kúpos tű is, aminek előnye, hogy élettartama hosszabb, előállítása olcsóbb és a két tű által előállított varratok közti mechanikai különbségek nem számottevőek [13].

Kavaró dörzshegesztés során számos paraméterrel kell számolnunk (**1. táblázat**), melyek közvetve vagy közvetlenül befolyásolják a hegesztés minőségét. Az egyes paraméterek tanulmányozását általában a varrat statikus mechanikai tulajdonságaira, kifáradására, korróziós tulajdonságaira, szívóosságára és feszültség-korróziós repedésképződésére gyakorolt hatása alapján végzik, a kitűzött cél pedig a produktivitás, a minőség és a reprodukálhatóság maximalizálása. Ezeket a szempontokat legjelentősebben a hegesztés során fellépő hőfejlődés és disszipáció befolyásolja, ezért a hangsúly általában az egyes paraméterek hőfejlődésre gyakorolt hatásán és annak kimenetelén van. Viszont szokták vizsgálni a paraméterek anyagáramlásra, hibaképződésre, a folyamat során fellépő erőkre és a varratban kialakult szemcseméretre gyakorolt hatását is, mivel ezek mind összefüggésben állnak egymással [14, 15].

A FSW szerszám szokásos fordulatszámának értéke acél esetében 800...1600 1/min között, míg az előtolás 40...120 mm/min között változik [15].

Folyamat változók	Szerszámkialakítás	Egyéb
Előtoló sebesség	Szerszám anyag	Készülék anyaga, mérete
Fordulatszám	Szerszámváll átmérő	
Tengely irányú erő	Tű átmérő és hossz	Munkadarab anyaga, mérete
Szerszám dőlésszöge	Tű geometriája	

1. táblázat: Az FSW technológiai változói [15]

A kavaró dörzshegesztés első rá-nézésre egyszerű eljárásnak tűnhet, de valójában igen komplikált, s a paraméterek hatásának kapcsolata gyakran ellentmondásos eredményeket szül. Látszólag lényegtelen paraméterek és környezeti hatások befolyásolhatják a hőfejlődést és hőelvezetést, ami a varrat minőségének romlását eredményezheti. Erre jó példa a hegesztett darabok befo-gására használt készülék mérete és anyaga, amely befolyásolja a munkadarabok melegedésének mértékét, ezzel pedig a hegesztés során fellépő erőket is. Ezek a paraméterek közti kölcsönhatások jelentősen megnehezítik az egyes változók a hőfejlődésre kifejtett hatásának vizsgálatát és megismerését. Ebből kifolyólag a kavaró dörzshegesztés során rendkívül körültekintően kell eljárni, ha a folyamaton bármilyen változtatást akarunk eszközölni, legyen szó akár csak a készülék lecseréléséről [10].

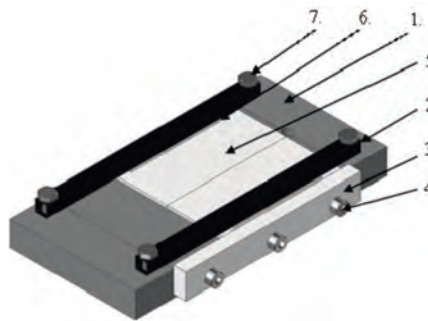
2. A kísérlet módszertana

Acél hegesztéséhez olyan szerszámra van szükség, amelynél a tű és a szerszámváll képes elviselni a keletkezett nagy hőmérsékletet, így nagyon fontos a szerszám részeinek megfelelően megválasztott anyagminősége, melyekről e fejezetben lehet olvasni.

2.1. Kísérlethez felhasznált eszközök és anyagminőség

A FSW eljáráshoz ideális esetben egy speciálisan a célra kifejlesztett gépet használnak, mely sajnálatos módon jelen tudományos munka során nem állt rendelkezésre. Mivel az FSW eljáráshoz használt berendezés kinetikája nagyon hasonlít a marógépekéhez, ezért egy a célnak megfelelően átalakított STANKOIMPORT SSSR 252 egytetemes marógépen kerültek elvégzésre a kísérletek. A marógép kiválasztásakor elsődleges szempont, hogy kellően merev legyen a váza és a főorsója.

