



Neumann János Egyetem
Tudományos Diákköri
Konferencia

A kavaráó dörzshegesztés szerszámának fejlesztési lehetőségei alumínium ötvözetek esetében

Development possibilities of tools of friction stir
welding for aluminium alloys

Kozák Emese
BVUXGI

Kovács Zsolt Ferenc PhD, Egyetemi docens

Jelen TDK dolgozat a 2024-2.1.1-EKÖP-2024-00008 projekt keretében jött létre.

2024

1. Köszönetnyilvánítás

Első sorban szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Kovács Zsolt Ferencnek, aki megismertette velem a kavaró dörzshegesztés technológiáját, és megalapozta a kutatás eredményességét. Szakmai elhivatottsága a tudomány felé számomra is motivációt jelent.

Köszönöm kollégáimnak Szabó Norbertnek, aki legyártotta a szerszámbefogót, és segített a hegesztés során a CNC gép kezelésében. Kónya Gábornak, aki megismertette velem a ZEISS AXIO mikroszkóp használatát, és jelen volt a hegesztések elvégzésekor. Molnár Istvánnak, aki segített a szakító próbatestek utómunkálásával. Pécsi-Kovács Péternek, aki megmutatta a spektrométer használatát. Hareancz Ferencnek, aki megmutatta a szakítógépi használatát, és hasznos tanácsokkal látott el a próbadarabok beágyazása előtt. Juhász Gergelynek, aki szintén hasznos tanácsokkal látott el az anyagvizsgálatok előkészítésekor. Borbély Richárdnak, aki megmutatta a hidegágyazás folyamatát. Gégény Ádámnak, aki megmutatta a keménységmérő használatát. Végül, de nem utolsósorban a VARINEX Kft-nek akik elkészítették a szerszámokat a számomra.

A 2024-2.1.1-EKÖP-2024-00008 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2024-2.1.1-EKÖP pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Tartalomjegyzék

1. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	1
BEVEZETÉS	3
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	5
2.1. TÖRTÉNELMI ÁTTEKINTÉS	5
2.2. FSW TECHNOLÓGIA ISMERTETÉSE.....	6
2.3. SZERSZÁMKIALAKÍTÁSOK VÁLTOZÓINAK BEMUTATÁSA	6
2.3.1. A szerszám anyagának kiválasztása	6
2.3.1. A szerszám geometriájának kialakítása.....	7
2.3.2. Szerszám váll kialakítás.....	8
2.3.3. Szerszám tű kialakítás.....	9
2.4. A FOLYAMAT VÁLTOZÓINAK BEMUTATÁSA	11
2.4.1. Alumínium és acél hegeszthetőségének fontossága, valamint a szerszám fordulatszámának és előtoló sebességének jelentősége	11
2.4.2. Tengelyirányú erő meghatározása	12
2.4.3. A szerszám dőlésszögének meghatározása	14
2.5. ANYAGVIZSGÁLATOK ÉS A FELLÉPŐ HIBÁK BEMUTATÁSA	15
2.5.1. „Lazy S” hiba	15
2.5.2. Alagúthiba.....	16
2.5.3. Anyagok keveredése	16
2.6. FELHASZNÁLT TANULMÁNYOK KIÉRTÉKELÉSE	17
3. FSW SZERSZÁM TERVEZÉSE	19
3.1. FSW SZERSZÁM TERVEZÉSÉNEK FOLYAMATA	20
3.1.1. 1-számú szerszám	21
3.1.2. 2-számú szerszám	22
3.1.3. 3-számú szerszám	22
3.1.4. 4-számú szerszám	23
3.1.5. 5-számú szerszám	23
3.2. SZERSZÁMBEFOGÓ TERVEZÉS	24
4. HEGESZTÉSI VIZSGÁLATOK PARAMÉTEREI	26
5. ANYAGVIZSGÁLAT	28
5.1. SZEMREVÉTELEZÉS	28
5.2. SZAKÍTÓVIZSGÁLAT	29
5.2.1. Szakítóvizsgálat eredményei.....	30
5.3. VARRATOK METALLOGRÁFIAI VIZSGÁLATA.....	35
5.4. KEMÉNYSÉGMÉRÉS	40
5.5. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE	41
ÖSSZEFOGLALÁS	42
SUMMARY	43
ÁBRAJEGYZÉK	44
IRODALOMJEGYZÉK	46
MELLÉKLETEK.....	1

Bevezetés

A kavaro dörzshegesztés, a hegesztési technológiák között egy új, még kevésbé kiaknázott terület, mely sokoldalú alkalmazása mellett, energiatakarékos, és környezetbarát lehetőségeket is kínál. A technológia fejlesztése leginkább a hagyományos olvadásos hegesztéssel nehezen hegeszthető fémek, mint például az alumínium ötvözetek hegesztését teszi lehetővé. Kedvező tulajdonságai miatt, az alumínium és ötvözetekre az elmúlt években jelentősen megnövekedett a kereslet, mivel mechanikai tulajdonságai közel azonosak a hagyományos szerkezeti acélokéhoz, viszont tömegük megközelítőleg azok egyharmada. A felsorolt tényezők kihasználásával jelentős gazdasági és technológiai fejlődésre lehet szert tenni, így a dörzshegesztés technológiájának fejlesztése manapság kulcsfontosságú feladattá vált.

A kavaro dörzshegesztés (angolul: Friction stir welding, FSW), egy szilárdtest-hegesztési eljárás, mely során az alapanyagok megolvadása nélkül hozhatunk létre kötést. [1] A forgó kopásálló szerszám és a munkadarabok között fellépő súrlódási hőmérséklet lágyítja a munkadarabokat, anélkül, hogy elérné az olvadáspontot, majd az anyagok hűlése során szilárd fázisú kötés jön létre. A hegesztéshez egy kopásálló anyagból gyártott szerszámot alkalmaznak, melynek geometriája egy váll, és egy tű részből tevődik össze. [2]

Az empirikus megállapításokat, manapság, véges elemes szimuláció útján megbecsült eredmények és információk előzik meg. Mindenképpen érdemes a valóságos és a szimulált eredmények összevetése, hiszen a párhuzamok mellett, sokszor olyan problémákkal is találkozunk a valóságban, melyek ideális szimulált környezetben nem merülnek fel. Az összevetés további szerepe még a szimulációs eredmények validálása, mely lépés olyan szimulációs vizsgálatok esetében, melyet korábban még nem végeztek el különösen fontos, hiszen csak így tudjuk eldönteni, hogy a kapott eredmény megfelel-e a valóságnak.

A technológia fejlesztése közben számos paramétert figyelembe kell venni, melyek befolyásolhatják a hegesztési varrat minőségét. A végeredményt befolyásoló technológiai tényezők mellett fontos kiemelni, hegesztendő anyagminőséget. Jelen kutatómunka során a hegesztendő próbalemezek anyagminősége 5053 megnevezésű alumínium ötvözet. A kutatás során keresem az optimális szerszám geometriát, - hegesztési beállításokat, - a varrat minőségének roncsolásos és roncsolásmentes anyagvizsgálatával. A kapott eredmények segítségével fogom értékelni, következtetéseket vonni az új szerszámgeometriák alkalmazhatóságáról.

Kutatásom célja, hogy a (konkrét anyag) hegeszteni kívánt anyagokhoz kifejlesszek egy ideális szerszámot, felderítsem a lehetséges, még nem vizsgált változókat. A kutatásba jelen

korunk legdinamikusabban fejlődő gyártási eljárása, a 3D fémnyomtatás is beintegrálásra kerül. Az FSW- szerszámok gyártása forgácsolással készül (szubtraktív gyártással), de abban az esetben, ha komplex tű és váll geometriát kívánunk létrehozni csak additív gyártás jöhet szóba, mivel a 3D fémnyomtatással tér nyílik az összetett, forgácsolás szempontjából túl bonyolultnak tekinthető elemek kivitelezésére is, mely többek között gazdasági szempontból is előnyt jelent.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. Történelmi áttekintés

Napjainkban, természetessé vált a fémmegmunkálás, fémek alkalmazása, hiszen kedvező tulajdonságaik miatt, számos területen alkalmazhatóak. A fémek megmunkálásának kezdetét 7-8 ezer évvel ezelőttre becsülik, mely időszakban már azonosítható volt az első hegesztési technikák alkalmazása. [3]

Az évek során az igényeknek megfelelően az anyagminőségek fejlesztésével párhuzamosan nagy figyelmet kapott a kötéstechológiák korszerűsítése is. A hegeszthető fémeknél kidolgozott technológia sokáig önmagában elégítette ki az aktuális ipari elvárásokat. Azonban, az 1990-es években, az űrkutatás, és a légi technika fejlődésével olyan anyagminőségek jelentek meg melyek végett új technológia kifejlesztésére volt szükség, mellyel nagyszilárdságú alumínium hegesztését tették lehetővé, hogy a felépítmények össztömegét a lehetőségekhez mérten minimalizálni tudják. Az alumínium a legtöbb esetben károsan reagált az addig legtöbb esetben alkalmazott, ívhegesztéssel való kötés kialakítására, így a dörzshegesztés alkalmazása előtérbe került. Az alumíniumban az ívhegesztés olyan következetes hibákat eredményez az anyagban, mint például kilágyulás és vetemedés, mely a szerkezet károsodásához és töréséhez vezet. [3] [4]

Napjainkban, a kavaró dörzshegesztés kulcsfontosságú szerepet tölt be a fémmegmunkálás területén. Széles körben alkalmazható az űr, - és légi technológia mellett hajózás, és autógyártás szektorban is. A felsorolt területeken kimagasló elvárás a tömeg optimalizálás, így a nagyszilárdságú alumínium ötvözetek kiváltották a nálunk jóval nehezebb, de mechanikai tulajdonságait tekintve hasonló szerkezeti acélokat. Az alumínium használatával elért jelentős tömeg csökkentés a technológia elterjedéséhez vezetett.

Számos tanulmány vizsgálja az eljárás változó paramétereit, és keresi az optimális értékeket. Változó paraméternek tekintjük első sorban a hegesztendő anyagokat, azok anyagminőségét, anyag vastagságát, illetve befolyásoló tényező többek között, ha 2 vagy több egymástól eltérő anyagot kívánunk hegeszteni. A folyamat technológiai változói közé sorolható a hegesztés során beállított szerszám dőlésszöge, előtoló sebesség, fordulatszám, a tengely irányú erő nagysága, illetve esetenként a folyamat során alkalmazott hűtés megléte is. A szerszám tervezésénél meghatározó szerepet tölt be a szerszám anyaga, szerszámváll átmérő, tű geometriája, átmérője és hosszúsága. [3]

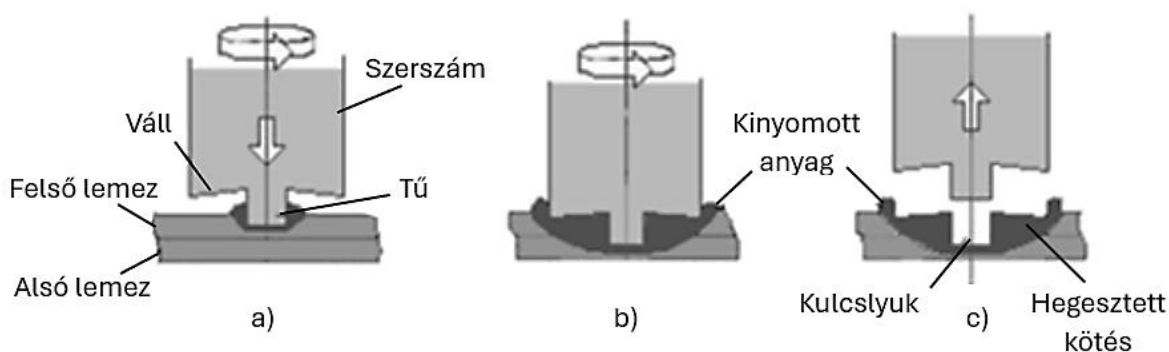
Összességében ezek azok a változók melyek hatást gyakorolnak a kötés minőségére. Belátható, hogy a terület számos aktuális lehetőséget tartogat a kutatók és fejlesztők

sámára. A következő fejezetekben néhány kiválasztott releváns tanulmány eredményeit elemzem, melyekkel a kutatásom során már eredményesen bizonyított, illetve a még nem vizsgált területeket fedezzek fel.

2.2. FSW technológia ismertetése

A technológiát nagyszilárdságú ötvözt alumíniumok hegesztésére fejlesztették ki, de emellett számos ötvözet és anyag esetében bizonyítottan sikeres volt, ideértve a nagyszilárdságú acélokat, a rozsdamentes acélokat és a titánt is. [5]

A művelet alapelve, hogy az anyagok között úgy alakít ki szilárd fázisú kötést, hogy az eljárás során nem éri el azok olvadáspontját. A hegesztéshez egy kopásálló forgó szerszámot alkalmaznak, mely behatol a hegesztetni kívánt rögzített munkadarabokba. A szerszám váll része súrlódási hőt termel, mely következtében a munkadarabok szilárdsága csökken, anélkül, hogy elérné azok olvadáspontját, az anyag tehát meglágyul. Ebben fázisban, a szerszám állandó forgó mozgása közben, végig vonul a hegesztési illesztés mentén, majd a lehűlés során szilárd fázisú kötés alakul ki a munkadarabok között. Az eljárás lépéseit az 1. ábra szemlélteti. [4] [6]



1. ábra Kavaró dörzshegesztés lépései a) anyagba történő süllyesztés b) kavarás c) kiemelés [11]

2.3. Szerszámkialakítások változóinak bemutatása

A kavaró dörzshegesztési technológiával hegesztett varratok minősége számos változó paraméter függvényében jön létre. Ilyen például a hegesztéshez használt szerszám kialakítása, melynek lényeges, befolyásoló sajátosságainak leírása ebben a fejezetben következik. [3] [7] [8]

2.3.1. A szerszám anyagának kiválasztása

Általános esetben szerszámacélból készült szerszámot alkalmazunk amikor alumínium, - és magnézium ötvözetek, valamint az alumínium mátrix kompozitok hegesztéséről

beszélünk. Azonban különböző anyagok hegesztésénél eltérő anyagból készült szerszámot kell alkalmazni, hogy elkerülhető legyen a szerszám nagymértékű kopása. A kopás mértéke nagyobb a fém mátrix kompozitok hegesztése során, mint a lágy ötvözetek hegesztések esetében. Az anyag megválasztása során figyelembe kell venni az anyag oxidálódását az eljárás során keletkező magas hőmérséklet következtében. Javasolt olyan alapanyagot választani, melynek nagy a keménysége, alacsony a reakcióképessége az oxigénnel és magas hőmérséklet mellett is ellenáll a deformációknak. Ezek közé tartoznak a szerszámacélok, gyorsacél (HSS), Ni-ötvözetek, fémkarbidok és kerámiák is. Fontos megjegyezni, hogy az optimális anyag kiválasztását befolyásolják a technológia során változó paraméterek, illetve a hegesztendő lemez anyagminősége és vastagsága is. [9] Így a szerszám anyagának megválasztása minden esetben egyedi, a varrat minőségéhez hozzájáruló tényező. [4] [9]

Az 1.táblázat különböző hegesztendő ötvözetekhez tesz javaslatot, mely anyagból érdemes a szerszám kialakítása, amennyiben adott a munkadarab vastagsága.

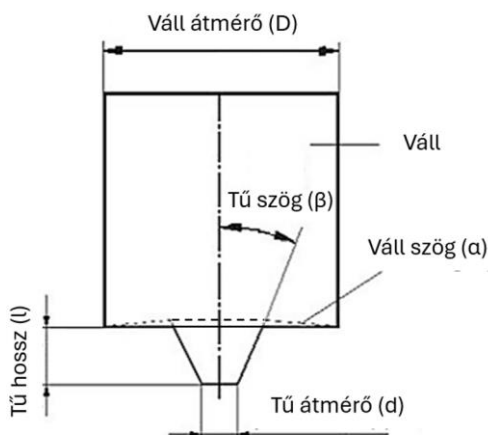
1. táblázat Javaslat szerszám anyagának megválasztására [10]

Hegesztendő ötvözetek	Anyagvastagság (mm)	Szerszám anyaga
Alumínium ötvözetek	3-50	Szerszámacélok, Co-WC kompozit (Kobalt-Volfrám-karbid kompozit)
Magnézium ötvözetek	3-10	Szerszámacélok, WC kompozit
Réz ötvözetek	3-50	Szerszámacélok, Ni-alapú ötvözetek, W-alapú ötvözetek, PCBN (Polycrystalline Cubic Boron Nitride)
Titánium ötvözetek	3-10	W-alapú ötvözetek
Rozsdamentes acél	3-10	W-alapú ötvözetek, PCBN
Gyengén ötvözött acélok	3-10	WC kompozit, PCBN
Nikkel ötvözetek	3-10	PCBN

2.3.1. A szerszám geometriájának kialakítása

A szerszám geometriájának kialakítása szintén kulcsfontosságú szerepet játszik megfelelő minőségű a varrat előállításához. Számos kutatás bebizonyította, hogy a szerszám tű, illetve váll kialakítása befolyásolja a szerszám kopását, a súrlódási hő keletkezését, illetve a meglágyult anyag keveredését is. A forgó szerszám merítésekor kezdetben a tű és a munkadarab között keletkezik a súrlódási hőtermelés, mindaddig amíg a merítés során a váll érinti a munkadarabot. Ebben a fázisban a váll és a munkadarab között alakul ki szignifikáns hőtermelés. [3] [10] A szerszámot gyárthatják 1 vagy több különálló részből is. Ez utóbbi egy gazdaságosabb megoldás, mivel a tű van kitéve a legnagyobb igénybevételnek, így az a

rész jóval hamarabb elkopik a többi egységhez képest, így praktikus megoldásnak tekinthető, ha csak azt kell cserélni, nem a teljes szerszámot. A szerszám fő paramétereit a 2. ábra foglalja össze.



