

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



A LINEÁRIS DÖRZSHEGESZTÉS TECHNOLÓGIAI PARAMÉTEREINEK OPTIMALIZÁLÁSA

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

KÉSZÍTETTE:

MEILINGER ÁKOS

OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK, EWE/IWE MÉRNÖK

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY, GYÁRTÁSI RENDSZEREK ÉS FOLYAMATOK TÉMATERÜLET
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY ÉS MECHANIKAI TECHNOLÓGIA TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ

DR. TISZA MIKLÓS

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

TÉMACSOPORT VEZETŐ

DR. TISZA MIKLÓS

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

TUDOMÁNYOS VEZETŐ

DR. TÖRÖK IMRE

PHD, c. EGYETEMI TANÁR

Miskolc

2016

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG

- elnök: **Prof. Dr. Jármai Károly**
DSc, egyetemi tanár (ME)
- titkár: **Dr. Bányainé dr. Tóth Ágota**
PhD, egyetemi docens (ME)
- tagok: **Horváthné Dr. Varga Ágnes**
CSc, egyetemi tanár (ME)
- Dr. Bagyinszki Gyula**
CSc, egyetemi docens (OE)
- Dr. Gremesperger Géza**
CSc, ny. főiskolai tanár (DUE)

HIVATALOS BÍRÁLÓK

- Dr. Szigeti Ferenc**
CSc, főiskolai tanár (NYE)
- Dr. Végvári Ferenc**
CSc, ny. főiskolai tanár (KF)

1. BEVEZETÉS

1.1 ELŐZMÉNYEK

A fémes alapanyagok felhasználását tekintve az iparban egyre szélesebb körben használják az alumíniumot és ötvözeit. Ez a tendencia különösen jellemző a járműipari alkalmazásokra, mint például a gépjárművek, a vasúti kocsik felépítményei, vázszerkezetei és karosszéria elemei [1], [2]. A modern nagyszilárdságú alumíniumötvözetek mechanikai tulajdonságai eléri a hagyományos szerkezeti acélokét, viszont tömegük csak közel harmada az acélokénak. Ez a jelentős tömegcsökkenés indokolja az alumíniumötvözetek elterjedését [3], mivel a kisebb saját tömeggel rendelkező járművek üzemanyag fogyasztása mérséklődik, így kisebb az üzemeltetési költség és a környezetvédelem szempontjából is előnyös. A tömegcsökkentés mellett a biztonság növelése is igényként jelenik meg [4], ami jól átgondolt tervezéssel és a gyártásnál használt mechanikai technológiák pontos alkalmazásával megvalósítható. Ezen mechanikai technológiák közül kiemelt jelentőségű a hegesztés.

Alumíniumötvözetek hegesztése esetében csak egy nagyon szűk paramétertartományban lehet biztosítani az elvárt minőséget, ami így is a legtöbb esetben nem éri el az alapanyag minőségét. Ez elsősorban a szilárdsági és az alakváltozási tulajdonságokra igaz, ami általában az alkalmazott hegesztési hőciklus következménye. Ráadásul a minőség mellett a termelékenység növelésére is egyre nagyobb az igény a gyártók részéről, aminek többek között korlátot szab az alkalmazott hegesztő eljárás. Ezt felismerve egyre inkább előtérbe kerül a hegesztő eljárások fejlesztése kiemelten az alumíniumötvözetekhez. Az alapvető cél természetesen a hegesztett kötések – széles értelemben vett - minőségének javítása a termelékenység növelése mellett. Mivel a hegesztési hőciklus szerepe a fontos, így a kis hőbevitelű, jellemzően sajtoló hegesztő eljárások jöhetnek szóba. Ezen eljárások rendkívül jó kötés minőséget biztosítanak, viszont jellemzően komoly geometriai korláttal rendelkeznek, így kevésbé elterjedtek. Erre jelenthet megoldást egy új sajtoló hegesztő eljárás: a lineáris dörzshegesztés.