A próbadarabok rögzítése egy célra készült hegesztőkészülékben történt, ami a biztonságosan rögzítette a lemezeket (2. ábra).



2. ábra: Hegesztőkészülék FSW eljáráshoz
1. alaptest; 2. leszorító-zártszelvény;
3. ütköző; 4. M6 belső kulcsnyílású csavar;
5. munkadarabok; 6. alátét;
7. hatlapfejű csavar

Mivel a kavaró dörzshegesztés elsősorban lágy fémek hegesztésére lett kifejlesztve és a rendelkezésre álló berendezések sem e célra lettek kifejlesztve, ezért a jelen kísérletben felhasznált acél kiválasztásánál szempont volt, lágyabb acél, mely mégis elterjedt anyagminőségű legyen, így került a választás az S355JR melegen hengerelt szerkezeti acélra.

Acélok hegesztése során fellépő nagyobb erők (alumíniumhoz képest) és a kísérletekhez használt marógép szerkezetét/merevségét is figyelembe véve a kísérletekhez választott lemezek 3 mm-es vastagságúak.

2.2. Kísérlethez felhasznált szerszámok

A FSW-hez használatos szerszám geometriáját és dimenzióit tapasztalati ajánlások alapján lehet meghatározni. Az iparban használatos tűk átmérője alumínium ötvözetek esetén általában a lemezvastagsággal megegyező, míg hossza a lemezvastagság 80-90%-a. E méretezési módszer a hengeres tűk esetében használatos,

más geometriák esetében gyártói ajánlásokat kell figyelembe venni [4]. Mivel a szerszámok a kísérletekhez házon belül készülnek, ezért a gyárthatóság figyelembevételével, csak hengeres szerszámok kerülnek tesztelésre.

A szerszám másik fontos része a szerszámváll, mely esetében annak átmérője és homlokfelülete a meghatározó. A szerszámváll átmérőjének növelésével nő a varrat szélessége és a hegesztés maximális hőmérséklete. Az optimum érték (800...900 °C) elérése utáni további növelés túlzott hőbevitelt okoz, ezzel rontva a varrat minőségén. Az iparban használatos szerszámvállak átmérője alumínium ötvözetek esetén általában a tű átmérőjének 2,5...3 szorosa, azonban nagyobb olvadási hőmérsékletű anyagoknál a növelése indokolt lehet [4].

Jelen kísérletek során a 3 mm-es lemezvastagsághoz a tű átmérőjének 3 mm-esnek kellene lennie alumínium esetében, de mivel az acél esetében vastagabb tűket használnak, így a választott tűátmérő 4 mm, míg a tű hosszúsága 2,8 mm. A szerszámváll átmérőjének meghatározásakor az alumíniumhegesztéssel ellentétben az acélnál szükséges nagyobb hőtermelés, ezért a vállátmérő 20 mm-es, ami a tű átmérőjének ötszöröse.

Az acélok hegesztéséhez nagyobb mechanikai terhelést és hőmérsékletet elbíró szerszámnyagra van szükség, ezért az alumíniumnál használatos szerszám- vagy gyorsacél helyett a tű anyaga keményfém. A szerszámvállnál a kerületi sebességéből adódóan a súrlódás nagyobb hőmérsékletet hoz létre, így itt keményfém mellett kerámia is tesztelésre került. A kísérletekhez felhasznált keményfémek a marásnál

Anyagminőség	Mn (%)	C (%)	P (%)	S (%)	R _{eh} (MPa)	R _m (MPa)	A ₅ %
S355	≤1.70	≤0,27	≤0.045	≤0.045	355≤	450-680	22

2. táblázat: S355JR kémiai összetétele és mechanikai tulajdonságai [MSZ EN 10025-2]

használatos ujjmarókból készültek, így pontos anyagösszetételük nem ismert (a gyártók titkosan kezelik), a szerszámokon szereplő információk alapján wolframkarbid alapú, két-karbidos keményfémek.