2. ábra FSW szerszám fő paramétereit [11]

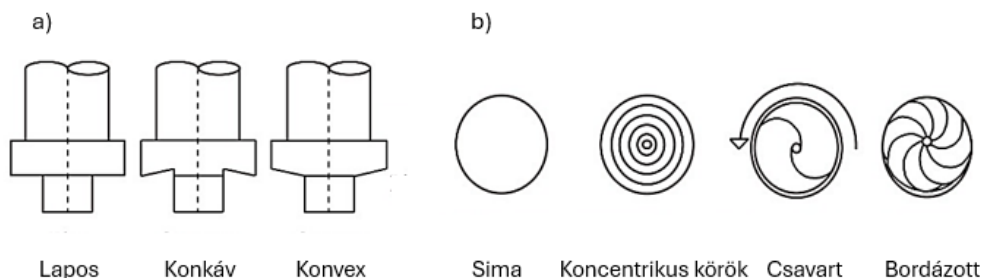
A tű és a váll kialakításánál az egymáshoz viszonyított méretezést kell alapul venni. Alumínium ötvözetek esetén elmondható, hogy a szerszámváll átmérője a tű átmérőjének 2,5...3 szorosa. A szerszám váll átmérője befolyásolja a varrat szélességét, illetve a termelődő súrlódási hő nagyságát. [3] [13]

A szerszám váll átmérőjének a növelésével a hegesztési varrat minősége befolyásolható. A kutatás, mely alátámasztja az előbbi kijelentést, több különböző fordulatszámon és előtolási sebességgel, 6 eltérő átmérőjű szerszám vállal végezte az AA 2014 alumínium ötvözet munkadarabok hegesztését. A legeredményesebb varratot $n=1000 \text{ min}^{-1}$ fordulatszámon, $f=600 \text{ mm/min}$ előtolási sebességgel, a 12 és 15 mm átmérőjű szerszám váll kialakítással érték el. Az ennél kisebb, vagy nagyobb váll átmérővel kialakított szerszám hibás varratokat hozott létre. A szerszám váll átmérő növelésével a termelődő hő nagysága is növekedett. [36]

2.3.2. Szerszám váll kialakítás

A váll profil kialakítása szintén eltérő hatást gyakorol a hőfejlődés mértékére a hegesztés során. A különböző profillal rendelkező váll, pl.: lapos, konkáv vagy konvex felület (3 ábra a)) széles körben használatos kavaro dörzshegesztés esetén. A lapos váll a legelterjedtebb mivel egyszerű kialakítása mellett, képes a megfelelő hőbevitel elérésére. Így sok esetben gazdasági és időtakarékosági szempontból feleslegessé válik a konkáv vagy a konvex váll profil alkalmazása. Ezen felül a váll homlokfelületén érdemes barázdákat, illetve spirális csatornákat kialakítani, mivel ezen tényezők az anyag homogén keveredéséhez járulnak

hozzá (3.ábra b)). Egy vizsgálat során megállapították, hogy a menetes tű és a barázdált aljú konkáv váll hibamentes varratot eredményez



3. ábra a) Szerszám váll kialakítások: Sima, Konkáv, Konvex (balról jobbra haladva);

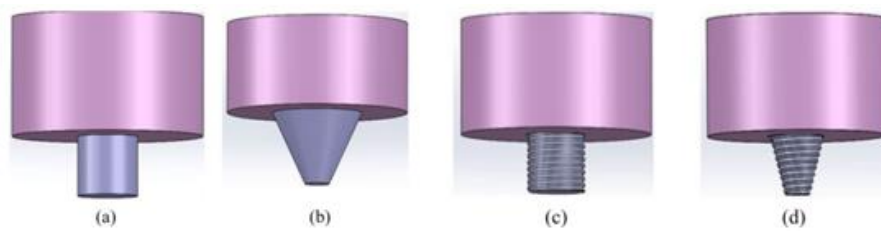
b) Szerszám váll homlokfelület kialakítások: Sima, Koncentrikus körök, Csavart, Bordázott (balról jobbra haladva) [15]

A konkáv váll alkalmazása közben azt tapasztalhatjuk, hogy az anyagáramlás kedvezőbb a lapos vállal kialakított varrat esetéhez képest. Ez annak köszönhető, hogy a szerszám lesüllyesztésekor a tű által kiszorított anyag bekerül a szerszám vállában lévő üregbe, majd a szerszám mozgásakor, ez az anyag tovább mozog a tű által keltett áramlási irányba. Ennek a válltervezésnek a megfelelő működéséhez a szerszámot 2 és 4° között kell megdőnteni a munkadarab felületéhez képest a mozgási iránnyal megegyező irányba.

Konvex váll alkalmazása során az anyagáramlás nem optimális a hegesztési varrat kialakításához. Ez abból eredeztethető, hogy a váll kialakítása miatt az anyag eláramlik a tű környékéről a szerszám mozgása közben. Ahhoz, hogy ez a kialakítás is optimális végeredményt produkáljon, spirális bordás kialakítást kell alkalmazni a vállon, melyek funkciója, hogy az anyagot a váll külső részéről a tű felé mozgatják. [4] [14]

2.3.3. Szerszám tű kialakítás

Különböző tű profilok alkalmazása szintén eltérő eredményekhez vezet a varrat kialakításában. Egyes megállapítások alapján, a szerszám körüli anyagáramlás leginkább a tű profiljától függ. [4] [16] Számos geometria létezik, melyek közül néhányat kiemelek ebben a fejezetben. A 4.ábrán megfigyelhető 4 különböző tű geometria, melyek a következők: egyenes hengeres, kúpos hengeres, egyenes menetes, illetve kúpos menetes. Vizsgálatok kimutatták, hogy a menetes kialakítás hibátlan varratot produkált, míg a menet nélküli hibákat eredményezett. Emellett viszont meg kell említeni, egyéb vizsgálatok a menetes kialakítás során eltömődést és kopást tapasztaltak. Ezenfelül, a sima felületű kúpos tűvel történő hegesztés hasonló minőségű varrathoz vezet, mint hengeres menetes kialakítású tű esetében, viszont élettartama magasabb és az előállítási költsége alacsonyabb. [15]

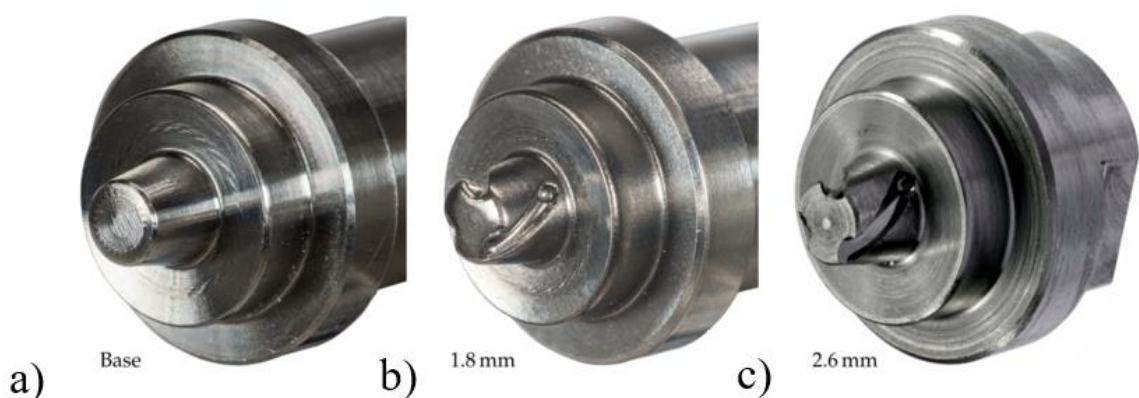


4. ábra Tű geometriák a) egyenes, sima felületű b) Trapéz keresztmetszetű, sima felületű c) Egyenes, menettel ellátva d) Trapéz keresztmetszetű, menettel ellátva [15]

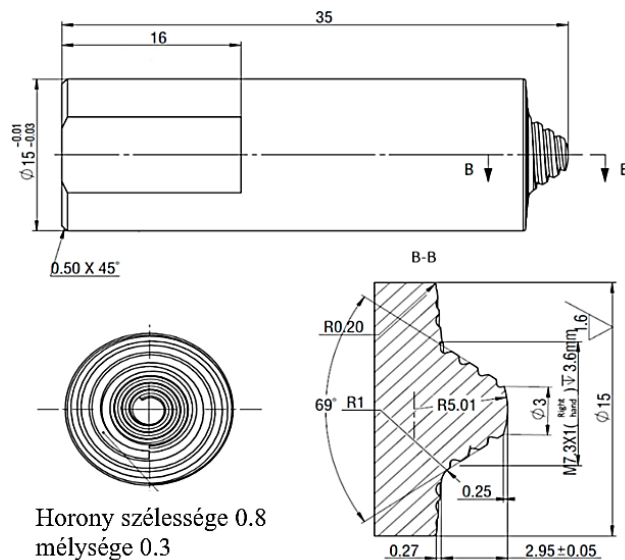
Érdemes megemlíteni, hogy a kúpos hengeres tűprofil használatával kevesebb hő termelődik, mint az egyenes hengeres tűprofil esetén, ugyanazon a megadott paraméterek mellett, így figyelni kell a technológiai változók megfelelő beállítására.

A felsoroltak mellett még alkalmaznak négyszög, háromszög, illetve egyéb sokszögalakú tűprofilokat is. A szögletes profilok alkalmazása kedvező hatással van az anyagáramlásra, illetve a varrat mechanikai tulajdonságaira is. Egy tanulmány szerint, összevetve a sokszög alakú profilokat a hengeres kialakításhoz képest, minden esetben kedvezőbb a varrat minősége. Hátránya viszont, hogy előállításuk bonyolultabb, és időigényesebb. [17]

Egy eddig kevésbé alkalmazott tű geometria, a lépcsős kialakítású hengeres tű, kedvező eredményekkel szolgálhat. [8] Ennek feltételei többek között, hogy a tű hosszúsága valamivel rövidebb legyen, mint a hegesztendő munkadarab anyag vastagsága. [10] Szintén jó anyagáramlást biztosít, ha a tű felületét különböző mélységű spirális elrendezésű vályatokkal látják el, mint az 5., illetve 6. ábrán látható esetekben. [18]

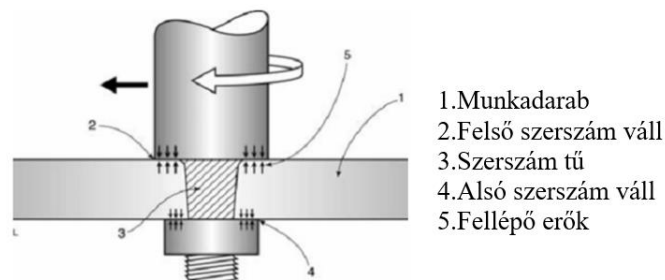


5. ábra a) Nincs csatorna kialakítva b) 1,8 mm mély csatorna c) 2,6 mm csatorna [18]



6. ábra Méretezett szerszám műszaki rajz [19]

Amennyiben nagyobb vastagságú lemez (>8 mm) hegesztéséről van szó, érdemes az úgynevezett „bobbin” szerszámot alkalmazni, mellyen 25 mm vastagságú lemezt is sikeresen hegesztettek már a gyakorlatban. A technológia működésének sematikus ábrázolását a 7.ábra szemlélteti. [20] [21] [22]



7. ábra "Bobbin" szerszámmal történő megmunkálás sematikus ábrázolása [20] látható legyen az írás

2.4. A folyamat változóinak bemutatása

2.4.1. Alumínium és acél hegeszthetőségének fontossága, valamint a szerszám fordulatszámának és előtoló sebességének jelentősége

A kavaró dörzshegesztés jelen van az autóiparban, mivel különböző anyagok, mint például alumínium, és acél megfelelő felhasználásával fokozni lehet a biztonságot és az élettartamot a gazdasági igények figyelembevétele mellett.

Egyes tanulmányok az alumínium- acél hegeszthetőségét vizsgálják, mellyel a személygépjárművek minőségét kívánják fejleszteni. Az alumínium alkalmazása elengedhetetlen fontosságú, leginkább a gyűrődési zóna esetében, ahol az alumínium nagy energia elnyelésére képes, illetve a jármű össztömegét is jelentősen csökkenteni lehet. Az acél

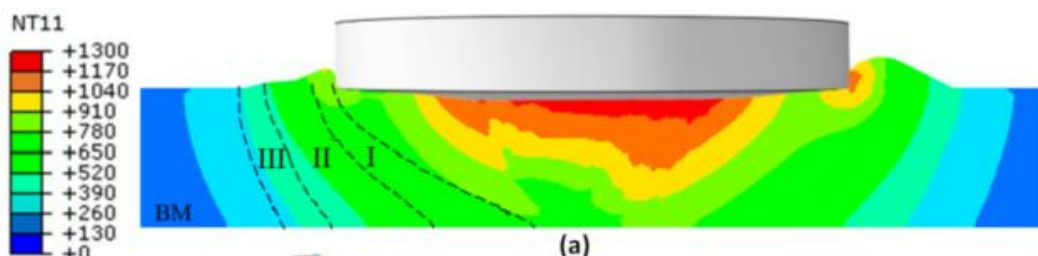
felhasználása inkább az utastérben tölt be nagyobb szerepet, ahol az utas biztonsága az elsődleges.

A dörzshegesztés alkalmazásával a felsorolt igények megfelelő módon kielégíthetőek, mivel nem olvad meg az anyag (szilárd állapotban marad), biztosítja különböző tulajdonságú anyagok hegeszthetőségét (jelen esetben alumínium és acél), illetve elérhető vele a repedésmentes varrat kialakítása.

A tanulmány megállapította, hogy az előtoló sebesség növelésével optimalizálható a hegesztés minősége. A hegesztési hőmérséklet és a hőbevitel csökkentése hozzájárult a kedvezőbb hegesztési varrathoz.

A következő vizsgálat $n=1000 \text{ min}^{-1}$ fordulatszámon történt $f=100 \text{ mm/min}$ előtoló sebesség mellett, melynél a hegesztési varrat törékeny, nem megfelelő. Az előtoló sebesség 437 mm/min -re történő növelésével a varrat hajlításra jobban igénybevehető, és csak esztétikai hibák jelentek meg a felületén. [7] [23]

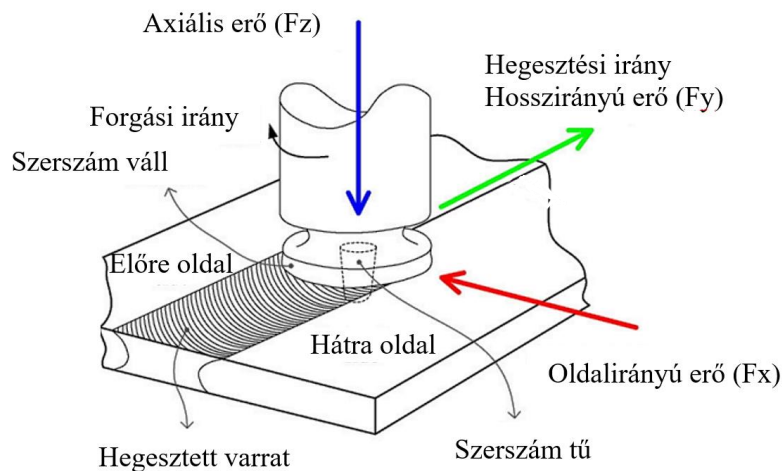
Egy másik tanulmány a fordulatszám és a fejlődő hő kapcsolatát vizsgálta végesselemes szimuláció és valós vizsgálat keretein belül. A fordulatszám növelésével a varratban keletkező hőmérséklet is növekedett. Az 8.ábra 350 min^{-1} -es fordulatszámon szimulált hőmérséklet fejlődést mutatja. A vizsgálat során $1\text{Cr}11\text{Ni}2\text{W}2\text{MoV}$ anyagot hegesztettek, mely egy hőálló rozsdamentes acél. [19]



8. ábra A hegesztési varrat hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$ -ban) -eloszlása szimulációs vizsgálattal $n=350 \text{ min}^{-1}$ fordulatszámnál [19]

2.4.2. Tengelyirányú erő meghatározása

Kavaró dörzshegesztés közben fellépő erők nagysága, jelentősen függ az anyag típusától és a munkadarab vastagságától. A legfontosabb fellépő erők (9.ábra) a folyamat során az axiális erő (F_z), a hosszirányú erő (F_y), oldal irányú erő (F_x) és a forgatónyomaték (M_z). [24] [25] A felsorolt erők nagysága mind befolyásoló tényező a varrat minőségének alakulásában. [4]



9. ábra Kavaró dörzshegesztés közben fellépő erők sematikus ábrázolása [24]

- Axiális erő (F_z): Felelős a súrlódásért a szerszámváll és a hegesztendő munkadarab között, így jelentős szerepet tölt be a folyamat során létrejövő hőtermelésben. Emellett biztosítja a megfelelő nyomást, mely hozzájárul a kívánt varrat kialakításához.
- Hosszirányú erő (F_y): A hegesztendő anyag ellenállásának leküzdését segíti, a szerszám mozgásával megegyező irányú.
- Oldal irányú erő (F_x): A folyamat során kialakult nyomáskülönbségek okozta erő. A szerszám forgási iránya asszimetriát eredményez az anyagban a szerszám körül. A szerszám előtti oldal, melegebb, így lágyabb, tehát kevésbé ellenálló a szerszám előre haladásával szemben. Azonban a szerszám mögött alacsonyabb a hőmérséklet, kevésbé lágy az anyag, nagyobb nyomás keletkezik az előre oldalhoz képest, így feszültség keletkezik a két oldal között. Ez az igénybevétel nagy részben befolyásolja a szerszám kopását, illetve a hegesztés minőségét, így a helyes beállításokkal elérhető hosszabb üzemidő, és nagyobb szerszám élettartam.
- Forgatónyomaték (M_z): szintén hozzájárul a súrlódó hő keletkezéséhez a szerszám és a munkadarab közötti folyamat során. [24] [26]

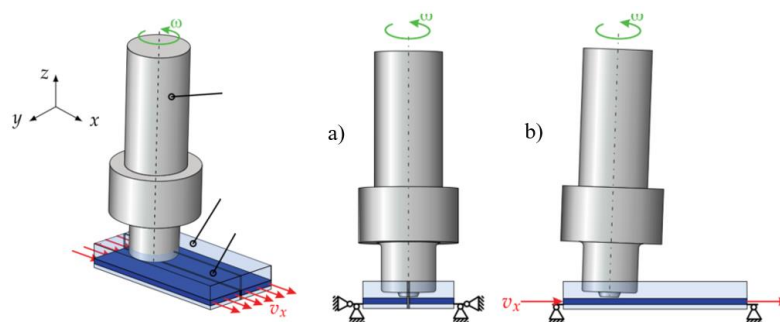
Számos tanulmány taglalja, mekkora axiális erő alkalmazása szükséges adott anyagminőség és anyagvastagság mellett. A 2. táblázat egy tanulmányból kiragadott ajánlott paramétereket foglalja össze az anyagminőség, vastagság és a tengelyirányú erő nagyságának függvényében.

2. táblázat Javasolt nagyságú axiális erő alkalmazása, adott anyagminőségű és vastagságú hegesztendő munkadarab tekintetében [24]

Anyag megnevezése	Anyagvastagság (mm)	Axiális erő (kN)
AISI 409 M	4	24
AA2195-T6	6,35	13,8
AA6061-T6	6,35	12,5
AA7075-T6	5	8
AA6082-T6/AA7075-T6	8	12
Cu/CuZn30	3	5,5
AA2124-SiC	15	8,5
ABS	6	2

2.4.3. A szerszám dőlésszögének meghatározása

Több vizsgálat arról számol be, hogy már 1° -os szerszám dőlésszög is drasztikus mértékben képes a hegesztési varrat minőségét javítani. [27] A szerszám dőlésszögének beállítását a 10. ábra szemlélteti.