1.2 CÉLKITŰZÉS

Tekintettel arra, hogy a lineáris dörzshegesztés egy viszonylag új hegesztő eljárás, így számos területen lehetséges annak fejlesztése. Természetesen ezek közül kiemelten érdemes foglalkozni a hegesztett kötés szilárdságnövelési lehetőségeivel, hiszen sajtolóhegesztő eljárás révén más, különleges módszerek állhatnak rendelkezésünkre, mint a megszokott ömlesztő hegesztő eljárásoknál. Amennyiben megértjük a lineáris dörzshegesztés során lejátszódó folyamatokat, úgy a szilárdságnövelés eléréséhez szükséges technológiai paraméter optimalizálást is el tudjuk végezni. A hegesztő eljárásokat tekintve ez az egyik legintenzívebben

kutatott terület nemzetközi szinten, komoly szakirodalmi háttérrel, viszont még mindig vannak kevésbé tisztázott, kevésbé kidolgozott vagy feltárt részek.

Attól függetlenül, hogy a lineáris dörzshegesztéskor lejátszódó folyamatok még nem teljesen feltártak, az eljárást már számos helyen használják az iparban. Jellemzően olyan gyártmányoknál, ahol hosszú egyenes varratokat kell készíteni alumíniumötvözetekből gyártott szerkezeti elemeknél, mint például a vasúti kocsi-, a hajó-, repülőgép- vagy hídgyártás [5], [6]. Ezen szerkezetek üzemeltetése során különböző igénybevételek léphetnek fel, melyek közül meghatározó az ismétlődő igénybevétel. Ebből adódóan elkerülhetetlen a lineáris dörzshegesztéssel készült kötések ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállásának vizsgálata, mivel itt jellemzően más folyamatok játszódnak le hegesztés során, mint az ömlesztő hegesztő eljárásoknál, így az ismétlődő igénybevételekkel szembeni ellenállásuk is különbözhet. E téren még kevesebb vizsgálati eredmény található az irodalomban, ráadásul az eljárás jellegéből adódóan számos befolyásoló tényező van, így ezek hatásának feltérképezése kiterjedt kutatást és egyben hiánypótló adatokat, vizsgálati eredményeket igényel. Ezen alumíniumszerkezetek esetében a kis- [7] és nagyciklusú fáradás [8] valamint a fáradásos repedésterjedés [9] is egyaránt jellemző lehet.

A hagyományos ömlesztő hegesztő eljárásokat tekintve ritkábban fordul elő, hogy a technológiai paramétereket úgy módosítják, hogy a hegesztett kötés kifejezetten a fásasztó igénybevétel szempontjából legyen optimális minőségű, jellemzően azért, mert ott erre korlátozott lehetőségek vannak. A lineáris dörzshegesztésnél azonban vannak olyan technológiai lehetőségek, melyekkel célzottan a hegesztett kötések ismétlődő igénybevételekkel szembeni ellenállását lehet befolyásolni.

A kutatómunka globális célja olyan, elméletileg megalapozott technológiai paraméterek összeállítása, illetve technológiai fejlesztések kidolgozása, amelyek a mikroszerkezet optimumán keresztül eredményeznek kedvező mechanikai tulajdonságokat, mind kvázistatikus, mind ismétlődő igénybevételek esetén.

Mindezeket figyelembe véve a kutatómunka során a lineáris dörzshegesztés technológiai paramétereinek behatárolása, kötéstudajdonságokra gyakorolt hatásának feltárása érdekében vizsgálni kell:

- a hegesztés során végbemenő folyamatokat és azok hatását a mikroszerkezet kialakulására,
- a technológiai paraméterek kiválasztásának szempontjait, figyelembe véve a kötés minőségének javítására irányuló törekvéseket,
- a különböző szerszámkiakítások hatását a hegesztés folyamatára és a kötés minőségére,
- a hegesztési hőciklus hatását az anyag mikroszerkezetére, továbbá a kötés minőségére,
- a hegesztett kötések statikus igénybevétele mellett az ismétlődő igénybevételekkel szembeni ellenállását.