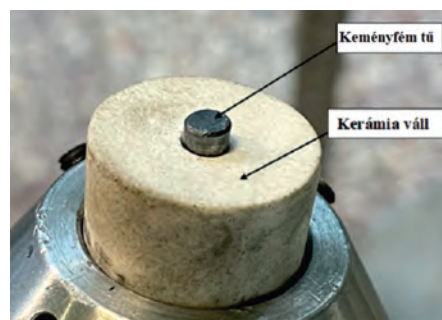
A) Kerámia szerszámváll

Az iparban számos kerámia típust használnak, melyek közül a legelterjedtebben az alumínium-oxid kerámia. E kerámiát a kívánt formára préselik, majd nagy hőmérsékleten kiégetik. A kísérlethez használt FSW szerszámváll 92% Al_2O_3 tartalmú kerámiából készült, melynek tulajdonságait a **3. táblázat** tartalmazza. A vállként funkcionáló kerámia pogácsa egy szerszámtestbe került befogásra, mely a keményfém tüt is biztosítja az elmozdulások ellen. A FSW szerszám összeállított állapotban a **3. ábrán** látható.

Tisztaság (%)	95
Sűrűség (g/cm ³)	3,65
Vízelnyelés (%)	0
HV keménység ()	>1300
Hajlítószilárdság 25°C-on (MPa)	300
Nyomószilárdság 25°C-on (MPa)	2200
Hőtágulási együttható 1000°C-on (10 ⁻⁶ mm/°C)	8
Max. Üzemhőmérséklet (°C)	1500

3. táblázat: 92%-os Al_2O_3 szerszámváll adatai

A műszaki kerámiák esetében egyes szilárdsági értékeik (keménység) nagyobbak az acélokénál és e jó tulajdonságokat általában nagy hőmérsékleten is képesek megtartani.



3. ábra: Alumínium-oxid kerámia vállal és keményfém tűvel rendelkező FSW szerszám

Az állandó $n=1000 \text{ min}^{-1}$ és $v_f=35 \text{ mm/min}$ technológiai para-

méterek mellett történt kerámia vállal végzett próbahegesztés során a négyszer megismételt kísérletek mindegyike esetében a kerámia el-törött. A tű elkezdte megolvasztani a lemezeket, majd a váll is, de amint elindul az előtolás a kerámia váll széttört. A törést kiváltó ok valószínűleg a kerámia ridegségéből és porózus felületéből adódik. Így kijelenthető, hogy jelen technológiai körülmények mellett a kerámia nem alkalmas FSW-hez.

B) Keményfém szerszámváll

A kerámia vállal végzett hegesztések során bebizonyosodott, hogy az acél hegesztésekor a szerszám gép merevsége rendkívül fontos, mivel a szerszámra ható dinamikus erők ki-mozdíthatják a tüt a vállból, ezért a keményfém-ből készült szerszám már nem szerelhető formában készült, hanem monolitiként. A szerszám kimozdulására nagy hatással van a vállátmérő, mert minél nagyobb az átmérője, annál nagyobb erőkar-ként működik, ezért az Ø20 mm-ről Ø16 mm-re került lecsökkentésre.

Sorszám	Faktorok		
	Fordulat-szám, n (1/min)	Előtolás, v_f (mm/min)	Szerszám-bedöntés, α (°)
1.	1000	35	0
2.	1000	55	0
3.	1000	65	0
4.	1000	85	0
5.	1400	35	0
6.	1400	55	0
7.	1400	65	0
8.	1400	85	0
9.	1000	35	1
10.	1000	55	1
11.	1000	65	1
12.	1000	85	1
13.	1400	35	1
14.	1400	55	1
15.	1400	65	1
16.	1400	85	1

4. táblázat: Technológiai paraméterek monolit keményfém szerszám esetében

A keményfém szerszám nagy beszerzési ára melletti hátránya, hogy könnyen törik és bonyolult és költséges a gyártása, viszont az alkalmazási lehetőségei e nehézségeket kompenzálják.