10. ábra Szerszám dőlésszögének beállítása a) elől nézet b) oldalnézet [18]

A dőlésszög a szerszám hosszirányú tengelye és a munkadarab síkjára állított képzeletbeli merőleges közötti szög érték. A javasolt dőlésszög értékek $1-3^\circ$ közé tehetőek. [15]. A dőlésszög meghatározása egy szintén fontos paraméter, melynek beállításától függ a varrat minősége. A dőlésszög beállítása különösen fontos, hiszen befolyással van a Z tengely mentén kifejtett nyomó erő nagyságára az eljárás közben. Ennek az erőnek a növelése pozitív hatással van a varrat kialakítására, azon belül is az anyag áramlásra és a szemcsekeveredésre is. A túl nagy dőlésszögben készített varrat épp úgy károsítja a varrat minőségét, mint a 0° -os dőlésszög esetében [28]. Egyes esetekben indokolt lehet a szerszám dőlésszög növelése ($>3^\circ$), ezért is mindenképpen fontos az optimalizáció elvégzése a technológia alkalmazása előtt. [13] [28] [29]

Egy másik tanulmány, mely az AA6082 típusú alumínium dörzshegesztéssel történő eredményeit vizsgálta melyeket különböző fordulatszámokon ($n=1000 \text{ min}^{-1}$; $n=1250 \text{ min}^{-1}$), előtoló sebességen ($f=200 \text{ mm/min}$; $f=250 \text{ mm/min}$) és szerszám dőléssel hoztak létre (0° ; 2°), az alábbi eredményekkel alátámasztották, hogy a 2° -os dőlésszöggel, $f=200 \text{ mm/min}$

és $n=1250 \text{ min}^{-1}$ fordulatszámon történő hegesztések produkálták a legkisebb szemcseméretet a hegesztési varratban, emellett a varrat keménysége növekedett. [30]

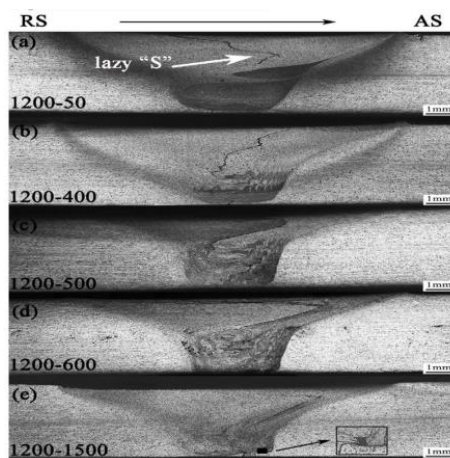
2.5. Anyagvizsgálatok és a fellépő hibák bemutatása

A kavaró dörzshegesztés során jó mechanikai tulajdonságú varratot vagyunk képesek létrehozni, emellett pedig füst, - por, - és egyéb szennyeződésektől mentes eljárásnak mondható. Ugyanakkor meg kell említeni, hogy néhány hátránya is van a technológiának. Ezek közé tartoznak a varrat hibái, mint például az alagúthiba, illetve az úgynevezett „lazyS” hiba. Ebben a fejezetben a varrat vizsgálatáról lesz szó, melyek alkalmazásával a varrat minőségének vizsgálatára van lehetőség.

Az anyagvizsgálatok során feltárhatjuk, és megismerhetjük a keletkezett varrat tulajdonságait. A vizsgálatok során szerzett információ jelentős fontosságú a technológia fejlesztése során. Az varrat az alábbi roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálati módokon kerül kivizsgálásra: szemrevételezés, metallográfiai (mikroszerkezeti),- szakító,- illetve keménységvizsgálat.

2.5.1. „Lazy S” hiba

A „lazy S” kifejezés, egy hegesztés során megjelenő anyagszerkezeti hibára utal. Nevét onnan kapta, hogy alakja hasonlít egy elnyomott S betűre, mely a hegesztett kötés középső részén figyelhető meg. Kialakulását feltehetőleg alumínium-oxid darabok okozzák, melyek a hegesztés során az alapanyag homlokfelületéről kerülnek a varratba. Egy tanulmány igazolja, hogy konstans, jelen esetben 1200 min^{-1} fordulatszámon, az előtolási sebesség növelésével a „lazy S” hiba kiküszöbölhető. A tanulmány eredményeit a 11. ábra foglalja össze.[31] [32]

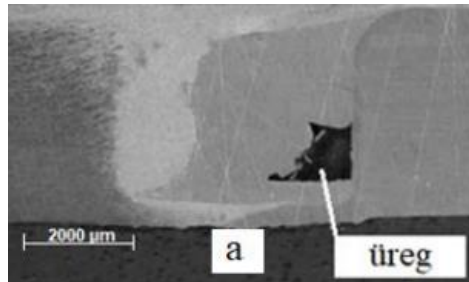


11. ábra Metallográfia útján történő mikroszerkezeti vizsgálat képei különböző előtolási sebességek esetében [31]

- a) 1200 min^{-1} -50 mm/min b) 1200 min^{-1} -400 mm/min c) 1200 min^{-1} -500 mm/min d) 1200 min^{-1} -600 mm/min
e) 1200 min^{-1} -1500 mm/min [34]

2.5.2. Alagúthiba

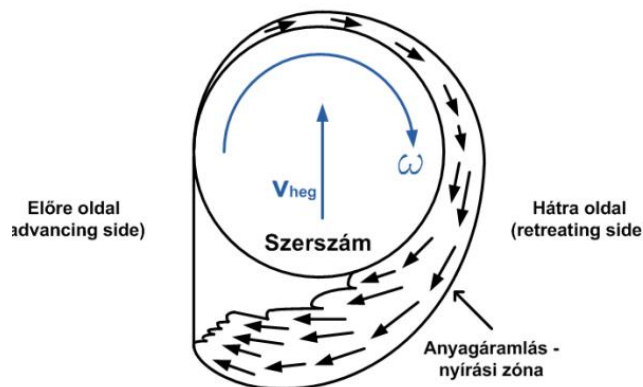
Általában a varrat alján keletkezik, melynek számos oka lehet, mint például a nem elegendő hőbevitel, illetve a nem megfelelő anyagáramlás a szerszám körül. Még a zárványok is károsan hatnak a varrat mechanikai tulajdonságaira, de az eljárás során fellépő változók helyes beállítása után a hiba kiküszöbölhető. A varratban keletkező alagúthibát a 12.ábra mutatja be.



12. ábra Alagúthiba [8]

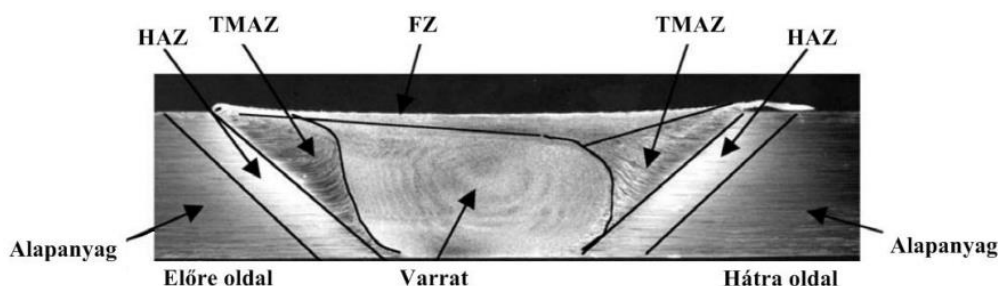
2.5.3. Anyagok keveredése

A szerszám mozgása közben a meglágyult anyag a szerszám körül áramlik, úgynevezett „előre”, illetve „hátra” oldal alakul ki a hőmérséklet különbségek következtében. [6] [8] Mivel az anyag keveredése sok esetben nem egyenletes, szimulációs és empirikus úton vizsgálni kell, mivel a nem megfelelő anyagkeveredés a varrat minőségét rontja. Az anyag áramlását a forgó szerszám körül az 13.ábra mutatja. Az anyagok keveredésének a vizsgálatát roncsolásos vizsgálattal lehet meghatározni, azon belül is el kell készíteni a varrat keresztcsiszolatát a metallográfiai vizsgálathoz. A kapott keresztmetszet szemlélteti a hegesztés során kialakult anyagok keveredésének megfelelőségét. A beállítások során törekedni kell, hogy az anyagok keveredése közel homogén legyen.



13. ábra Az anyag keveredése a szerszám körül (v_h = hegesztési sebesség, ω = szögsebesség) [8]

A 14. ábrán látható a kavarási dörzshegesztés által létrejött hegesztett kötés felépítése. A varrat egy finomszemcsés szövetszerkezet, ahol a szerszám halad. A varrat melletti részen megfigyelhető a termo-mechanikus hatásnak kitett övezet (TMAZ - Thermo-Mechanically Affected Zone). Ezen a területen kisebb anyagáramlás figyelhető meg, viszont a szövetszerkezetére jelentős hatással van a hőmérsékleten kívül, a sajtolóerő is. Ettől a résztől távolabb alakul ki a hőhatásövezet (HAZ - Heat Affected Zone), ahol a sajtolóerő már nem hat, viszont a hőmérséklet még itt is befolyásoló tényező. A 18. ábrán megfigyelhető az intenzív áramlási terület (FZ – Flow Zone) is, továbbá, hogy a hőterhelés nem azonos a kötés két oldalán. Ez annak köszönhető, hogy a szerszám forgómozgása nem eredményez egyenletes hőterhelést. [6] [8] [34]



14. ábra Kavarási dörzshegesztés által létrehozott hegesztett kötés keresztmetszeti képe [8]

Egy tanulmány összehasonlította az anyagáramlást menetes, illetve menet nélküli tűvel való hegesztés esetében. A végkövetkeztetés az volt, hogy alacsony fordulatszám ($n=950 \text{ min}^{-1}$) esetében a menetes tű esetében volt jobb az anyagkeveredés, azonban amikor növelték a fordulatszámot ($n=1550 \text{ min}^{-1}$) a menet nélküli tű bizonyult jobbnak. Tovább növelve a fordulatszámot, ($n=1850 \text{ min}^{-1}$), már az anyagok keveredése mindkét esetben hasonló volt. (15. és 16 ábra) [16]

2.6. Felhasznált tanulmányok kiértékelése

Az átolvasott tanulmányok útmutatásként szolgálnak dolgozatom elvégzése során. Az előző fejezetekből kirajzolódik az is, mely változók, miként befolyásolják a hegesztési varrat minőségét, melyekkel érdemes tovább foglalkozni, vagy éppen elhanyagolni.

A szerszám geometria kialakításánál megállapítható, hogy az egyes esetekben csak a bonyolult, forgácsolási eljárással nehezen, kevésbé költséghatékonyan gyártható geometriák bizonyultak eredményesnek. Mivel jelen esetben ezek egyedi gyártású alkatrészek lesznek, a forgácsolási eljárás helyett 3D fémnyomtatással készülnek el ezek az elemek. Egyes tanulmányok beszámolnak a technológia eredményességéről [35], azonban számomra további számos lehetőséget tartogat magában ez a kutatási terület, mely lehetővé teszi a

fémnyomtatás által, hogy tetszőleges, akár komplex geometriájú szerszámokkal is létre lehessen hozni megfelelő minőségű hegesztési varratokat.

A kutatásom során az egyedileg megtervezett szerszám geometriákat, a megválasztott változók beállítása mellett, végelelemes analízissel fogom vizsgálni a gyártás előtt, ezzel meghatározva azokat a folyamat, - és szerszám változókat melyek a legeredményesebbnek bizonyulnak a szimuláció során. Ez idő, és költséghatékonyság szempontjából is előre viszi a kutatást, illetve az így kapott eredmények összehasonlíthatóak lesznek a gyakorlatban elvégzett kísérletekkel, mely releváns képet ad majd a szimuláció hatékonyságáról.

3. FSW szerszám tervezése

Az irodalomkutatás során számos különböző szerszám kialakítással találkoztam, melyek alapul szolgáltak szerszám tű-, és váll megtervezéséhez. A 3D fémnyomtatás által tér nyílik, a hagyományos megmunkáláshoz képest, gyorsabban és költséghatékonyabban legyártani a bonyolult geometriával rendelkező elemeket. A szerszámokat a VARINEX Kft, gyártotta le 3D fémnyomtatással rozsdamentes acélból, Xact Metal 200G megnevezésű berendezésen, melynek specifikációját a 15. ábra foglalja össze.

	Xact Metal 200G	
	Építési térfogat:	150x150x150 mm vagy 125x125x125 mm
	Lézer típusa:	XM200G – Single 100W, 200W vagy 400W Yb szál lézer XM200G2 – Dual 100W, 200W vagy 400W YB szál lézer
	Építési sebesség:	XM200G – 6- 9 cc/hr XM200G2 – 12- 16 cc/hr
	Rétegvastagság:	20-100 µm
	Por opciók:	-Alumínium Si10Mg -Bronz, réz (C18150) -Rozsdamentes acél: 316L, 17-4 PH, 15-5, 400-as sorozat -Szuperötvözetek: 718, 625, -Kobalt, Króm F75, Hastelloy X -Titánium Ti64 -Szerszámacél: Maraging M300

15. ábra Xact Metal 200G fémnyomtató paraméterei [37]

A mintadarabok hegesztését az Neumann János Egyetem Gyártástechnológiai Tanszékének a műhelyében végeztem az EML-850 5AX 5 tengelyes megmunkáló központon. A tervezés előtt megvizsgáltam a berendezés technikai adatait, melyet a 16. ábra is szemléltet. A gépek megismerését követően elkezdtem az FSW szerszámok tervezését.

	Paraméterek	
	Asztal mérete:	1000x500 mm
	Terhelhetőség:	500 kg
	Löketek:	x-850 y-510 z-560
	Főorsó fordulatszám:	12.00 min ⁻¹
	Szerszámtár hely:	24 db
	Vezérlő	NCT 204

16. ábra EML-850 5AX-5 tengelyes megmunkáló központ műszaki adatai [38]

3.1. FSW szerszám tervezésének folyamata

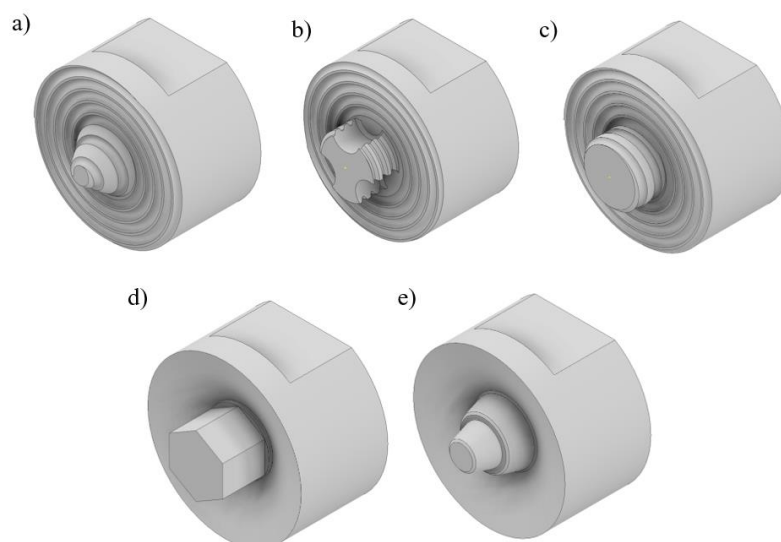
Az egyedi FSW szerszámokat Autodesk Inventor Professional nevű CAD szoftverrel terveztem meg. A tervezést az irodalomkutatás során felhalmozott információ alapján kezdtem el.

Egyes tervezési paraméter, minden egyes szerszámmra vonatkoztatva megegyezik. Első sorban figyelembe vettem a hegesztendő munkadarabokat, mely jelen esetben 2db 4 mm vastagságú alumínium lemez. A lemez vastagsága befolyásolja a tű hosszát, mivel az nem lehet egyenlő vagy nagyobb, mint a hegesztendő anyagvastagság. Érdekes valamivel rövidebbre tervezni a tű hosszát, hogy az ne érjen át az anyagon, ebből eredően a szerszám tű részét 3,7 mm hosszúságúra terveztem.

A következő lépésben a váll átmérőjét kezdtem el tervezni. A szerszám váll átmérője jelentősen befolyásolja a hegesztési varrat kialakulását. Alumínium ötvözetek esetén elmondható, hogy a szerszámváll átmérője a tű átmérőjének 2,5...3 szorosa. A szerszám váll átmérője befolyásolja a varrat szélességét, illetve a termelődő súrlódási hő nagyságát. Ebben a kutatásban minden szerszámot azonos, 20 mm átmérővel terveztem meg, de kutatás folytatásában érdemes azonos paraméterek mellett, különböző váll átmérők vizsgálata is.

Az FSW szerszám teljes hossza minden esetben 15 mm, mely elegendő a befogásra, és emellett költséghatékony gyártás szempontjából.

A tű átmérőjét, geometriáját, illetve a váll homlokfelületét és profilját szerszámonként eltérő módon terveztem meg.

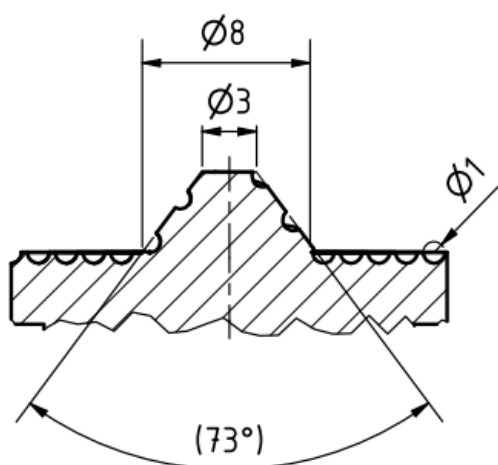


17. ábra FSW szerszámok a) 1.-számú szerszám b) 2.-számú szerszám c) 3.-számú szerszám d) 4.-számú szerszám e) 5.-számú szerszám

3.1.1. 1-számú szerszám

Az 1-számú szerszám esetében a váll kialakítása lapos, homlokfelülete pedig spirálisan hornyokkal van ellátva. A lapos váll a legelterjedtebb az FSW szerszámok körében mivel egyszerű kialakítása mellett, képes a megfelelő hőbevitel elérésére. Ezen felül a váll homlokfelületén kialakított spirális csatornák az anyag homogén keveredéséhez járulnak hozzá.

A kúpos tű kialakítása szintén jó varratokat eredményezett egyes esetekben, kedvezően járul hozzá az anyagok keveredéséhez, ezt a kúpos felületet szintén spirális csatornákkal láttam el, még inkább fokozva az anyagok keveredését a hegesztési folyamat közben. A .ábrán az 1-számú szerszám keresztmetszeti képe látható a tű és váll kialakításáról. A teljes műszaki rajzot az 1.melléklet tartalmazza.