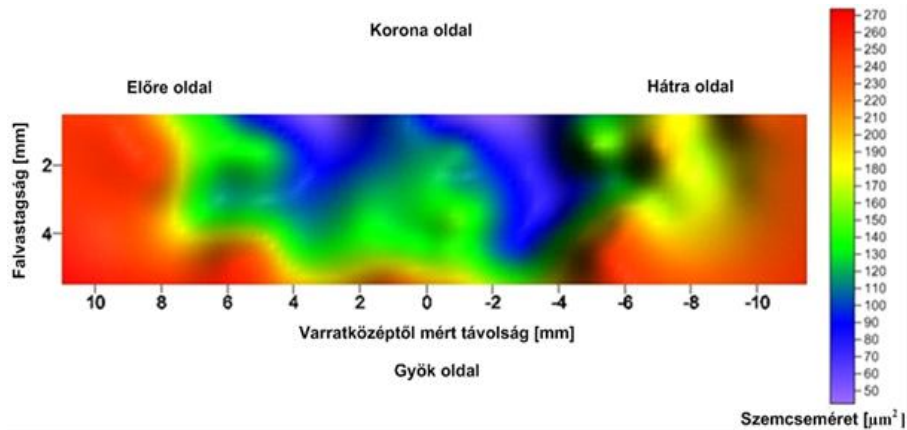
2. A FELADAT MEGOLDÁSÁNAK MÓDSZERE

Az *elméleti kutatómunka* során kiemelten foglalkoztam a lineáris dörzshegesztés technológiai paramétereinek hatásával, valamint a szerszámgeometriával. Mivel egy szilárd-fázisú sajtolóhegesztő eljárásról van szó, így a kötés kialakítása, szerkezete eltér a hagyományos ömlesztő hegesztő eljárásokkal készültől. Ebből adódóan foglalkoztam a kötés szerkezetével, valamint alapvető mechanikai tulajdonságaival. Jellemző a lineáris dörzshegesztéssel készült kötésekre, hogy a szemcseméret a hegesztett kötés különböző részein más méretű, ami alapvetően befolyásolhatja a szilárdsági tulajdonságokat. Ez abból adódik, hogy a hegesztés során a hegesztett kötés különböző részein különböző fémtani folyamatok játszódhatnak le, így az irodalom feldolgozás során kiemelten foglalkoztam ezekkel a folyamatokkal. A hőhatásövezeti részben előfordulhat statikus megújulás, illetve statikus újrakristályosodás, míg a kötés képlékenyen alakított részeiben a dinamikus megújulás és a dinamikus újrakristályosodás a jellemző [10], [11], [12]. A hegesztett kötés varrat részében jellemzően finomszemcsés a szövetszerkezet, amit a szakirodalom a lejátszódó dinamikus újrakristályosodásnak tulajdonít [11], [12]. Ennek a finomszemcsés szövetszerkezetnek is köszönhető a lineáris dörzshegesztett kötések jó szilárdsági tulajdonságai. Ebből adódóan a dinamikus újrakristályosodás témakörével kiemelten foglalkoztam. A szakma nem rég ismerte fel, hogy alumíniumötvözetek esetén is lejátszódhat a dinamikus újrakristályosodás [13], [14] [15], [16]. Összegyűjtöttem a lineáris dörzshegesztésre jellemző hőmérséklet, alakváltozási sebesség és alakváltozás értékeket az eddig publikált szakirodalmakból. Ez a későbbiekben alapul szolgált a saját vizsgálataim megtervezéséhez, elvégzéséhez. Mivel az eljárás alapvetően az alumíniumötvözetek hegesztésénél alkalmazható gazdaságosan, így elméleti áttekintés végeztem az alumíniumötvözetekre vonatkozóan, melyek közül a járműiparban gyakran alkalmazott 5754-H22 és a 6082-T6 ötvözetekre esett a választás.