A kísérletek kiértékelésének megkönnyítése érdekében egy kísérlet-terv mátrix készült, mely értékeit a **4. táblázat** tartalmaz. A kísérlet-terv három szintből áll (fordulatszám - n ; előtolás - f ; szerszámbedöntés - α). A fordulatszám értékek meghatározása irodalomkutatás alapján történt.

A 0°-os szerszámbedöntés esetében a szerszám szimmetriatengelye merőleges a próbadarabok felszínére, míg az 1°-os bedöntési iránya az előtolás irányával ellentétes ellentétes, így a munkadarab felületétől elemelkedett rész halad elől.

Minden egyes kísérletnél a hegesztés folyamata az alábbiak szerint történt:

1. Tű forgástengelyének és a lemezek tompaillesztésének egy síkba állítása.
2. Behatolás forgó tűvel az anyagba a szerszám tengely irányában a lemez szélétől 5 mm-re.
3. A behatolás egészen a szerszám-vállig történik, ennek értéke 2,8 mm.
4. A szerszámváll felfekvését követően 20 másodpercig előhevítés történik.
5. Előtolás beindítása.
6. Előtolás leállítása és
7. a szerszám kiemelése.

3. Kiértékelés

A FSW eljárással készült varratok szemrevételezéssel, szakítással, majd metallográfiai vizsgálattal kerültek kiértékelésre. Az eredmények kiértékelései e fejezetben kerülnek ismertetésre.

A) Szemrevételezés

A kísérlet-terv (**4. táblázat**) alapján elvégzett hegesztéseket követően szemrevételezéssel, még a hegesztőkészülékben, megállapítható volt, hogy a

0°-ban bedöntött szerszámmal készült varratok nem megfelelőek. A bedöntés hiányában mindegyik varrat esetében a koronaoldalán megfigyelhető egy árok (pirossal bekarikázva), mely a tű haladása mellett 2 mm-re keletkezett (**4. ábra**). Ennek oka, hogy az anyag nem tudott megfelelően keveredni. Ezen eredmény alapján a továbbiakban nem kerülnek vizsgálatra a 0°-os bedöntéssel készült varratok.



4. ábra: Hibás FSW-ett varrat (5. számú)

Szemrevételezéssel az is megállapítható, hogy az 1°-al bedöntött, de csak 1000 1/min-el forgó szerszámmal készült varratok szintén hibásak (nem jött létre kötés).

Ennek okán, a végső kiértékelésben csak a 13-16-os sorszámú mintákon történtek további vizsgálatok. A kiértékelésre alkalmas mintadarabok esetében megjegyzendő, hogy már a hegesztés első pár centiméterén látszódtott, hogy a kötés szemrevételezéssel meg fog felelni (**5. ábra**).

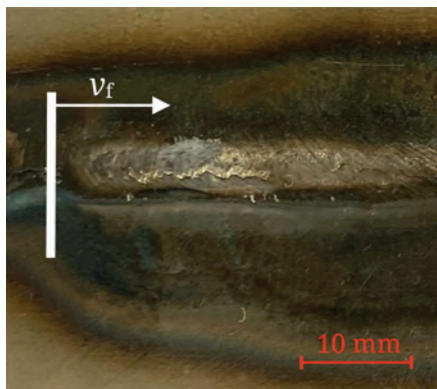


5. ábra: Bedöntött szerszámmal és 1400 1/min-es fordulatszámmal végzett kavarási dörzshegesztés folyamata

A 16. számú minta gyökoldaláról készült fényképét a **6. ábra** tartalmazza. A gyökoldal a hegesztőt készülővel érintkezik, így a felületi érdessége attól függ, illetve minden esetben egy síkban van a lemezzel.