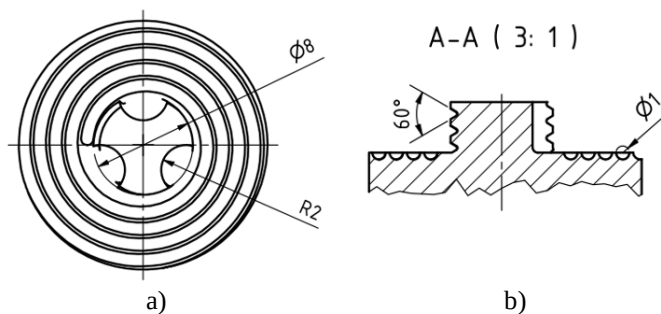


18. ábra 1-számú szerszám keresztmetszeti képe, szemléltetve a szerszám tű, és váll kialakítását

3.1.2. 2-számú szerszám

A 2-számú szerszám esetében a váll kialakítás azonos az 1-számú szerszámhoz képest: szintén lapos profillal, és spirális csatornákkal ellátott homlokfelülettel láttam el.

A tű kialakítása viszont eltérő. Ebben az esetben nem egy kúpos geometriáról van szó, hanem egy kör keresztmetszetű tű profilról, melyeket függőlegesen 3 db horonnyal láttam el. Az anyagáramlást a spirális csatorna mélysége is befolyásolja, így érdemes adott beállítások mentén ezt is átfogóbban vizsgálni. A tű felületét emellett menettel is elláttam, szintén az anyagáramlás fokozása érdekében. A 19.ábrán az 2-számú szerszám felülnézeti és keresztmetszeti képe látható a tű és váll kialakításáról. A szerszám méretei, műszaki dokumentációja a 2.mellékletben tekinthető meg.

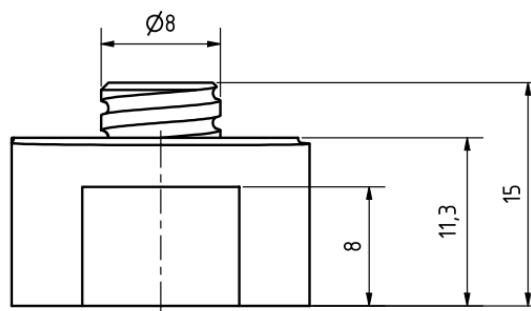


19. ábra 1-számú szerszám a) felülnézeti b) keresztmetszeti képe, szemléltetve a szerszám tű, és váll kialakítását

3.1.3. 3-számú szerszám

A 3-számú szerszám esetében a váll kialakítása megegyezik az első és második szerszám váll geometriájával.

Az eltérés az előző szerszámhoz képest a tű kialakításában rejlik. Az előző esettől eltérően a 3 db függőleges horonykialakításra ennél a szerszámnál nem került sor. Az anyagok áramlását csak a tű és a váll felületén lévő spirális csatornák biztosítják. A 20.ábrán a teljes 3-számú szerszám oldalnézeti képe látható. A teljes műszaki rajzot az 3.melléklet tartalmazza.

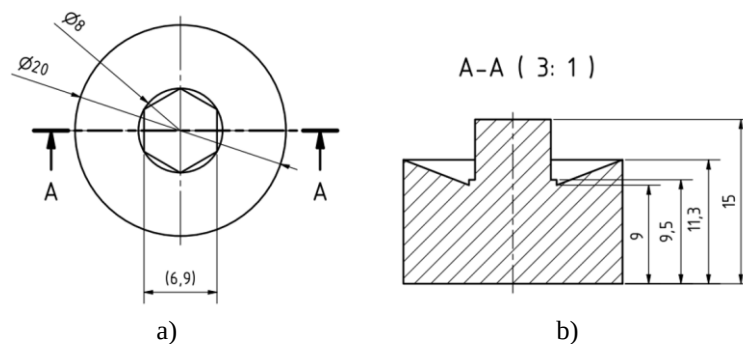


20. ábra 3-számú FSW szerszám oldalnézeti képe

3.1.4. 4-számú szerszám

A 4-es számú szerszámnál alkalmaztam először konkáv váll kialakítást. A konkáv váll alkalmazása mellett az anyagáramlás kedvezőbb lehet a lapos vállal kialakított varrat esetéhez képest. Ez annak köszönhető, hogy a szerszám lesüllyesztésekor a tű által kiszorított anyag bekerül a szerszám vállában lévő üregbe, majd a szerszám mozgásakor, ez az anyag tovább mozog a tű által keltett áramlási irányba. Azt érdemes figyelembe venni, hogy konkáv váll kialakítás mellett, a hegesztés közben a szerszámot 2 és 4° között meg kell dönteni a munkadarab felületéhez képest a mozgási iránnyal megegyező irányba a kedvező minőségű varrat elérése érdekében.

A tű kialakítása esetében a hatszög profilt alkalmaztam, mivel a szögletes profilok alkalmazása kedvező hatással van az anyagáramlásra, illetve a varrat mechanikai tulajdonságaira is. A 21. ábra szemlélteti a szerszám geometriáját és méreteit, illetve a teljes műszaki dokumentáció elérhető a 4. mellékleten.

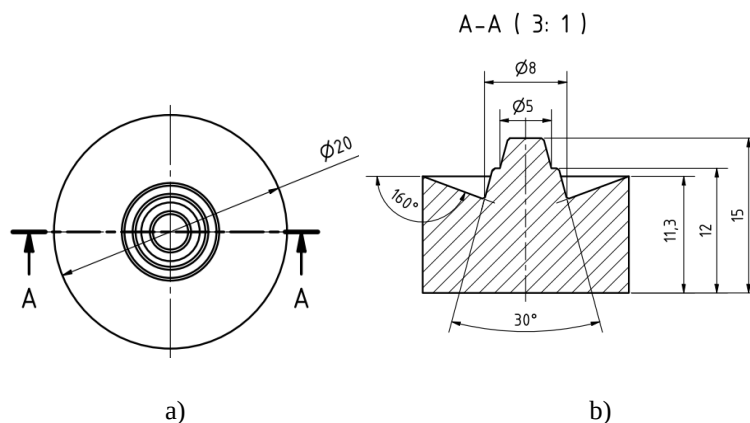


21. ábra 4-számú szerszám a) felülnézeti és b) keresztmetszeti képe

3.1.5. 5-számú szerszám

A váll profilja megegyezik a 4-számú szerszám váll kialakításával. A megfelelő váll szög meghatározását empirikus vizsgálatokkal lenne érdemes tovább kutatni, figyelembe véve a szerszám dőlésszögét is.

A tű kialakítása ebben az esetben kúpos- lépcsős kialakítású. A lépcsőzetes kialakítás és a kúposág is az anyagok keveredésének a fokozásához járul hozzá a hegesztési folyamat során. A 22. ábrán az 5-számú szerszám felülnézeti és keresztmetszeti képe látható a tű és váll kialakításáról. A szerszám méretei, műszaki dokumentációja a 5. mellékletben tekinthető meg.



22. ábra 5-számú szerszám a) felülnézeti és b) keresztmetszeti képe

3.2. Szerszámbefogó tervezés

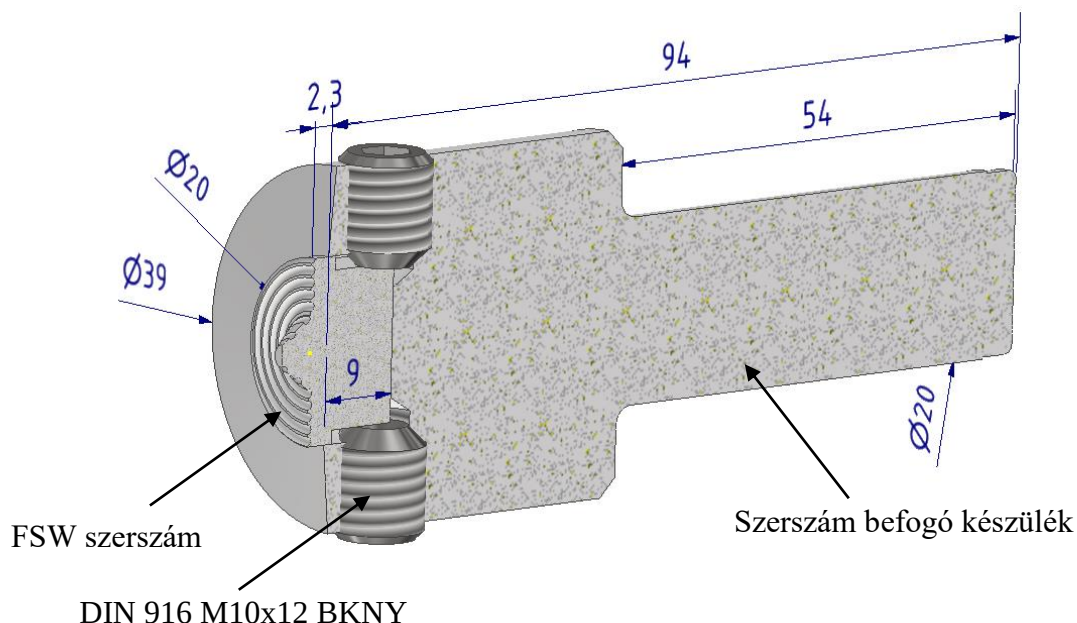
A szerszám megtervezését követően, egy szerszám befogó elemet is terveztem, mellyel az előbb említett szerszámokat lehet rögzíteni a CNC maró szerszámtartójában. A befogó külső átmérőjét és hosszát, a munkadarabok rögzítését biztosító elem méretei határozták meg. A szerszám befogó műszaki rajzát a 6. melléklet tartalmazza.

A kísérletet az előbb említett EML-850 5AX-5 tengelyes megmunkáló központon végeztem. A szerszámot BT50-es zsugorbefogóhoz terveztem, melyet a marógép főorsójához csatlakoztattam. A tervezett FSW szerszámokat nem lehet közvetlenül ebben a befogóban elhelyezni, szükség van egy köztes elemre.

A szerszám befogó tervezésénél először azt a részt alakítottam ki, ami a BT50-es befogóba csatlakozik. A befogó lemérése után, egy abba rögzíthető szerszám méreteit is vizsgáltam, ezek után határoztam meg a külső 20 mm-es átmérőt, és 54 mm-es hosszt ennek a szakasznak. A hosszát meghatározta, hogy a BT50-es befogóba ütközésig terveztem.

A tervezett befogó FSW szerszám felőli részét egyrészt maga az FSW szerszám méretei, másrészt az határozta meg, hogy a hegesztés során elférjen a szerszám a hegesztő készülék két leszorításra funkcionáló zártszelvénye között. Ez a távolság 50 mm. A legnagyobb külső átmérőt 39 mm-re terveztem, melyben két M10-es hernyócsavarral rögzíthető a szerszám lelapolt felületeinél. A szerszám váll homlokfelülete és a befogó készülék között 2,3 mm távolságot hagytam, melyre szükség van, hogy se a hegesztési varrat, se a befogó ne károsodjon a hegesztés közben, nem érdemes ennél nagyobb távolságot hagyni, mert akkor nem lesz elegendő felület a befogáshoz. Az M10-es hernyó csavarokat is annak a függvényében helyeztem el, hogy az kellő felületen tudja rögzíteni a szerszámot, és kialakítható legyen az M10-es furat a befogó készülékben. A befogó teljes hossza 94 mm, ami elegendő ahhoz ahogy a BT50-es befogóba rögzíthető legyen, és

elegendő távolság legyen a homlokfelülete és a hegesztendő munkadarab között. A 23.ábrán az összeállítási CAD modell keresztmetszeti képe látható.

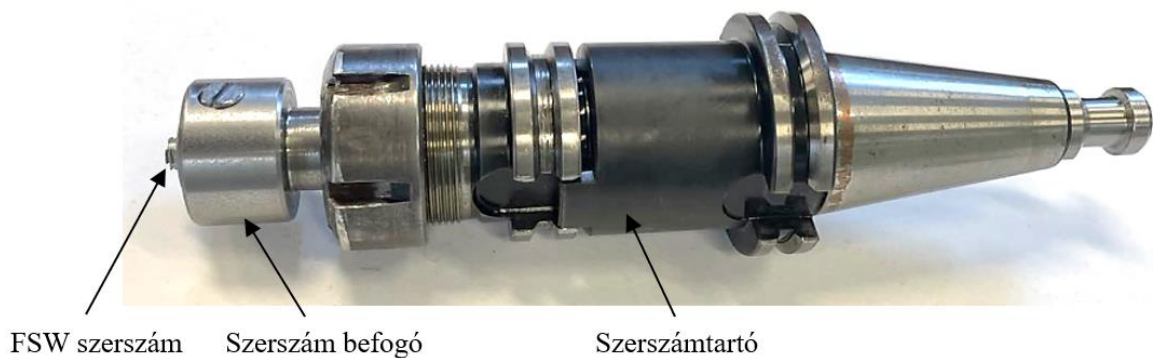


23. ábra FSW szerszám befogása az egyedi befogó készülékbe, keresztmetszeti kép

A befogó készülék anyának megválasztása is a tervezési folyamat része. Figyelembe véve, hogy a forgó szerszám merítésekor kezdetben a tű és a munkadarab között keletkezik a súrlódási hőtermelés, mindaddig amíg a merítés során a váll érinti a munkadarabot, mivel ekkor már a váll és a munkadarab között alakul ki szignifikáns hőtermelés.

A szerszám anyagának kiválasztását meghatározta, hogy mely anyagok érhetőek el a műhely alapanyagraktárában. Mindent összevetve C45-ös köracélból lett legyártva az alkatrész.

A tervezés szakasza lezárult, az összeszerelt teljes szerszámot a 24.ábra szemlélteti.



24. ábra Összeállított FSW szerszám BT50-es befogóban

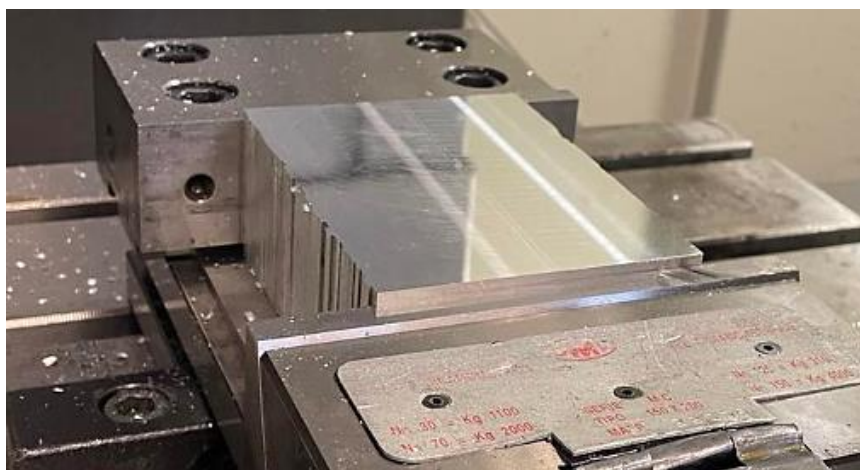
4. Hegesztési vizsgálatok paraméterei

A vizsgálat során összesen 15 mérést végeztem konstans 1000 min^{-1} fordulatszámon, 3 különböző előtolási sebességgel. A szerszám dőlésszöge a mérések során 0° . Hűtést nem alkalmaztam. A hegesztés során fellépő erőket KISTLER 9257B erőmérővel is terveztem vizsgálni, viszont azok túllépték az eszköz maximális terhelhetőségét, így releváns információ nem származott az erőmérésből. A hegesztés előtt kísérlettervet készítettem az átolvasott kutatások alapján, melyből levonva a következtetéseket határoztam meg a hegesztés technológiai paramétereit, melyeket a 3. táblázatban foglaltam össze.

3. táblázat A hegesztés technológiai paraméterei

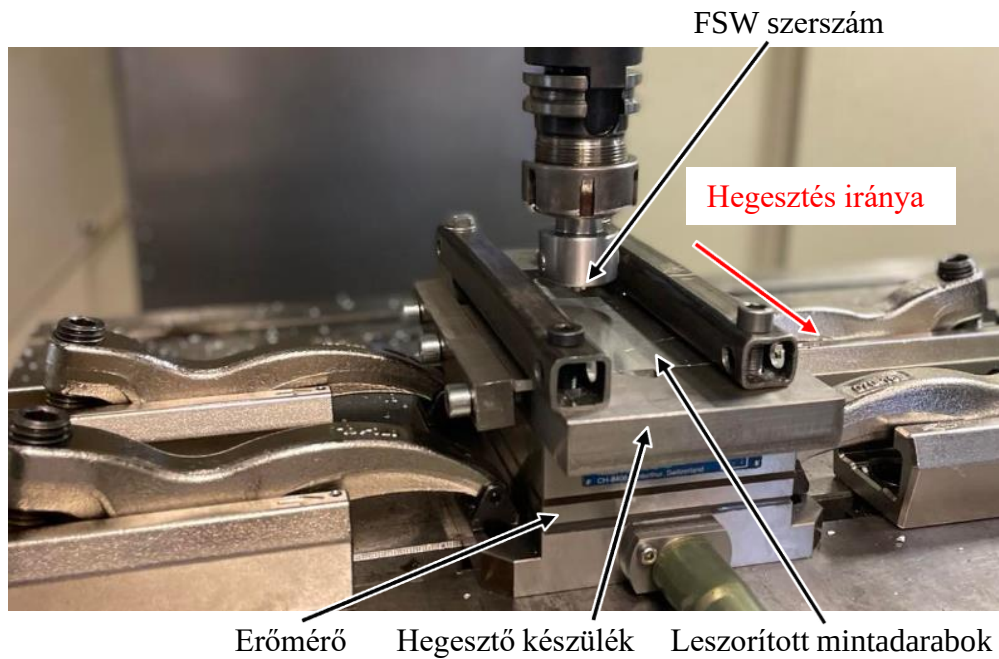
Mérések száma	Szerszám megnevezése	Fordulatszám (min^{-1})	Előtolás (mm/min)
1.	1.	1000	80
2.			125
3.			170
4.	2.	1000	80
5.			125
6.			170
7.	3.	1000	80
8.			125
9.			170
10.	4.	1000	80
11.			125
12.			170
13.	5.	1000	80
14.			125
15.			170

A hegesztéshez kiválasztott mintadarabok 5053-as alumínium ötvözetek, befoglaló méretük pedig $50 \times 90 \times 4 \text{ mm}$. A lemezek méreteit a hegesztő készülékhez képest határoztam meg. A mérések elvégzése előtt a darabok hegesztendő oldala egyenletes felületté lett alakítva. Ezt az állapotot szemlélteti a 25. ábra.



25. ábra Mintadarabok hegesztendő felületének simítása

A hegesztés során a lemezek ugyanabban a síkban helyezkednek el, és az érintkező felületeik mentén jön létre a kötés. A szerszámok spirális kialakítása miatt a főorsó a hegesztés során óramutató járásával ellentétes irányba forog (M4), hogy az anyagáramlás a szerszám kialakításnak megfelelően történjen. A hegesztés menete a 26.ábrán figyelhető meg.