A lineáris dörzshegesztéssel készült kötések jellemzően jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a hagyományos ömlesztő hegesztéssel készült kötések. Ezzel számos irodalomban lehet találkozni [17], [18], de az is jellemző, hogy itt csak az alapvető roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálatok eredményeit tették közzé. A lineáris dörzshegesztést egyre több gyártmány hegesztésénél használják, melyek közül számos szerkezetnél fordul elő ismétlődő igénybevétel. Találkozhatunk kisciklusú [19], [20], [21], [22] és nagyciklusú [23], [24] fárasztó igénybevétellel is, így elengedhetetlennek tartottam a lineáris dörzshegesztéssel készült kötések fáradással szembeni ellenállásának elemzését, vizsgálatát. Ezzel a területtel meglehetősen kevés szakirodalom foglalkozik, így fontosnak ítélttem, hogy a lineáris dörzshegesztéssel készült kötések ilyen igénybevételeknek kitéve is vizsgáljam, illetve a vizsgálati eredmények hasznosíthatók legyenek a technológia tervezés területén.

A *kísérleti kutatómunka* során terveztem egy lineáris dörzshegesztő szerszámot, mellyel egyenletesebb hőeloszlás érhető el az alapanyag falvastagsága mentén. Ezzel a saját tervezésű szerszámmal készített hegesztett kötések keresztmetszetén megmértem a szemcseméreteket és szemcseméret térképet készítettem mindkét alapanyag esetében. Megállapítottam, hogy

jelentős szemcseméret különbségek vannak az „előre” és „hátra” oldal, valamint a gyök és a koronaoldal között mindkét esetben. Az 5754-H22 és a 6082-T6 hegesztett kötésénél a gyökoldalon szembetűnően nagyobb szemcseméretetek adódtak, mint a koronaoldalon, valamint a varrat részben. A szemcseméret különbségekre mutat példát az 1. ábra:

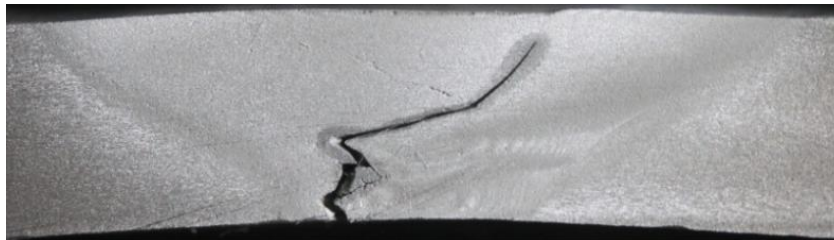


1. ábra. Szemcseméret térkép a 6082-T6 ötvözet hegesztett kötés keresztmetszetén

Mivel hegesztés során egy alátétlemezt kell használni (az eljárás elvéből adódik), így a gyökoldali durvább szemcsék a lassabb gyökoldali hőciklus eredménye is lehet, hiszen az acélból készült alátétlemez hőelvonó képessége jelentősen elmarad az alumíniumétól. Ebből adódóan, a kísérleteket végeztem a gyorsabb gyökoldali hőciklus alkalmazhatóságára és annak a szemcseméretre gyakorolt hatására. Mindkét alapanyag esetében megállapítottam, hogy a gyökoldali hűtés kedvezően hat a szemcseméretre és ezzel együtt a szilárdsági tulajdonságokra is. Az 5754-H22 alapanyag esetében ráadásul az alkalmazható technológiai paramétertartományt is kibővíti. A gyökoldali durvább szemcsék másik oka az lehet, hogy azon a helyen nem játszódott le a dinamikus újrakristályosodás. Előkísérleteket végeztem arra vonatkozóan, hogy ezeknél az alapanyagoknál lejátszódhat-e egyáltalán a dinamikus újrakristályosodás. A kísérletek (melegzőmitő vizsgálatok) alapján egyértelművé vált, hogy mindkét alapanyagnál lejátszódhat, viszont jelentősen eltérő feltételek esetén. Ezek után az előzőleg felvett gyökoldali hőciklusokkal végeztem el a melegzőmitő vizsgálatokat, valamint a szakirodalmi kutatás alapján [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31] állítottam be a gyökoldalra jellemző alakváltozási sebességeket és alakváltozásokat. Az így elvégzett vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy az 5754-H22 alapanyag esetében feltehetően nem játszódik le a gyökoldalra jellemző feltételekkel a dinamikus újrakristályosodás. A 6082-T6 esetében viszont egyértelműen lejátszódik.