B) Szakító vizsgálat

A szakító vizsgálat előkészítéséhez a próbadarabok 10 mm széles próbatestekre lettek feldarabolva, melyek



6. ábra: 16. számú FSW-ett minta gyökoldali képe (a hegesztés balról jobbra történt a függőleges vonaltól kezdve)

Instron 4482 típusú szakítógépben lettek elszakítva. A szakítószilárdságok értékeit az **5. táblázat** tartalmazza, mind a négy minta a varrattól távol a hőhatásövezeten kívül, azaz az alapanyagban szakadtak el (**7. ábra**), ezért kijelenthető, hogy a varratok szilárdsági szempontból megfelelőek.

Minta sorszama	Maximális terhelés (N)	Megnyúlás (mm)	Szakítószilárdság, R_m (MPa)
13.	6659	12	333
14.	6499	12	325
15.	6386	12	319
16.	6303	12	315

5. táblázat: Hegesztés utáni mechanikai tulajdonságok



7. ábra: Elszakított FSW-ett 13. 14. 15. és 16. minták

C) Metallográfiai vizsgálat

A szövetszerkezeti vizsgálatokhoz a mintadarabok keresztmetszeti csiszolatai P600-as, P800-as, majd P1000-es csiszolópapírral kerültek csiszolásra, majd ezt követően polírozásra. A polírozást követően 2%-os Nitál oldattal lettek megmarattatva. Mindegyik mikroszkópi képen a ball oldali rész az előre oldal és a jobb oldali rész a hátra oldal.

Az 13. számú varratmintán jól látható, hogy a varrat minősége nem kifogástalan, mivel azon egy körülbelül 0,2 mm-es alagúthiba található (**8. ábra**).

A 14. és 15. számú mintákon teraszos repedés látható, mely a korona- és gyökoldal között helyezkedik el és szélessége ~3 mm (**9. ábra**).

A szakítóvizsgálatok során a varratminták jó eredménnyel rendelkeztek, de az ilyen hibák feszültséggyűjtő helyek, így hosszútávú igénybevétel során kifáradáshoz, majd tönkremenetelhez vezethetnek. Az alagúthiba és a teraszos repedés létrejötté az lassú? előtolásnak tulajdonítható, ugyanis minél alacsonyabb az előtolás annál nagyobb több anyagot nyom ki a szerszám maga körül, mely ilyen anyaghiányossággal járó hibákhoz vezet.

A 16. minta mikroszkópi képén már nem lehet felfedezni semmilyen jellegzetes hibát (**10. ábra**). E varrat így megfelel.



8. ábra: 13. számú FSW-ett minta mikroszkópi képe alagúthibával a varratban



9. ábra: 15. számú FSW-ett minta mikroszkópi képén látható anyagáramlási hiba a varratban



10. ábra: 16. számú FSW-ett minta mikroszkópi képe

Mindegyik varrat esetében finomszemcsés szövetszerkezet alakult ki a keveredési zónában (varratban).

4. Összegzés

Kutatás során kapott eredmények alapján az alábbi megállapítások tehetőek 3 mm-es S355-ös lemezek hegesztése esetében:

- acélok hegesztéséhez az alumínium-oxid kerámia, mint szerszám-vállanyag nem megfelelő ridegségéből adódóan,
- hengeres kialakítású túgeometria alkalmas acélok kavarási dörzshegesztéséhez,
- a szerszám 1...3°-os bedöntése indokolt,
- az Ø4 mm-es tű esetében az 1400 1/min-es fordulatszámnál kisebb érték használata nem javasolt (tű kerületi sebessége: $v_{min} = 18$ m/min) és
- az előtolás értéke 85 mm/min-nél legyen nagyobb.