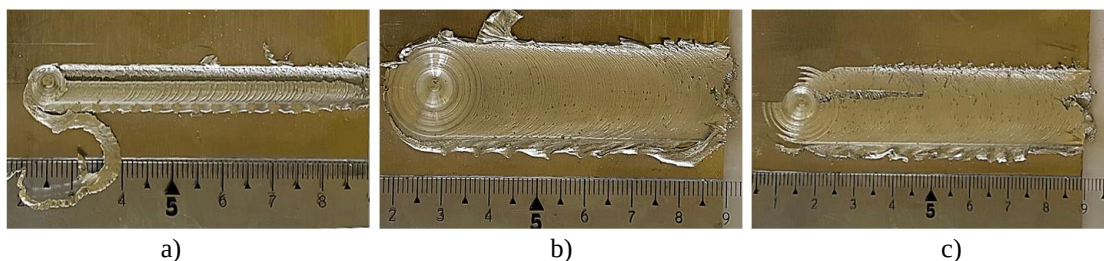
26. ábra Kísérlet elrendezése

5. Anyagvizsgálat

A kísérletek elvégzését követően megkezdtem az anyagvizsgálati folyamatokat, hogy átfogó képet kapjak a vizsgált minták tulajdonságairól. Ebben a fejezetben ismertetem a hegesztett mintadarabok vizsgálatának folyamatát és eredményeit. A kísérlet során a mintadarabokat szemrevételezéssel, szakítóvizsgálattal, keménységméréssel és metallográfiai úton értékeltem ki.

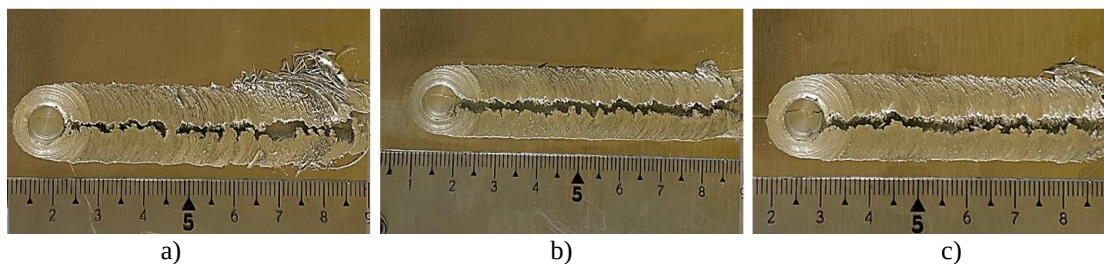
5.1. Szemrevételezés

Az hegesztési varratok vizsgálatát szemrevételezéssel kezdtem. Az 1. szerszám 80 mm/min -es előtoláson végig „szántotta” a varratot, nem alakult ki a megfelelő keveredési varrat. 125mm/min-es előtolásnál, egy jóval ígéretesebb kötést láthatunk, viszont az előtolás növelésével látható, hogy alagúthibák léptek fel a kötésben (27.ábra).



27. ábra 1. számú szerszámmal készített varratok felülnézeti képei a) 80 mm/min; b) 125 mm/min és c) 170 mm/min előtolás esetében

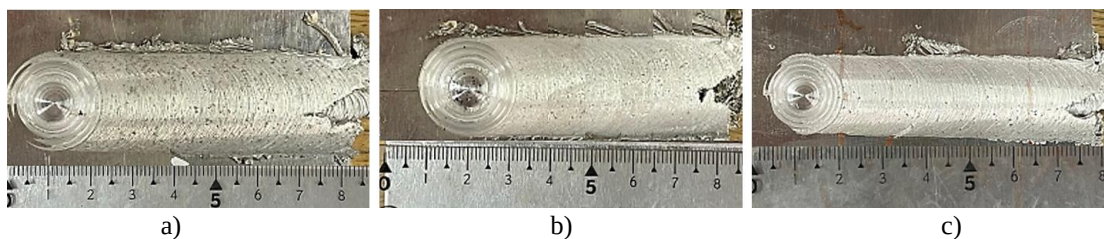
A 2.szerszám esetében a hegesztés közben a főorsó forgási iránya, óramutató járásával megegyező irányba volt állítva, így ez is hozzájárult a nem megfelelő varrat képzéshez. Egyik előtolási sebességen sem produkált a szerszám jó eredményt, így további anyagvizsgálatoknak nem vettem alá (28.ábra).



28. ábra 2. számú szerszámmal készített varratok felülnézeti képei a) 80 mm/min; b) 125 mm/min és c) 170 mm/min előtolás esetében

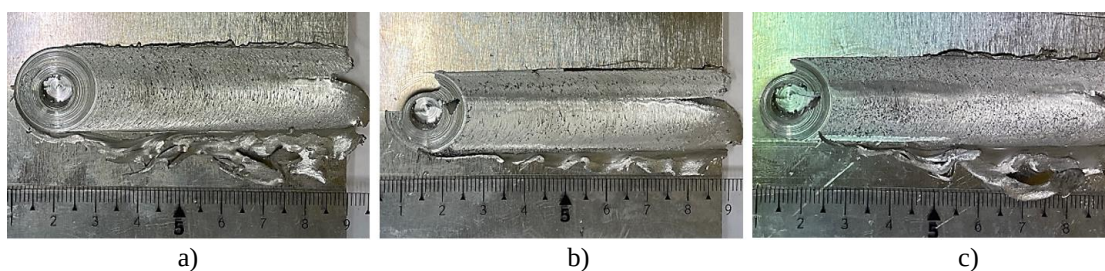
A 3.szerszám esetében mind a 3 mérésnél kialakult a keverési varrat, érdekességük viszont különböző. A 80 mm/min-es előtolás érdekesebb felületet eredményezett, de az előtolás

növelésével az érdesség egyre csökkent. A varrat elején kialakult hibák alagúthibákra utalnak a varraton belül (29.ábra).



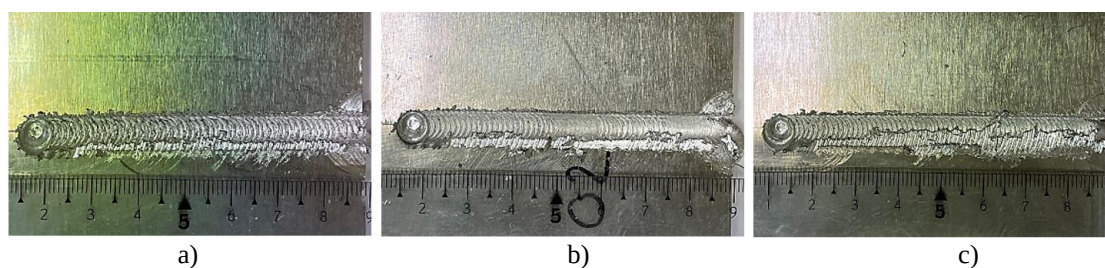
29. ábra 3. számú szerszámmal készített varratok felülnézeti képei a) 80 mm/min;
b) 125 mm/min és c) 170 mm/min előtolás esetében

A 4.szerszám konkáv váll kialakítású volt, mely azt eredményezte, hogy a hegesztés során kisebb erők léptek fel. Ezt a megállapítást a CNC berendezés hegesztés közbeni terheléséből vontam le. A hegesztési varrat szemrevételezéséből látszik, hogy a varratban az előtolás mértékét növelve is alagúthibákra számíthatunk (30.ábra).



30. ábra 4. számú szerszámmal készített varratok felülnézeti képei a) 80 mm/min;
b) 125 mm/min és c) 170 mm/min előtolás esetében

Az 5.szerszám keskeny varratot hozott létre, úgy látszik, hogy a 125 mm/min előtolással vizsgált hegesztés kedvezőbb varratot hozott létre, mint a másik két esetben (31.ábra).



31. ábra 5. számú szerszámmal készített varratok felülnézeti képei a) 80 mm/min;
b) 125 mm/min és c) 170 mm/min előtolás esetében

5.2. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálatokhoz 3 darab 10 mm széles próbatesteket vágtam ki keresztbe a hegesztett darabokból. A darabolásból származó pontatlanságot korrigálni kellett, szerszám

marógépen (TOS FN20) oldalanként 1-1 mm-t távolítottunk el. Az utómunkálást követően mintadarabok szélessége között maximum 0,2 mm eltérés adódott. (32.ábra)



32. ábra Próbadarabok előkészítése szakítóvizsgálathoz

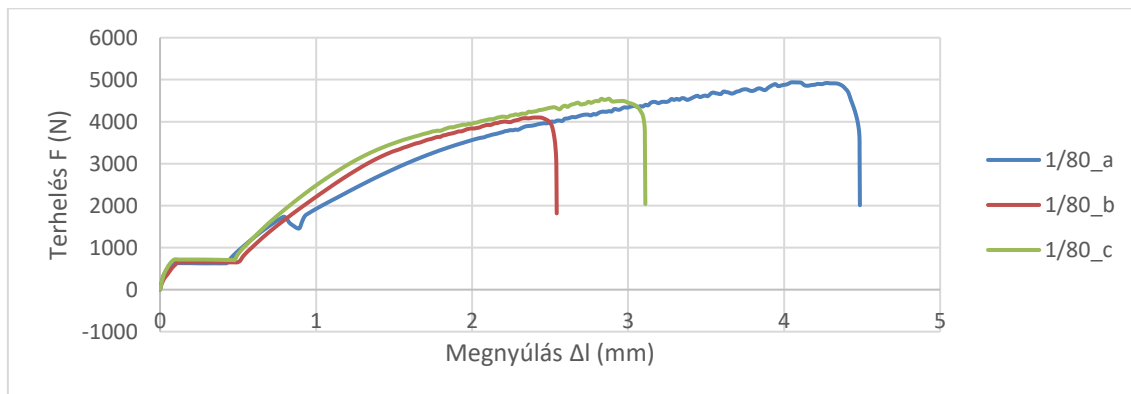
A próbatestek névleges szélessége 8 mm, hossza pedig 98 mm, összesen 36 db próbatest készült el az előkészületek során, 3-3 db a különböző előtolási sebességen (33.ábra).



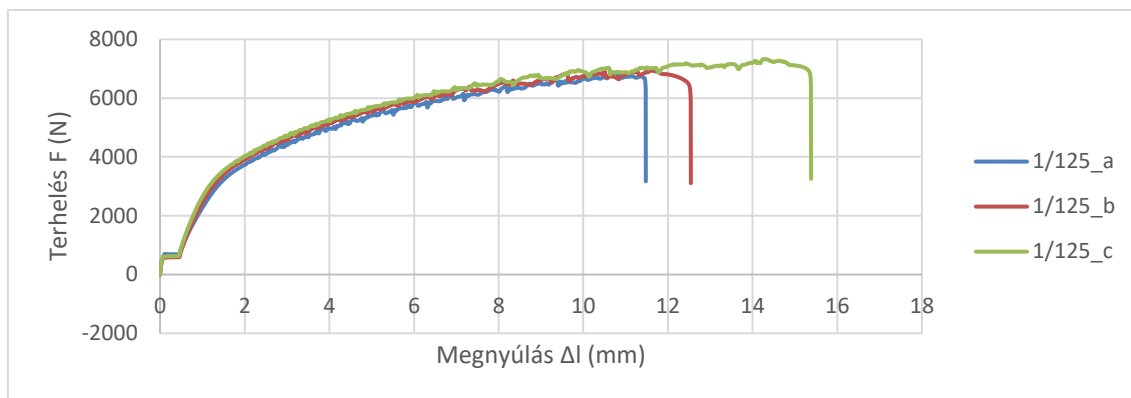
33. ábra Szakítóvizsgálathoz előkészített próbatestek

5.2.1. Szakítóvizsgálat eredményei

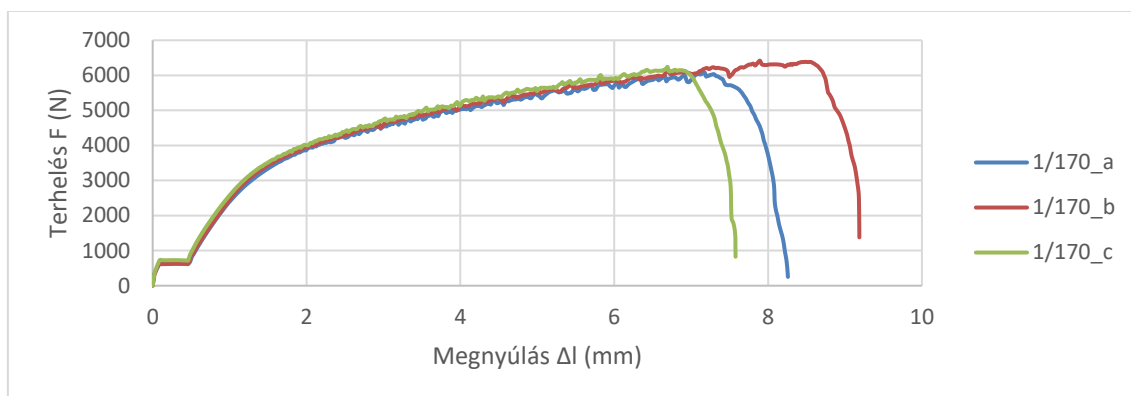
A szakítóvizsgálatot Instron 4482 típusú szakítógépen végeztem, az eredményeket a gép íratta ki táblázatos és grafikus formában. A legnagyobb terhelést az 1/125 és 3/125-ös minták viselték el. A szakítódiagramokat a 34-45.ábrák foglalják össze.



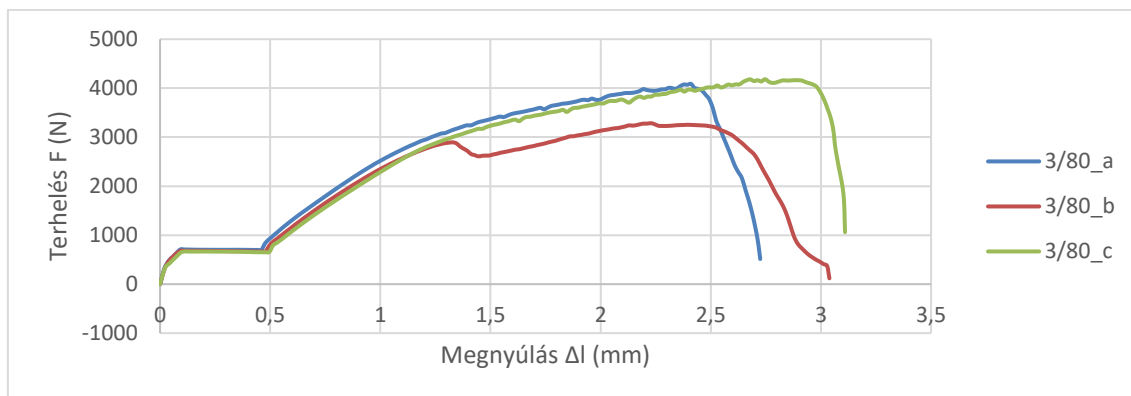
34. ábra 1-számú szerszámmal, 80 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódiagramja



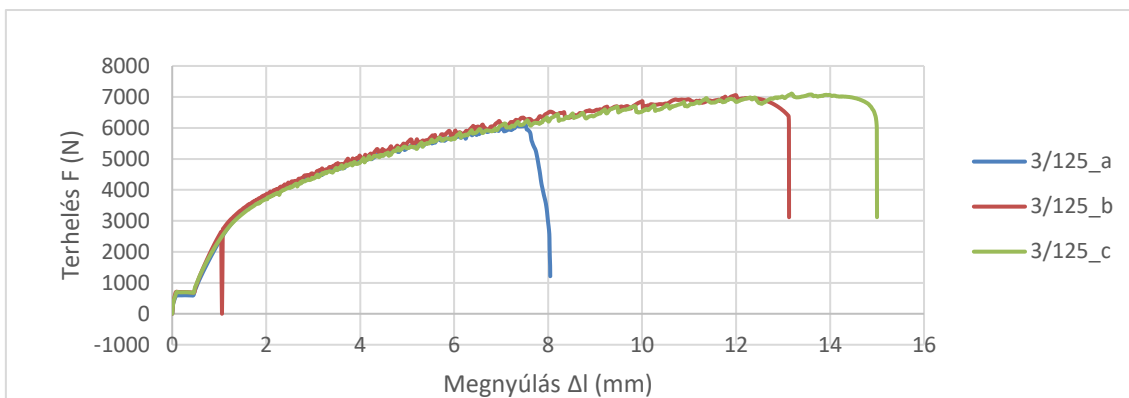
35. ábra 1-számú szerszámmal, 125 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódíagramja



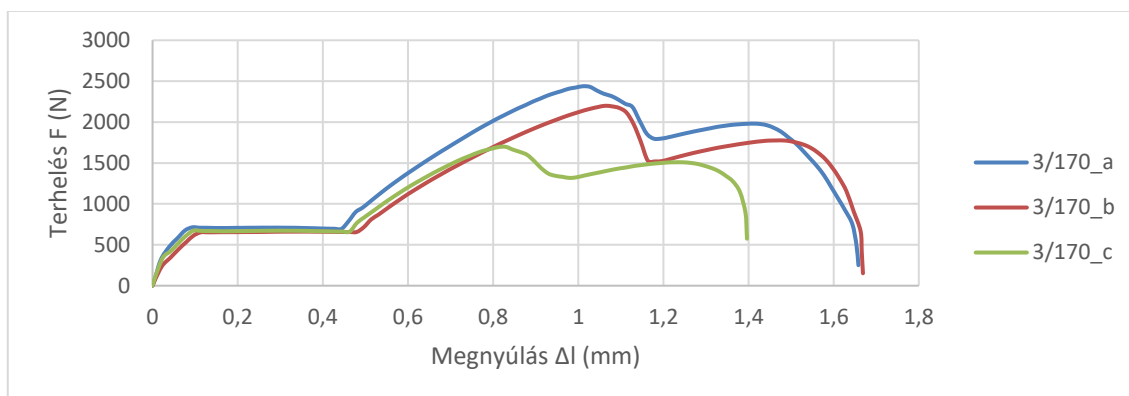
36. ábra 1-számú szerszámmal, 170 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódíagramja



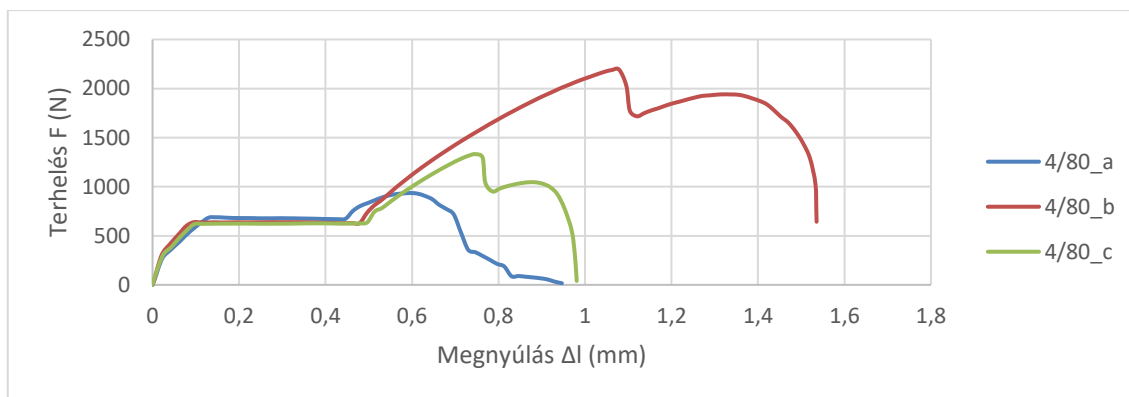
37. ábra Szakítódíagram: 3-számú szerszámmal, 80 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódíagramja



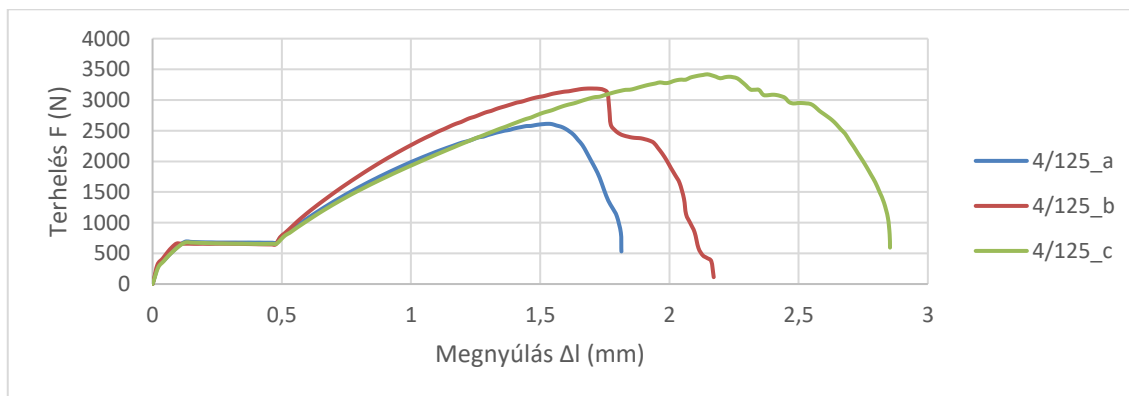
38. ábra 3-számú szerszámmal, 125 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódiagramja



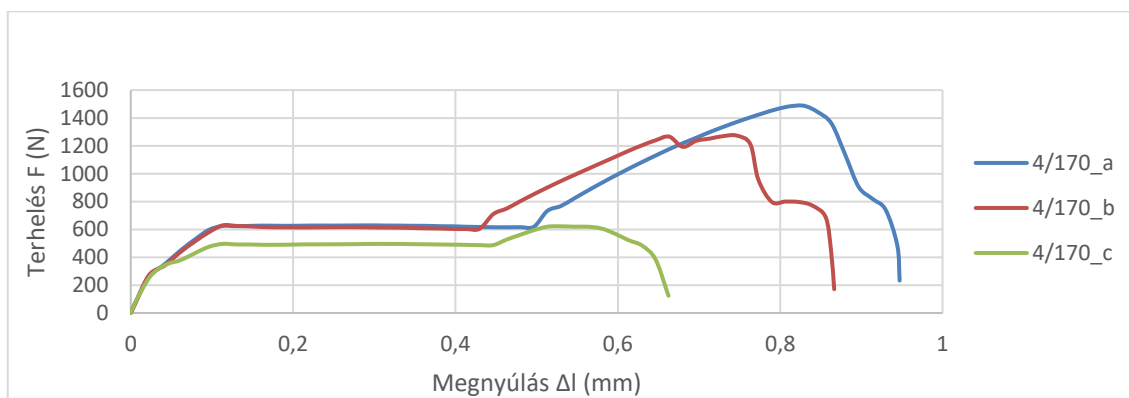
39. ábra 3-számú szerszámmal, 170 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódiagramja



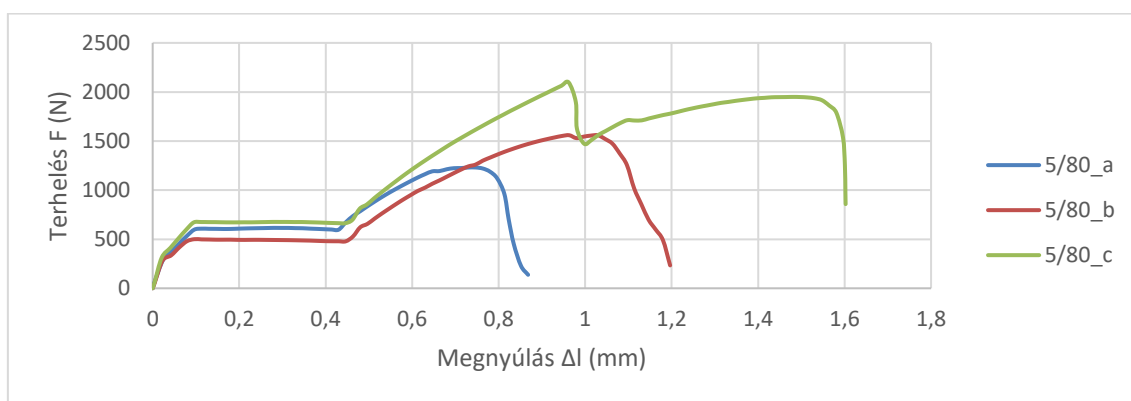
40. ábra 4-számú szerszámmal, 80 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódiagramja



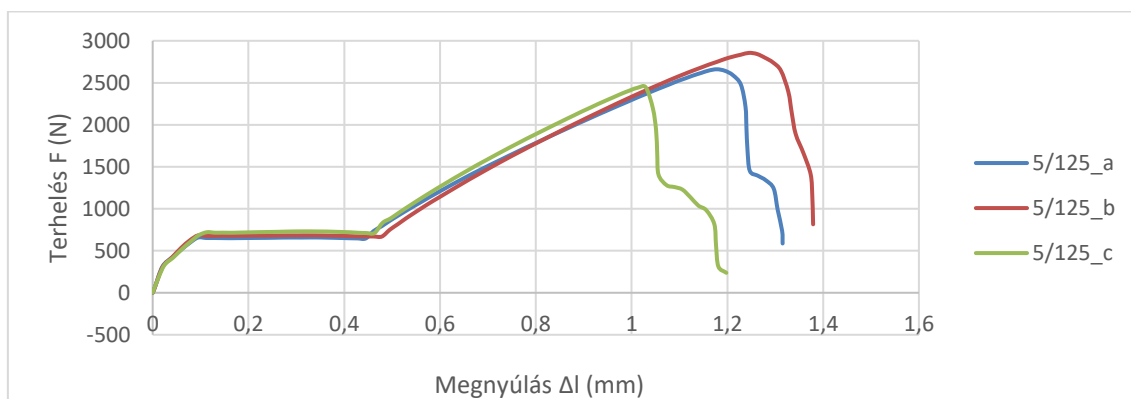
41. ábra 4-számú szerszámmal, 125 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja



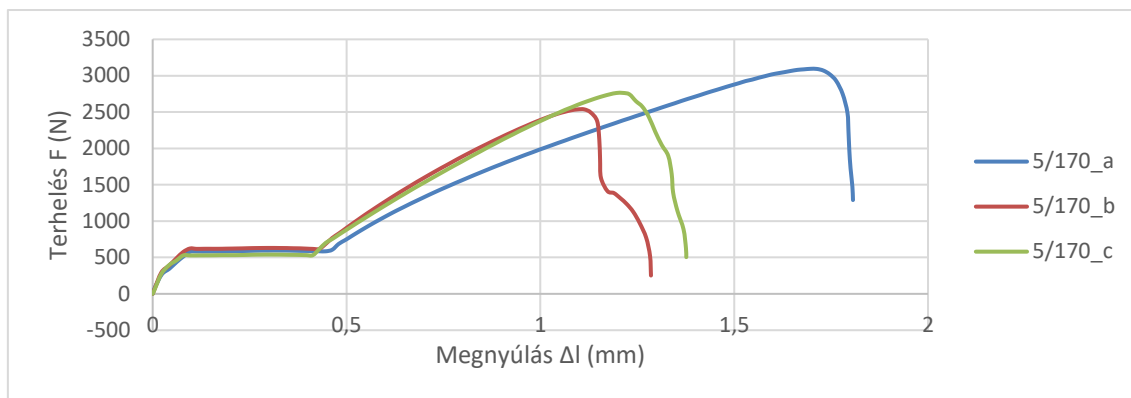
42. ábra 4-számú szerszámmal, 170 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja



43. ábra 5-számú szerszámmal, 80 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja



44. ábra 5-számú szerszámmal, 125 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja



45. ábra 5-számú szerszámmal, 170 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódíagramja

4. táblázat Szakítóvizsgálat eredményei

Próbatest	Max. terhelés (N)	Megnyúlás max. terhelésnél (mm)	Szakítószilárdság maximális terhelésnél [MPa]	Megnyúlás (mm/mm)
1/80_a	4937	4.061	150.50665	0.04134
1/80_b	4100	2.413	124.99220	0.02456
1/80_c	4546	2.879	138.60678	0.02926
1/125_a	6869	10.763	214.66084	0.10983
1_125_b	6946	11.628	211.77710	0.11835
1_125_c	7332	14.280	223.53636	0.14534
1/170_a	6076	7.177	189.88562	0.07305
1/170_b	6414	7.897	195.53830	0.08037
1/170_c	6238	6.694	190.17068	0.06813
3/80_a	4087	2.410	124.60513	0.02453
3/80_b	3286	2.228	100.17283	0.02268
3/80_c	4183	2.746	127.53502	0.02795
3/125_a	6110	7.510	186.26546	0.07644
3/125_b	7060	11.986	215.24190	0.12231
3/125_c	7109	13.177	214.13606	0.13445
3/170_a	2438	1.011	74.32288	0.01029
3/170_b	2199	1.063	67.04485	0.01082
3/170_c	1697	0.830	51.73902	0.00845
4/80_a	935	0.597	28.51645	0.00607
4/80_b	2192	1.079	66.82735	0.01098
4/80_c	1332	0.747	40.60135	0.00760
4/125_a	2612	1.530	79.62585	0.01557
4/125_b	3187	1.694	97.17550	0.01724
4/125_c	3418	2.147	104.22154	0.02185
4/170_a	1486	0.830	45.31751	0.00845
4/170_b	1273	0.747	38.81771	0.00760
4/170_c	623	0.530	18.97957	0.00539
5/80_a	1231	0.747	37.52784	0.00760
5/80_b	1559	0.963	47.54214	0.00980
5/80_c	2097	0.962	63.94639	0.00979
5/125_a	2661	1.178	81.12789	0.01199
5/125_b	2856	1.245	87.08609	0.01267
5/125_c	2444	1.030	74.51592	0.01048
5/170_a	3094	1.697	94.34389	0.01727
5/170_b	2537	1.097	77.34618	0.01116
5/170_c	2763	1.213	84.25103	0.01235

5.3. Varratok metallográfiai vizsgálata

A mikroszkópos vizsgálat is előkészítést igényelt. A munkadarabokból, hasonlóan, mint a szakító próbatestek esetében, 10 mm széles darabokat vágtam, de ezt követően a hegesztési varrat közepétől 20-20 mm távolságban elvágtam a mintákat. Erre azért volt szükség, hogy a varrat közvetlen környezetét is meg tudjam vizsgálni. A mintadarabokat hidegágyazással készítettem elő a vizsgálatokra, amihez egyedi átmérőjű tégelyt használtam, így egy ágyazásban 3 mintát is el tudtam helyezni. Az edényeket 50 mm átmérőjű PVC csövekből készítettem, szalagfűrészszel darabolva, majd utólag csiszolva azokat egyenletes felületűre. 4 edényt készítettem, melyekben az alábbi mintákat helyeztem el: 1-számú edényben az 1/80, 1/125 és 1/170, 3-számú edényben a 3/80, 3/125 és 3/170, a -es számú edényben a 4/80, 4/125 és 4/170, és végül az 5-ös számú edényben 5/80, 5/125 és 5/170-es számú minta található (46.ábra).

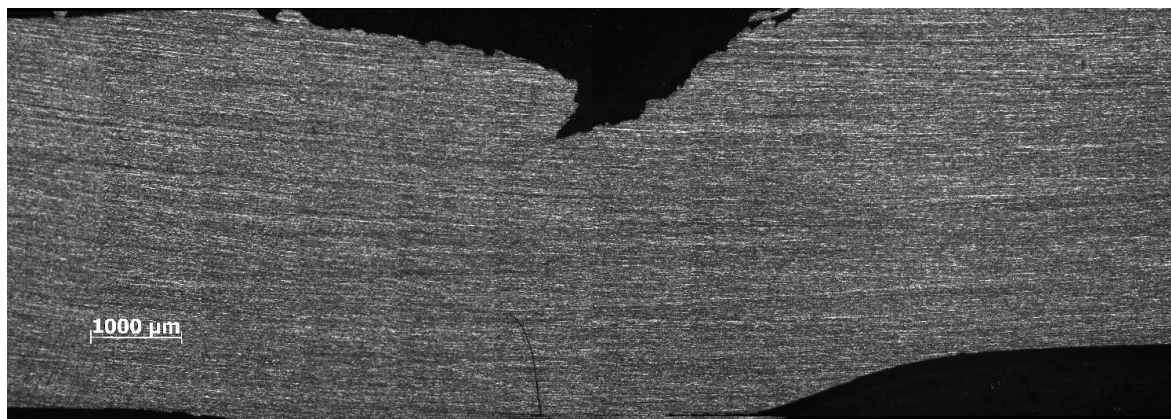
A beágyazott mintákat 3 fázisban csiszoltam, először 320, 600 és 1200-as csiszolópapírral, ezt követően vizsgáltam meg mikroszkóp alatt, hogy feltárjam a lehetséges alagúthibákat.



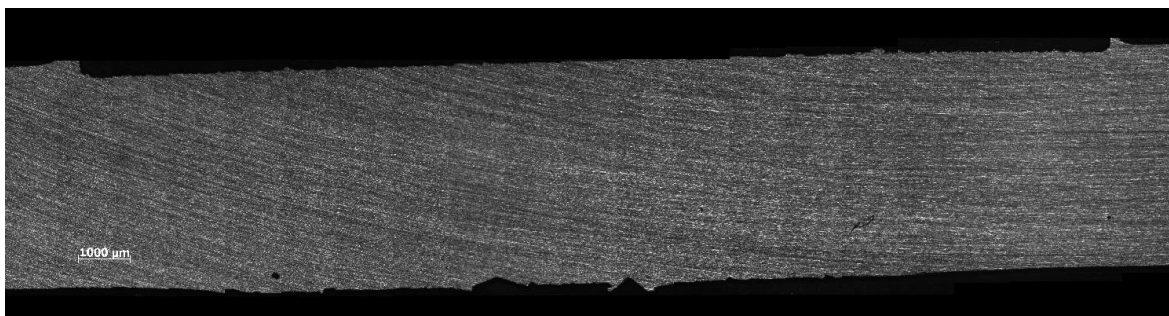
46. ábra Mintadarabok a hidegbeágyazást követően

- a) 1-számú tégely, mely tartalmazza a 1/80, 1/125 és 1/170 -es számú mintát
- b) 3-számú tégely, mely tartalmazza a 3/80, 3/125 és 3/170 -es számú mintát
- c) 4-számú tégely, mely tartalmazza a 4/80, 4/125 és 4/170 -es számú mintát
- d) 5-számú tégely, mely tartalmazza a 5/80, 5/125 és 5/170 -es számú mintát

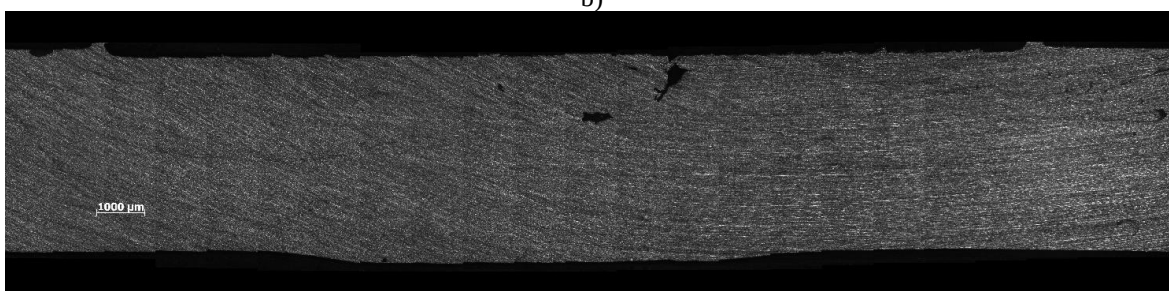
Hibák feltárását vizsgálva megállapíthatjuk, hogy mindegyik varratban találhatunk különböző méretű hibákat. Az összes varratot vizsgálva az 1/125 és a 3/125-ös hegesztés eredményezte a legkisebb hibák kialakulását (47-50. ábra).



a)



b)



c)

47. ábra 1-számú szerszám által hegesztett mintadarab keresztmetszeti képe

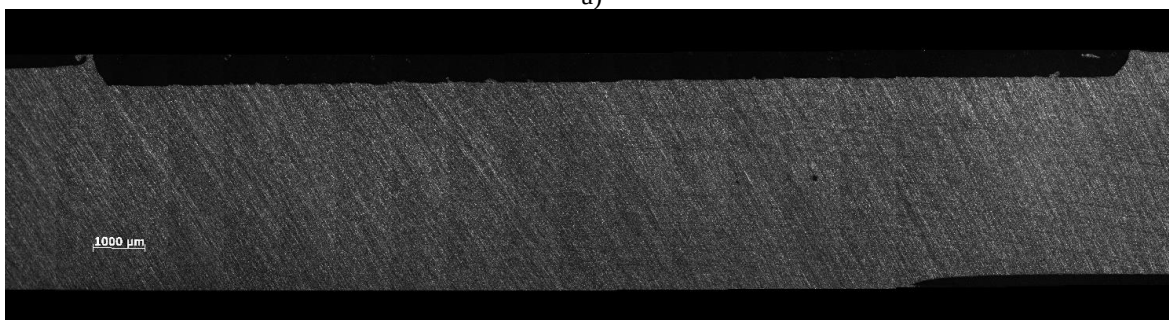
a) 80 mm/min előtolás esetében előtolás esetében

b) 125 mm/min előtolás esetében előtolás esetében

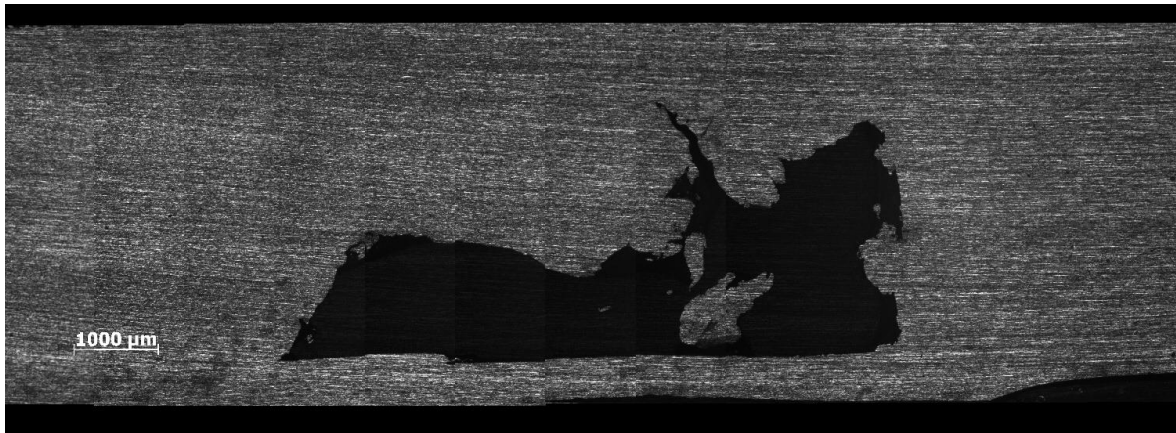
c) 170 mm/min előtolás esetében előtolás esetében



a)



b)