Mivel a lineáris dörzshegesztett kötések jellemzően fárasztó igénybevételnek is ki vannak téve, így kis- és nagyciklusú fárasztó vizsgálatokat is végeztem. A kisciklusú fárasztó vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy az 5754-H22 jelű alumíniumötvözetben és lineáris dörzshegesztett kötésén mért, azonos tönkremeneteli ciklusszámokhoz tartozó nyúlás amplitúdók gyakorlatilag azonosak. A ciklikus folyásgörbe esetén a hegesztett kötéssel készült

próbatesteken mért feszültség amplitúdók értéke rendre az alapanyagon meghatározottól nagyobbak voltak, ami arra utal, hogy a hő hatására bekövetkező lágyulást okozó fémtani folyamatokat túlkompenzálja a hegesztés közben bekövetkező képlékeny alakítás. A 6082-T6 alumíniumötvözet esetében az alapanyag és a lineáris dörzshegesztett kötés teljes nyúlás amplitúdó értékei a kisebb nyúlás amplitúdók esetén azonosak voltak, a rugalmas nyúlás amplitúdók rendre az alapanyagé alatt, a képlékeny nyúlás amplitúdók a fölött helyezkedtek el. Az alapanyag és a hegesztett kötés képlékeny nyúlás amplitúdó-feszültség amplitúdó kapcsolatánál is jelentős eltérés figyeltem meg. A hegesztett kötés kisciklusú fárasztása során mért feszültség amplitúdó értékek lényegesen kisebbek az alapanyagon meghatározottnál. Az valószínűsíthető, hogy a kiválóan keményített ötvözet hegesztett kötéseiben a hő és képlékeny alakítás hatásainak következtében lejátszódó fémtani folyamatok közül a kilágyulást okozók a dominánsak. Mivel a lineáris dörzshegesztéssel készült kötéseknél jelentős különbségek tapasztalhatóak a kötés különböző részein, ezért célszerű megvizsgálni a repedés keletkezésének helyét is. Mivel a vizsgálatokat nem a törésig végeztük, hanem a maximális feszültség 10 %-al való csökkenéséig ezért a vizsgálati próbatesteken láthatóak voltak a keletkezett repedések. A repedések keletkezési helyét és a repedések terjedését megvizsgálva a próbadarabok egy részénél a repedés jól láthatóan egy „S” alakban terjedt a hegesztett kötés közepő részén, melyre példát a 2. ábra mutat.



2. ábra. Példa a kisciklusú fárasztóvizsgálatok során bekövetkező repedések helyére
(1,25x nagyítás)

Ezt közelebbről megvizsgálva egyértelművé vált, hogy a hegesztett kötésbe a lemezek homloklapfelületéről bekevert oxidréteg mentén haladt a repedés, tehát a bekevert oxidréteg töredezettségének hatása lehet a kisciklusú fárasztó igénybevétellel szembeni ellenállásra. Ebből adódóan egy új szerszámot terveztem, amely az oxidréteget jobban összetöredezi és az így elkészített hegesztett kötéseken kisciklusú fárasztó vizsgálatokat végeztem két különböző nyúlásamplitúdó alkalmazásával. Statisztikai módszerrel bizonyítottam, hogy az új szerszámmal készült kötések ellenállása jobb a kisciklusú fárasztó igénybevétellel szemben.

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

T1. Kimutattam, hogy a vizsgált alumíniumötvözeteknél a gyökoldali hőciklus jelentős befolyással van a gyökoldali szemcseméretre (6) (25):

- a.) Az 5754-H22 alapanyag lineáris dörzshegesztésénél igazoltam, hogy a gyorsabb gyökoldali hűtés és a hozzá tartozó kisebb gyökoldali csúcshőmérséklet jelentős szemcseméret csökkenést eredményez és ezzel javul a kötés szilárdsági tulajdonsága.
- b.) A 6082-T6 alapanyag lineáris dörzshegesztésénél a gyors gyökoldali hőciklus alkalmazásával, valamint a technológiai paraméterek célszerű megválasztásával elértem a finomszemcsés szövetszerkezetet a gyökoldalon. Meghatároztam egy ideális gyökoldali csúcshőmérséklet tartományt (250–300°C), amelyben a szilárdsági tulajdonságok javultak.