A kapott eredmények alapján kijelenthető, hogy az acél hegesztéséhez a kavarási dörzshegesztés már egyszerű körülmények mellett is alkalmas. Figyelembe véve, hogy a berendezés üzemeltetése nem igényel komolyabb szakértelmet (akár automatizálható is) és semmilyen segédanyagot, így a mai modern ipar számára számos potenciált tartalmaz. Mivel a hegesztés során nem keletkeznek mérgező gőzök, gázok és sugarak a teljes eljárást környezetbarátnak lehet tekinteni, hiszen csak elektromos igénye van, mely zöldenergiával előállítható. A FSW eljárásához használatos szerszámok élettartama a folyamatosan fejlődő kohászatnak köszönhetően egyre hosszabb, míg a beszerzési ára egyre kedvezőbb. Az eljárás negatívumaként a szükséges berendezés és készülékek nagy beszerzési költsége hozhatóak fel és ezért relatíve limitált a hegeszthető geometria és kö-

tés kialakítás. Ellenben az FSW-hez szükséges eszközök és berendezések merevségükből adódóan hosszú élettartamúak.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom a Szlovák Kutatási és Fejlesztési Ügynökségnek (Slovak Research and Development Agency) a kutatás támogatásáért az APVV-18-0418 számú szerződés alapján.

Valamint köszönet illeti a pozsonyi Szlovák Műszaki Egyetem (STU) Anyagtudományi és Technológiai Kar munkatársainak önzetlen segítségét.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Welding History: A Welding Timeline <https://weldguru.com/welding-history/> (megtekintés dátuma: 2023. 03. 20.)
- [2] Szunyogh László: Hegesztés és rokon technológiák (2007), Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest
- [3] Weld Word: History of Friction welding <https://theweldings.com/friction-welding/> (megtekintés dátuma: 2023. 03. 20.)
- [4] MSZ EN ISO 4063:2000: Hegesztés és rokon eljárások. A hegesztési eljárások megnevezése és azonosító jelölésük.
- [5] Thomas W M, Nicholas E D, Neeham J C, Murch M G, Temple-Smith P and Dawes C J (TWI): 'Improvements relating to friction welding'. European Patent Specification EP 0 615 480 B1
- [6] R. Johnson and P. L. Threadgill: Progress in Friction Stir Welding of Aluminium and Steel for Marine Applications, Paper presented at RINA Conference: Advanced Marine Materials: Technology and Applications. October 2003
- [7] B. R. Singh: A Hand Book on Friction Stir Welding, First edition. UK: LAP Lambert Academic Publishing, 2012
- [8] E. T. Akinlabi and R. M. Mahamood: Solid-State Welding: Friction and Friction Stir Welding Processes, Switzerland: Springer International Publishing, 2020.
- [9] Stephan W. Kallee, E. Dave Nicholas and Wayne M. Thomas: Friction Stir Welding - Invention, Innovation and Application, 8th International Conference on Joints in Aluminium Munich, Germany, 28-30 March 2001
- [10] D. Lohwasser and Z. Chen: Friction Stir Welding: From Basics to Applications. UK: Elsevier, 2009
- [11] K. Ramanjaneyulu, G. M. Reddy and A. V. Rao: Role of Tool Shoulder Diameter in Friction Stir Welding: An Analysis of the Temperature and Plastic Deformation of AA 2014 Aluminium Alloy, Transactions of the Indian Institute of Metals vol. 67, (2014) pp. 769-780
- [12] A. Arora, A. De and T. DebRoy: Toward optimum friction stir welding tool shoulder diameter, Scripta Materialia vol. 64, (2011) pp. 9-12
- [13] M. Ilangovan, S. R. Boopathy and V. Balasubramanian: Effect of tool pin profile on microstructure and tensile properties of friction stir welded dissimilar AA 6061-AA 5086 aluminium alloy joints, Defence Technology vol. 11, (2015) pp. 174-184
- [14] M. Vetrivel Sezhian, R. Ramadoss, K. Giridharan, G. Chakravarthi and B. Stalin: Comparative study of friction stir welding process and its variables, Materials Today Proc. vol. 33, (2020) pp. 4842-4847
- [15] Rishikesh Arun Gite, Praveen Kumar Loharkar and Rajendra Shimpi: Friction stir welding parameters and application: A review, Materials Today Proc. vol. 19, (2019) pp. 361-365