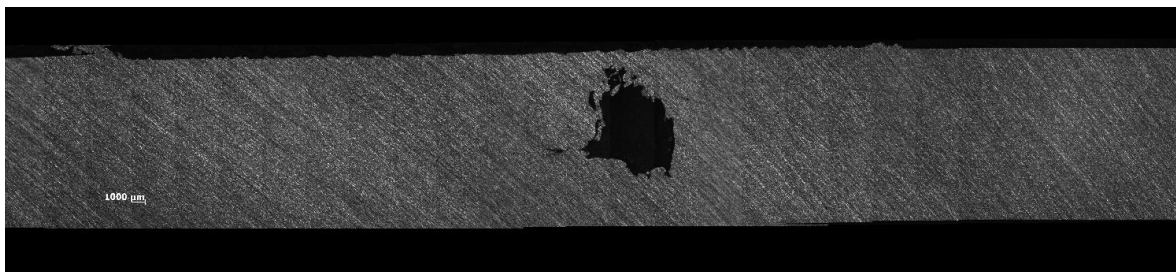
c)

48. ábra 3-számú szerszám által hegesztett mintadarab keresztmetszeti képe

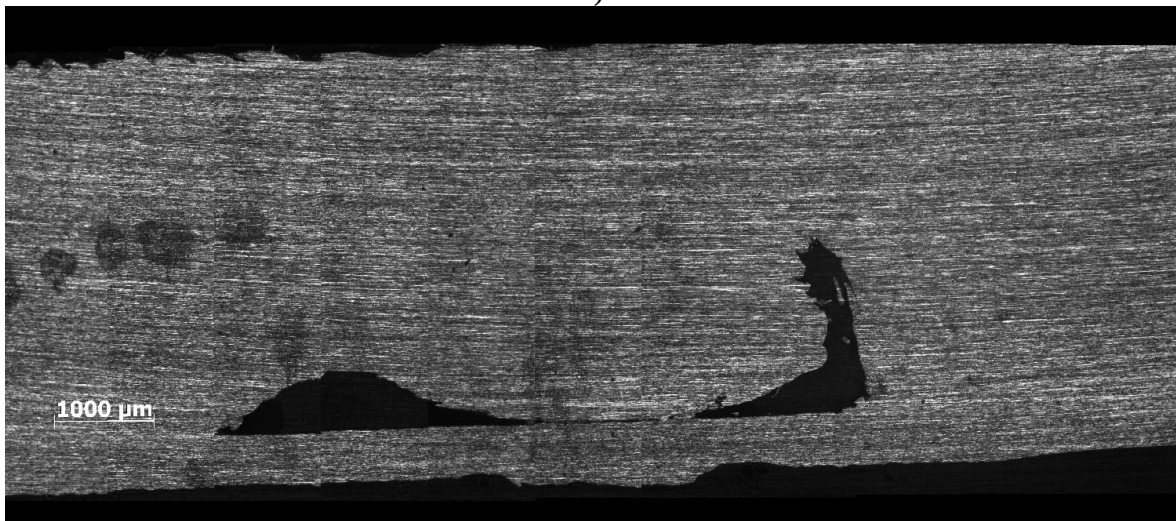
a) 80 mm/min előtolás esetében előtolás esetében

b) 125 mm/min előtolás esetében előtolás esetében

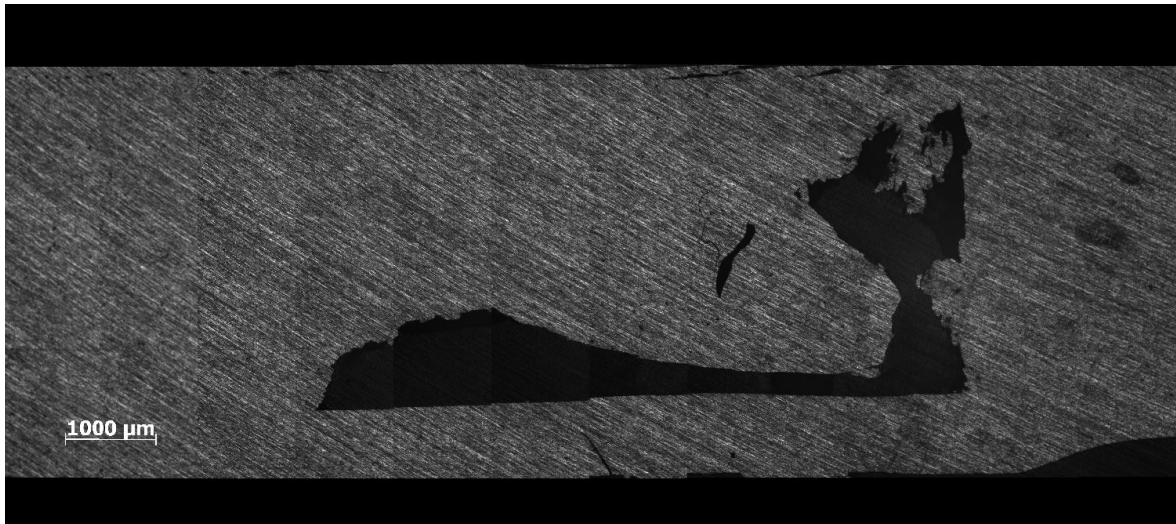
c) 170 mm/min előtolás esetében előtolás esetében



a)



b)



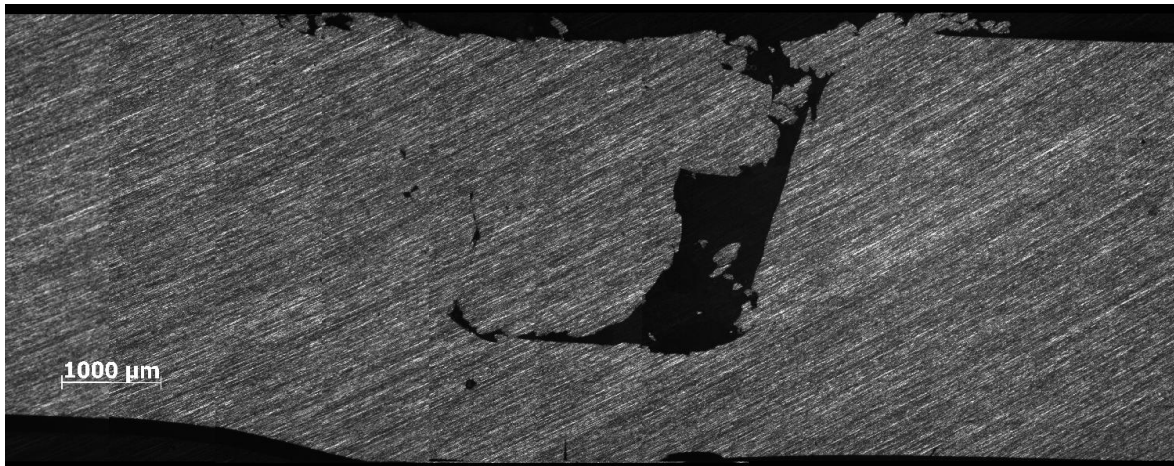
c)

49. ábra 4-számú szerszám által hegesztett mintadarab keresztmetszeti képe

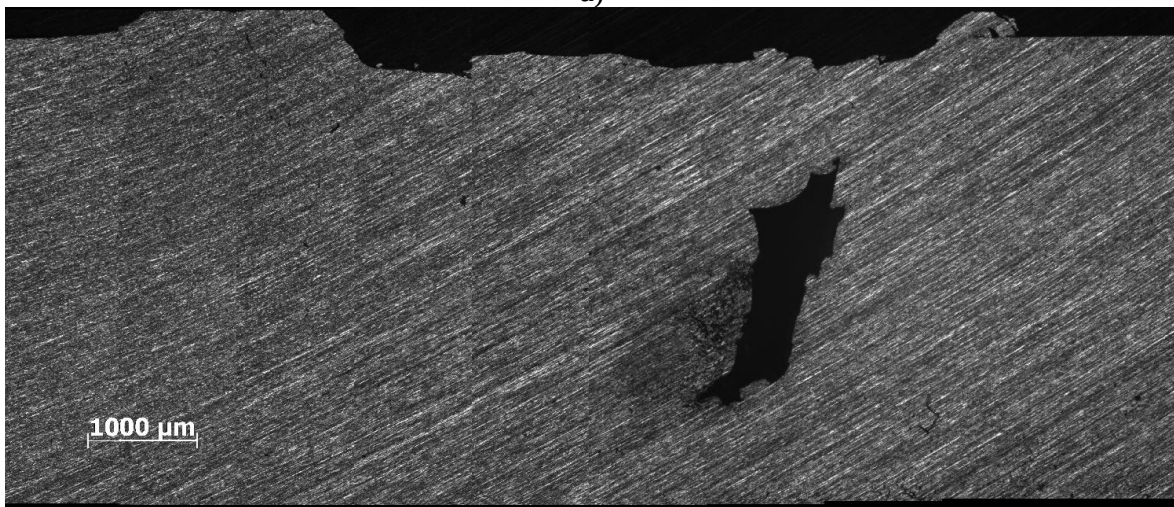
a) 80 mm/min előtolás esetében előtolás esetében

b) 125 mm/min előtolás esetében előtolás esetében

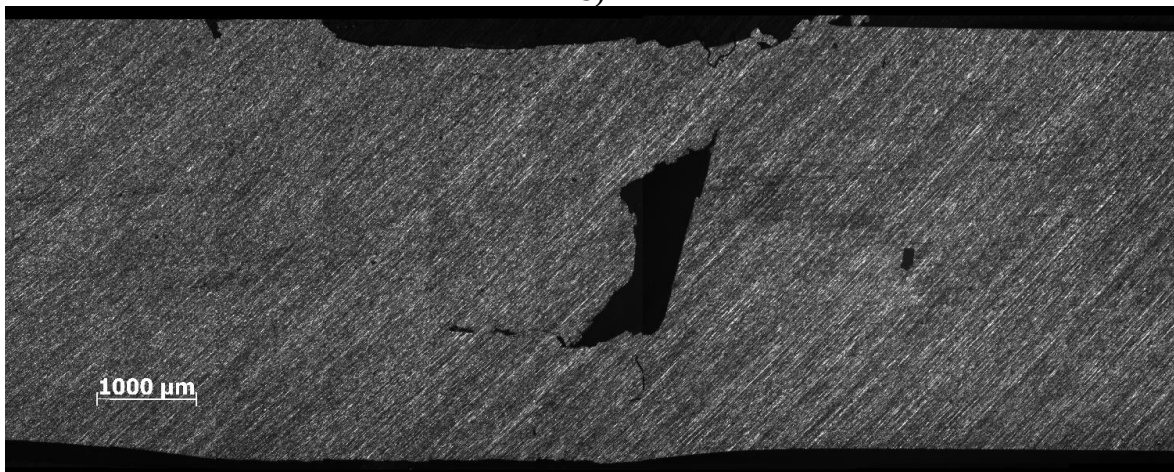
c) 170 mm/min előtolás esetében előtolás esetében



a)



b)



c)

50. ábra 5-számú szerszám által hegesztett mintadarab keresztmetszeti képe

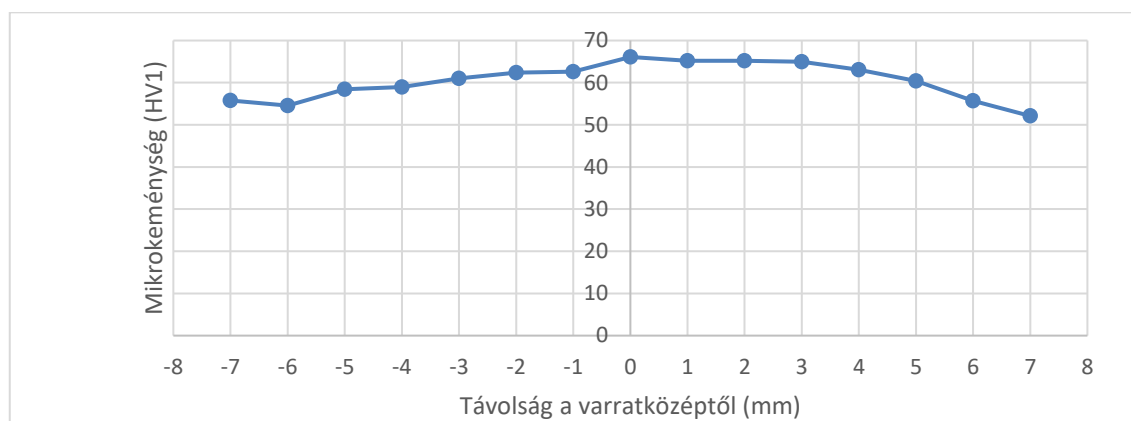
a) 80 mm/min előtolás esetében előtolás esetében

b) 125 mm/min előtolás esetében előtolás esetében

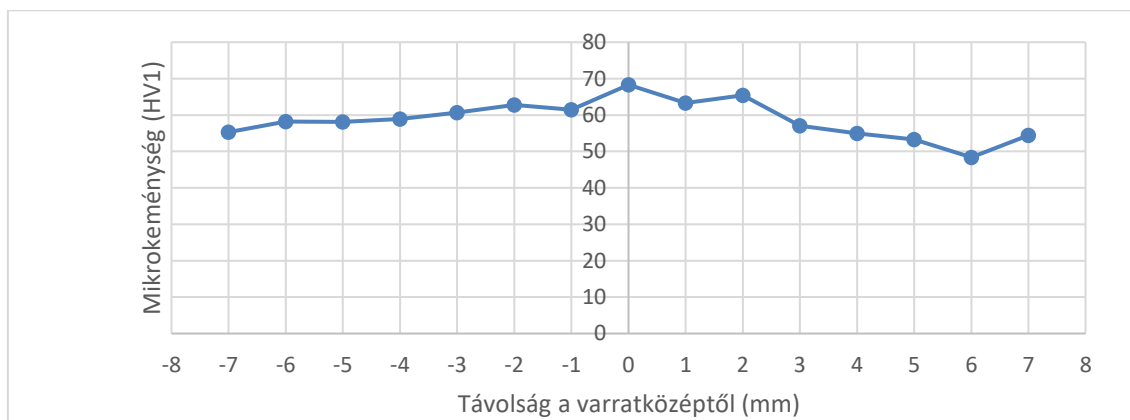
c) 170 mm/min előtolás esetében előtolás esetében

5.4. Keménységmérés

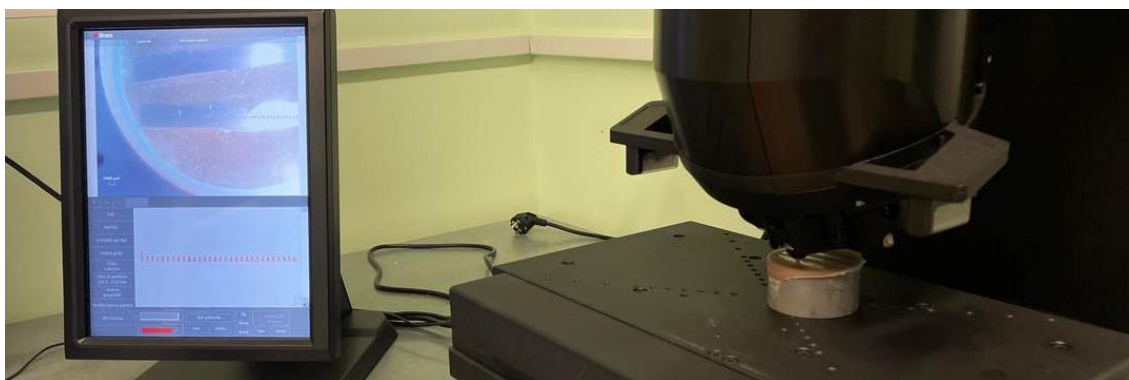
Vickers keménységmérést végeztem a beágyazott mintadarabokon Struers Duramin-100-as típusú gépen (53.ábra). A vizsgálatot az 1/125 és 3/125-ös mintán végeztem el, melyek a korábbi vizsgálatok során a legeredményesebbnek bizonyultak. Terhelésnek 1 kgf-ot határoztam meg. A hegesztendő darabok azonos anyagúak voltak, ezért várható volt, hogy a keménység is közel azonos lesz a mért pontokon, illetve magasabb a varratban. A méréseket a varrat közepétől A mérést a koronaoldalon végeztem vízszintes irányba haladva balról (hátra oldaltól) jobbra (előre oldal felé). (51., 52.ábra) [39]



51. ábra Keménységmérés 1-számú szerszám általi hegesztett mintadarab esetében, előtolás 125 mm/min



52. ábra Keménységmérés 3-számú szerszám általi hegesztett mintadarab esetében, előtolás 125 mm/min



53. ábra Struers Duramin-100 keménységmérő mérés közben

5.5. Eredmények kiértékelése

A vizsgálatok eredményei közül kiemelkedő eredményeket produkált az 1. számú és a 3. számú szerszámmal végzett hegesztés, mindkettő 125 mm/min-es előtoláson. Ezeket a szerszámokat a továbbiakban is érdemes vizsgálni, eltérő hegesztési paraméterek mellett, mint például szerszámdőlés beállítása (1° - 3°). A szerszámokon elhelyezett spirális csatornák javítják az anyagáramlást.

A konkáv váll kialakítását is érdemes tovább vizsgálni, empirikus úton meg találni a legoptimálisabb szerszám váll szöget, ami kedvezően hat a hegesztési varrat kialakulásához.

A 2.szerszám esetében a szerszám túl függőleges irányú bemarkásait kerülni kell ezek mellett a beállítások mellett, egyik előtolási értéken sem felelt meg, viszont érdemes tovább folytatni a kísérleteket, de a hornyokat úgy kell kialakítani, hogy azok mentén az anyag áramlani tudjon a hegesztési folyamat közben.

Keménységmérés esetében HV0,1 -es keménységen is meg kell állapítani az anyagok keménységét.

Összefoglalás

Napjainkban, a kavaró dörzshegesztés kulcsfontosságú szerepet tölt be a fémmegmunkálás területén. Széles körben alkalmazható az űr, - és légi technológia mellett hajózás, és autógyártás szektorban is. A felsorolt területeken kimagasló elvárás a tömeg optimalizálás, így a nagyszilárdságú alumínium ötvözetek kiváltották a nálunk jóval nehezebb, de mechanikai tulajdonságait tekintve hasonló szerkezeti acélokat. Az alumínium használatával elért jelentős tömeg csökkentés a technológia elterjedéséhez vezetett.