T2. Igazoltam, hogy a dinamikus újrakristályosodás lejátszódása jelentősen függ az alapanyag tulajdonságaitól, a hőmérséklettől, az alakváltozási sebességtől és az alakváltozás mértékétől (11) (12):

- a.) Igazoltam, hogy az 5754-H22 alapanyagban a dinamikus újrakristályosodás lejátszódhat.
- b.) A 6082-T6 alumíniumötvözet lineáris dörzshegesztésénél a dinamikus újrakristályosodás kis alakváltozási sebességnél és kis alakváltozási mértéknél – a hegesztési hőciklustól függetlenül – mindenképpen bekövetkezik. Bizonyítottam, hogy a dinamikus újrakristályosodás eléréséhez nagyobb alakváltozási sebesség esetén nagyobb alakváltozási mértékre van szükség.

T3. Az 5754-H22 alapanyag lineáris dörzshegesztett kötése és a 6082-T6 alapanyag lineáris dörzshegesztett kötése eltérő módon viselkednek a kisciklusú fárasztó igénybevételnél (25) (26) (27):

- a.) Az 5754-H22 alumíniumötvözet lineáris dörzshegesztett kötések kisciklusú fárasztása során mért feszültség amplitúdók értéke az alapanyagon meghatározottól nagyobbak, ami arra utal, hogy a hő hatására bekövetkező lágyulást okozó fémtani folyamatokat a hegesztés közben bekövetkező képlékenyalakítás okozta szerkezetváltozás kompenzálja. Ez összhangban van a dinamikus újrakristályosodás során kapott eredményekkel.
- b.) A 6082-T6 alumíniumötvözet lineáris dörzshegesztett kötésének kisciklusú fárasztása során mért feszültség amplitúdó értékek lényegesen kisebbek az alapanyagon meghatározottaknál. Ez összhangban van dinamikus újrakristályosodási vizsgálatok eredményeivel, azaz a 6082-T6 ötvözet hegesztett kötéseiben a hő és képlékeny alakítás hatásainak következtében lejátszódó fémtani folyamatok közül a kilágyulást okozók a dominánsak.

T4. Vizsgálatokkal igazoltam, hogy a lineáris dörzshegesztő szerszám kialakítása befolyásolja a kötésbe bekevert oxidréteg eloszlását és méreteit (26) (27):

- a.) Igazoltam, hogy az 5754-H22 alumíniumötvözet lineáris dörzshegesztett kötésénél a kötésbe bekevert felületi oxidréteg eloszlása és méretei, illetve a nagyobb anyagáramlást okozó szerszám használata, még a gyökoldali hűtés alkalmazása esetén sem befolyásolja érdemben a hegesztett kötés kisciklusú fárasztó igénybevétellel szembeni ellenállását.
- b.) A 6082-T6 alumíniumötvözet lineáris dörzshegesztett kötésénél kimutattam, hogy a bekevert oxidréteg eloszlásának és méreteinek jelentős hatása van a kisciklusú fárasztó igénybevétellel szembeni ellenállásra. Bizonyítottam, hogy nagyobb anyagáramlást eredményező szerszám használatával növekszik a hegesztett kötés kisciklusú fárasztó igénybevétellel szembeni ellenállása.