Ebben a kutatásban 5053-as alumínium lemezeket hegesztettem kavaró dörzshegesztéssel, melyekhez egyedileg tervezett szerszámokat használtam. A különböző szerszámgeometriák jelentősen befolyásolták a hegesztési varrat keletkezését. A hegesztés állandó 1000 min^{-1} fordulatszámon történt 3 különböző előtolással. A vizsgálatok során felderítettem, mely szerszámgeometriák érdemesek a további fejlesztésekre, újabb kísérletek elvégzésére, más hegesztési paraméterek mellett. A szerszám tervezése során végeselemes szimulációt készítettem a forgó szerszám körüli anyagáramlásról, mely releváns információval szolgál a megfelelő szerszám geometria megtervezéséhez.

A 3D fémnyomtatott szerszámokat a VARINEX Kft. gyártotta le a megkeresésünkre. A hegesztést a Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai Karának Gyártástechnológiai Tanszékén végeztem, majd az Anyagtechnológiai Tanszéken az anyagvizsgálatokra került sor. Az anyagvizsgálatokat szemrevételezéssel, szakítóvizsgálattal, keménységméréssel és az alagúthibák megfigyelése érdekében mikroszkóp alatt is megvizsgáltam.

Az eredmények kiértékelése során megállapítottam, hogy mely szerszámgeometriák teljesítettek jól a megadott paraméterek mellett, de számos lehetőség van az eredmények további fejlesztésre. A kutatást több irányban is érdemes tovább vizsgálni, mint például az eredményes szerszámgeometriákat felhasználni új hegesztési paraméterek mellett, vagy kísérletezni a konkáv váll kialakítás lehetőségével.

A kutatás folytatásában a metallográfiai vizsgálatok előtt az alumínium próbadarabokat maratom, hogy a varrat, a hőhatásövezet és az anyagok keveredése is vizsgálható legyen. Emellett külön figyelmet igényel a végeselemes szimulációk létrehozása is, melyek elősegítik a szerszám tervezésének folyamatát.

Summary

Nowadays friction stir welding has a key role in the field of metal manufacturing. It can be applied in a wide range like space- and air industry also in the sectors of ship and automotive industry. In these fields the weight optimization is an expectation so the high tensile aluminium alloys are triggered the structural steels which had more weight but similar mechanical properties. By the weight reduction caused by aluminium made the technology became spreaded widely.

In my research I stir welded aluminium 5053 alloy plates where I used customized tools, which were engineered by me. The different tool geometries had large effects for the welded seams. All weldings are made with 1000 RPM and with three different feed motions. During the research I discovered which tool geometries needs other developments, new experiments with other welding parameters. While I designed the tool, I did FEA experiments, where I examined the material flow around the tool which gives relevant information about the best design geometry.

The 3D printed tools made by Varinex Kft. according to our wishes. The weldings made at John von Neumann University's faculty of GAMF's Production and Material Technology department, and the material experiments made at the Material science department. The material investigations were visual inspections, tensile tests, hardness tests for the investigation of tunnel errors I used microscopic observations.

For the evaluations of the results I established which tool geometries performed well with the parameters but there are several options for development. There are several ways to go then for example the good tools should be used with other welding parameters or attempting with concave shoulder geometry.

By continuation of the research I will etch the aluminium specimens for metallographic observations where I would see the material's heat affected zone and the mixing of the materials. The finite elements analyses also needed to help the tool's designing process.

Ábrajegyzék

1. ábra Kavaró dörzshegesztés lépései a) anyagba történő süllyesztés b) kavarás c) kiemelés [11]	6
2. ábra FSW szerszám fő paraméterei [11]	8
3. ábra a) Szerszám váll kialakítások: Sima, Konkáv, Konvex (balról jobbra haladva);	9
4. ábra Tű geometriák a) egyenes, sima felületű b) Trapéz keresztmetszetű, sima felületű c) Egyenes, menettel ellátva d) Trapéz keresztmetszetű, menettel ellátva [15]	10
5. ábra a) Nincs csatorna kialakítva b) 1,8 mm mély csatorna c) 2,6 mm csatorna [18]	10
6. ábra Méretezett szerszám műszaki rajz [19]	11
7. ábra "Bobbin" szerszámmal történő megmunkálás sematikus ábrázolása [20] látható legyen az írás	11
8. ábra A hegesztési varrat hőmérséklet (C°-ban) -eloszlása szimulációs vizsgálattal $n=350 \text{ min}^{-1}$ fordulatszámnál [19]	12
9. ábra Kavaró dörzshegesztés közben fellépő erők sematikus ábrázolása [24]	13
10. ábra Szerszám dőlésszögének beállítása a) elől nézet b) oldalnézet [18]	14
11. ábra Metallográfia útján történő mikroszerkezeti vizsgálat képei különböző előtolási sebességek esetében [31]	15
12. ábra Alagúthiba [8]	16
13. ábra Az anyag keveredése a szerszám körül ($vh = \text{hegesztési sebesség}, \omega = \text{szögsebesség}$) [8]	16
14. ábra Kavaró dörzshegesztés által létrehozott hegesztett kötés keresztmetszeti képe [8]	17
15. ábra Xact Metal 200G fémnyomtató paraméterei [37]	19
16. ábra EML-850 5AX-5 tengelyes megmunkáló központ műszaki adatai [38]	20
17. ábra FSW szerszámok a) 1.-számú szerszám b) 2.-számú szerszám c) 3.-számú szerszám d) 4.-számú szerszám e) 5.-számú szerszám	21
18. ábra 1.-számú szerszám keresztmetszeti képe, szemléltetve a szerszám tű, és váll kialakítását	21
19. ábra 1.-számú szerszám a) felülnézeti b) keresztmetszeti képe, szemléltetve a szerszám tű, és váll kialakítását	22
20. ábra 3.-számú FSW szerszám oldalnézeti képe	22
21. ábra 4.-számú szerszám a) felülnézeti és b) keresztmetszeti képe	23
22. ábra 5.-számú szerszám a) felülnézeti és b) keresztmetszeti képe	24
23. ábra FSW szerszám befogása az egyedi befogó készülékbe, keresztmetszeti kép.	25
24. ábra Összeállított FSW szerszám BT50-es befogóban	25
25. ábra Mintadarabok hegesztendő felületének simítása	26
26. ábra Kísérlet elrendezése	27
27. ábra 1. számú szerszámmal készített varratok felülnézeti képei a) 80 mm/min; b) 125 mm/min és c) 170 mm/min előtolás esetében	28
28. ábra 2. számú szerszámmal készített varratok felülnézeti képei a) 80 mm/min; b) 125 mm/min és c) 170 mm/min előtolás esetében	28
29. ábra 3. számú szerszámmal készített varratok felülnézeti képei a) 80 mm/min; b) 125 mm/min és c) 170 mm/min előtolás esetében	29
30. ábra 4. számú szerszámmal készített varratok felülnézeti képei a) 80 mm/min; b) 125 mm/min és c) 170 mm/min előtolás esetében	29
31. ábra 5. számú szerszámmal készített varratok felülnézeti képei a) 80 mm/min; b) 125 mm/min és c) 170 mm/min előtolás esetében	29

32. ábra Próbadarabok előkészítése szakítóvizsgálathoz.....	30
33. ábra Szakítóvizsgálathoz előkészített próbatestek	30
34. ábra 1-számú szerszámmal, 80 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja	30
35. ábra 1-számú szerszámmal, 125 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja	31
36. ábra 1-számú szerszámmal, 170 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja	31
37. ábra Szakítódigram: 3-számú szerszámmal, 80 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja	31
38. ábra 3-számú szerszámmal, 125 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja	32
39. ábra 3-számú szerszámmal, 170 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja	32
40. ábra 4-számú szerszámmal, 80 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja	32
41. ábra 4-számú szerszámmal, 125 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja	33
42. ábra 4-számú szerszámmal, 170 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja	33
43. ábra 5-számú szerszámmal, 80 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja	33
44. ábra 5-számú szerszámmal, 125 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja	33
45. ábra 5-számú szerszámmal, 170 mm/min-es előtolással hegesztett mintadarab szakítódigramja	34
46. ábra Mintadarabok a hidegbeágyazást követően a) 1-számú tégely, mely tartalmazza a 1/80, 1/125 és 1/170 -es számú mintát b) 3-számú tégely, mely tartalmazza a 3/80, 3/125 és 3/170 -es számú mintát c) 4-számú tégely, mely tartalmazza a 4/80, 4/125 és 4/170 -es számú mintát d) 5-számú tégely, mely tartalmazza a 5/80, 5/125 és 5/170 -es számú mintát	35
47. ábra 1-számú szerszám által hegesztett mintadarab keresztmetszeti képe a) 80 mm/min előtolás esetében előtolás esetében b) 125 mm/min előtolás esetében előtolás esetében c) 170 mm/min előtolás esetében előtolás esetében.....	36
48. ábra 3-számú szerszám által hegesztett mintadarab keresztmetszeti képe a) 80 mm/min előtolás esetében előtolás esetében b) 125 mm/min előtolás esetében előtolás esetében c) 170 mm/min előtolás esetében előtolás esetében.....	37
49. ábra 4-számú szerszám által hegesztett mintadarab keresztmetszeti képe a) 80 mm/min előtolás esetében előtolás esetében b) 125 mm/min előtolás esetében előtolás esetében c) 170 mm/min előtolás esetében előtolás esetében.....	38
50. ábra 5-számú szerszám által hegesztett mintadarab keresztmetszeti képe.....	39
51. ábra Keménységmérés 1-számú szerszám általi hegesztett mintadarab esetében, előtolás 125 mm/min	40
52. ábra Keménységmérés 3-számú szerszám általi hegesztett mintadarab esetében, előtolás 125 mm/min	40
53. ábra Struers Duramin-100 keménységmérő mérés közben.....	40

Irodalomjegyzék

- [1] Michael H., Stefan B., Sven S.: INFLUENCE OF SURFACE ROUGHNESS OF TOOLS ON THE FRICTION STIR WELDING PROCESS Journal of Welding and Joining 32(6) 2014. pp. 22-28, DOI:10.5781/JWJ.2014.32.6.22
- [2] Kovács Zsolt Ferenc, Hareancz Ferenc: A KAVARÓ DÖRZSHEGESZTÉS ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI ALUMÍNIUM KOMPOZITOK ESETÉN, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország Gradus Vol 8, No 1 2021. pp. 294-298
<https://doi.org/10.47833/2021.1.ENG.011>.
- [3] Kovács Zsolt Ferenc: Acéllemez kavaró dörzshegesztése, Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét. Hegesztés Technika XXXIV.évfolyam 2023/1 pp 51-53
- [4] Prof. Bharat Raj Singh: A Hand Book on Friction Stir Welding (2012), DOI: 10.13140/RG.2.1.5088.6244; pp. 3-7, 69, 72-74, 90-104
- [5] S. Tarasov, A. Amirov, A. Chumaevskiy, N. Savchenko, V.E Rubtsov, A. Ivanov, E. Moskvichev, E. Kolubaev: Friction Stir Welding of Ti-6Al-4V Using a Liquid-Cooled Nickel Superalloy Tool Technologies, MDPI, 10, 118 2022. pp 1; 13-14
DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies10060118>
- [6] Zöld Zoltán: Kavaró dörzshegesztéssel készült vegyes kötések vizsgálata (2018), Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Kecskemét pp 17-18
- [7] Oyedemi. K, Adonyi. Y and Wang. P: Effect of Intermetallics on Aluminum-to-Steel Friction Stir Weld Properties. LeTourneau University. Metals 2023, 13(4), p 768
- [8] Meilinger Ákos: A lineáris dörzshegesztés technológiai paramétereinek optimalizálása (2016), Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola, Miskolc p. 14, 46
- [9] KUKA. (2024.10.). <https://www.kuka.com/en-de/products/fsw>
- [10] Meilinger Ákos, Imre Török. THE IMPORTANCE OF FRICTION STIR WELDING TOOL (2013), University of Miskolc, Department of Mechanical Technology pp 26, 34
- [11] M. K. Bilici: Effect of tool geometry on friction stir spot welding of polypropylene sheets (2012), Marmara University, Technical Education Faculty, Department of Materials Technology, 34722 Istanbul, Turkey. Express Polymer Letters Vol 6. No 10 2012. pp 805-807
DOI: 10.3144/expresspolymlett.2012.86
- [12] Thanatkij S., Rapeepan P., Kanchana S., Worapot S., Parama K.: Combined Response Surface Method and Modified Differential Evolution for Parameter Optimization of Friction Stir Welding 2020. p 779
- [13] N. Dialami, M. Cervera and M. Chiumenti, "Effect of the Tool Tilt Angle on the Heat Generation and the Material Flow in Friction Stir Welding. Materials, vol 9 2019. pp. 1-27

- [14] Krishna Kishore Mugada, Kumar Adepu: Role of Tool Shoulder End Features on Friction Stir Weld Characteristics of 6082 Aluminum Alloy (2017), The Institution of Engineers (India). <https://doi.org/10.1007/s40032-018-0451-9> pp 1-8
- [15] Mohd. Atif W., Zahid A. K., Arshad Noor S.: Review on underwater friction stir welding: A variant of friction stir welding with great potential of improving joint properties (2016), Department of Mechanical Engineering, Jamia Millia Islamia, New Delhi, India pp 195-196
- [16] O.P. Abolusoro, E.T. Akinlabi, S.V. Kailas: Impact of tool profile on mechanical behavior and material flow in friction stir welding of dissimilar aluminum alloys, *Materialwiss. Werkstofftech.* 2020, 51, pp 725–731.
DOI 10.1002/mawe.202000002.
- [17] Kovács Patrik: Kavaró dörzshegesztés különböző szerszámainak kísérleti úton történő vizsgálata (2021), Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Kecskemét pp 19, 46
- [18] Max Hossfeld: Modeling Friction Stir Welding: On Prediction and Numerical Tool Development *Metals* 12(9) 2022. pp 1-15.
<https://doi.org/10.3390/met12091432>
- [19] Mohamed R, Hong Liu, Guan-Jun Yang, Mohamed M. Z. A.: Friction Stir Welding of 1Cr11Ni2W2MoV Martensitic Stainless Steel: Numerical Simulation Based on Coupled Eulerian Lagrangian Approach Supported with Experimental Work, *Appl. Sci.* 2021, 11(7), 3049 pp 2-4
<https://doi.org/10.3390/app11073049>
- [20] TWI-GLOBAL, Bobbin tool friction stir welding developed (2024.10)
<https://www.twi-global.com/media-and-events/insights/bobbin-tool-friction-stir-welding>
- [21] Lingaraju D., . Harsha C., N. Siram: Development of bobbin tool and influence of its design parameters on FSW joint (2022), *Materials Today: Proceedings*
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.363>
- [22] Mohamed M.Z.A, Kamel T., Mohamed M.E-S.S, Ibrahim A., Mohamed I.A.H: Bobbin Tool Friction Stir Welding of Aluminium: Parameters Optimization Using Taguchi Experimental Design (2022), <https://doi.org/10.3390/ma15082771>
- [23] Kayode O., Yoni A., Scott J. A. : Intermetallic Effects in Aluminium-to-Steel Friction Stir Welds (2017), LeTourneau University; pp
- [24] [Nuno M., Pedro N., Altino L., António Paulo M.: Machines and control systems for friction stir welding: A review (2016), *Materials and Design.*
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.124> pp 256-297
- [25] Mistry Hiten J , Marathe Shalin P: FRICTION STIR WELDING (FSW) 2016. pp 1-2
<https://www.researchgate.net/publication/312599917>

- [26] Abiodun A., Tunde I., Taiwo E.: A MOBILE FIXTURE SYSTEM FOR FRICTION STIR WELDING APPLICATION 2022. pp. 97-98
DOI: <https://doi.org/10.14232/analecta.2022.1.97-109>
- [27] Sun, Y., Gong, W., Feng, J., Lu, G., Zhu, R., & Li, Y.: A Review of the Friction Stir Welding of Dissimilar Materials between Aluminum Alloys and Coppe. *Metals* 12(4):675 2022., pp 3-4
DOI:10.3390/met12040675
- [28] D. S. Meshram and M. Reddy, "Influence of Tool Tilt Angle on Material Flow and Defect Generation in Friction Stir Welding of AA2219, (2018)" *SemanticScholar*, pp. 512-518
- [29] H. Takahara, Y. Okawa, M. Tsujikawa, Y. Marutani, K. Higashi and S. Oki, "Influence of Contineous Transversal Inclination of Tool on FSW Joints (2007)" *Scientific*, pp. 3850-3855
- [30] Laska, A.; Szkodo, M.; Koszelow, D.; Cavaliere, P. Effect of Processing Parameters on Strength and Corrosion Resistance of Friction Stir-Welded AA6082. *Metals* (2022), 12,192.
<https://doi.org/10.3390/met12020192> p 1
- [31] Hang Z., Yu meng S., Wen biao G., Heng C.: Growth mechanism and motion trajectory of lazy "S" in friction stir welding joint of 6082 T6 aluminum alloy (2021), *SN Applied Sciences* 3:278. pp 1-4,9
<https://doi.org/10.1007/s42452-021-04198-z>.
- [32] Klages, Holli K.: The "Lazy S" feature in Friction Stir Welding of AA2099 Aluminum-Lithium alloy (2007), Monterey, California. Naval Postgraduate School. pp 11-19
- [33] Omar S. Saliha,* , Hengan Oua,* , Xingguo Weib , W. Suna. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA6092/ SiC metal matrix composite (2019), *Materials Science & Engineering A*. pp 78-80
- [34] William D. Lockwood, Borislav Tomaz, A.P. Reynolds. Mechanical response of friction stir welded AA2024: experiment and modeling (2002), Department of Mechanical Engineering, Uniersity of South Carolina, 300 Main Street, Columbia, SC 29208, USA. pp 349 – 350
- [35] J. Luo, H. Wang, W. Chen, L. Li: Study on anti-wear property of 3D printed-tools in friction stir welding by numerical and physical experiments. *Int J Adv Manuf Technol* (2015) 77. pp 1782-1789
DOI 10.1007/s00170-014-6571-3
- [36] Kadaganchi, R. – Reddy, G. M. – Rao, A. V.: 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*, 67(5), 2014, pp. 769-780.
DOI: 10.1007/s12666-014-0401-z.

[37] Xact Metal (2024.11) <https://xactmetal.com/XM200G-affordable-metal-3d-printing/>

[38] IJAT (2024.11) <https://ijat.hu/>

[39] Kovács Zs.F.; Hareancz F.: A kavará dörzshegesztés alkalmazási lehetőségei alumínium kompozitok esetén. Gradus Vol 8, No 1 (2021) p.297
<https://doi.org/10.47833/2021.1.ENG.011>

Mellékletek