4. A HASZNOSÍTÁS ÉS A TOVÁBBFEJLESZTÉS LEHETŐSÉGEI

A kutatómunka ipari hasznosítási lehetőségei közül elsőként a szilárdságnövelési lehetőségeket emelném ki, ugyanis a gyökoldali hűtés alkalmazása könnyen kivitelezhető és jelentős javulást eredményez e téren. A dinamikus újrakristályosodási vizsgálatok eredményei ugyancsak jól alkalmazhatóak a szerszám- és a technológia tervezésnél, az eredmények arra is rámutatnak, hogy az anyagminőség és az anyag előélete is jelentősen befolyásolja a hegesztés sikerét. Fontosnak tartom a fárasztó vizsgálatok eredményeit is, abból a szempontból, hogy a technológia tervezésnél figyelembe kell venni azt, hogy milyen igénybevétele lesz az adott hegesztett szerkezeti elemnek. A hegesztő berendezés szempontjából a robotizált rendszerek alkalmazhatósága az egyik legintenzívebben kutatott terület. Mivel ezen rendszereknek jelentős korlátai vannak a hegesztés során fellépő igénybevételek tekintetében, ebből adódóan a szerszámtervezés és a technológiatervezés kulcsfontosságú, így a kutatómunka során megfogalmazott szerszámtervezési alapelvek hasznosak lehetnek. Véleményem szerint az elvégzett kutatómunka elősegíti a lineáris dörzshegesztés elterjedését és a felhasználásban segítséget nyújt az iparban dolgozó hegesztő szakembereknek.

Az elvégzett kutatómunka alapján egyértelművé vált számomra, hogy számos területen lehet még vizsgálatokat végezni a témával kapcsolatban, így továbbfejlesztési lehetőségek több területen is megfogalmazhatóak. A leírtak alapján egyértelmű az, hogy a különböző alumíniumötvözetek viselkedése hegesztés során jelentős különbségeket mutatnak, így fontosnak tartom a vizsgálatok kiterjesztését egyéb anyagminőségekre is, érdemes lenne nehezen hegeszthető alapanyagok (például: Al-Cu ötvözet) esetében is megvizsgálni a gyökoldali hűtés lehetőségét, illetve a dinamikus újrakristályosodás bekövetkezésének feltételeit. A falvastagság, valamint a kötés kialakítás is számottevő hatással lehet a hegesztett kötések szilárdsági tulajdonságaira, valamint a gyökoldali hűtés alkalmazhatóságának kérdéskörét is kibővíthetik.

A fárasztó vizsgálatokat tekintve további célként fogalmazható meg a nagyciklusú fárasztóvizsgálatok elvégzése olyan hegesztett kötésekben, melyek a disszertációban ismertett technológiai fejlesztéssel készültek. Fontos eredményeket szolgáltathat a kötés viselkedéséről az ismétlődő igénybevétel esetén a fáradásos repedésterjedési vizsgálatok, melyek eredményei jól kiegészíthetik az eddigi fárasztó vizsgálatok eredményeit.

5. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

IDEGEN NYELVŰ

- (1) Török, I., Balogh, A., Juhász, K., Meilinger, Á.: *Main characteristics of fusion and pressure welding of aluminium alloys*, Production processes and systems, vol. 5., 2012, pp. 91 - 106, ISSN: 1786-7983
- (2) Meilinger, Á., Török, I.: *The importance of friction stir welding tool*, Production processes and systems vol. 6., 2013, pp. 25-34. ISSN: 1786-7983
- (3) Lukács, J., Meilinger, Á.: *Behaviour of friction stir welded joints made out of two aluminium alloys under cyclic loading conditions*, Advanced Material Research, vols. 891 - 892, 2014, pp. 1463 - 1468, ISSN: 1662-8985
- (4) Meilinger, Á., Török, I.: *Effect of temperature field and pressure force on the inhomogeneity of 5754-H22 and 6082-T6 FSW joints*, Materials Science Forum, vols. 794 - 796, 2014, pp. 377 - 382 ISSN: 1662-9752
- (5) Lukács, J., Meilinger, Á.: *Behaviour of AlMg3 base material and its friction stir welded joints under cyclic loading conditions*, Materials Science Forum, vol. 812, 2015. pp. 155-160.
- (6) Meilinger, Á., Török, I.: *The effect of welding heat cycle to the properties of friction stir welded joints*, Production processes and systems, vol 7., 2014, ISSN 1786-7983, pp. 19-30.
- (7) Meilinger, Á., Török, I.: *Characteristics of tools of friction stir welding, 13th International Conference on Tools*, Miskolc, Hungary, 27-28. March 2012. ISBN: 978-963-9988-35-4, pp. 231 - 236
- (8) Meilinger, Á., Török, I.: *Application and development opportunities of friction stir welding*, Multiscience-XVI. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, University of Miskolc, 29-30. March 2012., Paper M4, ISBN: 978-963-661-773-8.
- (9) Meilinger, Á., Török, I.: *Investigations on material flow with different tool design at friction stir welding*, Multiscience-XVII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, University of Miskolc, 21-22. March 2013. Paper M4 ISBN: 978-963-358-018-9
- (10) Meilinger, Á.: *Finite element modeling of friction stir welding*, Multiscience-XXVIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, University of Miskolc, 10-11 April 2014. Paper D3, ISBN: 978-963-358-051-6
- (11) Meilinger, Á., Török, I.: *Investigation of dynamic recrystallization during friction stir welding*, Young welding Professionals International Conference YPIC, Budapest, Hungary, 2015, poster

- (12) Meilinger, Á., Török, I.: *Investigations of dynamic recrystallization on the root side of FSW joints*, Multiscience-XXX. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, University of Miskolc, 21-22. April 2016. Paper D2_4, ISBN: 978-963-358-113-1

MAGYAR NYELVŰ

- (13) Meilinger, Á., Török, I.: *A lineáris dörzshegesztés alkalmazása alumíniumötvözetek hegesztésénél*, GÉP LXIII. évf. 1. szám, 2012. pp. 7-10 ISSN: 0016-8572.
- (14) Meilinger, Á., Török, I.: *A technológiai paraméterek hatásainak vizsgálata lineáris dörzshegesztésnél*, GÉP LXIII. évf. 11. szám, 2012. pp. 29-32 ISSN: 0016-8572.
- (15) Meilinger, Á.: *A lineáris dörzshegesztés és alkalmazásai*, Hegesztéstechnika 23. évf. 1. szám, 2012 pp: 21-23, ISSN: 1215-8372.
- (16) Meilinger, Á.: *A lineáris dörzshegesztés technológiai paramétereinek megválasztása*, Hegesztéstechnika, 23. évf. 2. szám, 2012 pp: 27-30, ISSN: 1215-8372.
- (17) Meilinger, Á.: *A lineáris dörzshegesztés összehasonlítása AWI és AFI eljárásokkal alumínium hegesztésénél*, Hegesztéstechnika, 23. évf. 3. szám, 2012 pp. 39-42 ISSN: 1215-8372.
- (18) Meilinger, Á.; Török, I.: *A lineáris dörzshegesztéssel készült kötés kialakulása, szerkezete*, Hegesztéstechnika 24. évf. 4. szám, 2013 pp. 35-38. ISSN: 1215-8372.
- (19) Meilinger, Á.; Lukács, J.: *Két alumíniumötvözet lineáris dörzshegesztéssel készült kötéseinek viselkedése ismétlődő igénybevétel esetén*, Gép LXIV 8. szám pp. 25-30. ISSN: 0016-8572.
- (20) Meilinger, Á., Török, I.: *A technológiai paraméterek és a szerszámkialakítás megválasztása alumíniumötvözetek lineáris dörzshegesztésénél*, XX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó (OGÉT), Kolozsvár, 2012.04.19-2012.04.22. pp. 298 – 301, ISSN: 2068-1267.
- (21) Meilinger, Á., Török, I.: *A technológiai paraméterek hatása a lineáris dörzshegesztéssel készült varrat tulajdonságaira*, 26. Hegesztési Konferencia, Óbudai Egyetem, 2012.05.10-2012.05.12. pp. 271 – 276, ISBN: 978-615-5018-28-2.
- (22) Meilinger, Á., Török, I.: *Szerszámfejlesztés alumíniumötvözetek lineáris dörzshegesztéséhez*, XXI. Nemzetközi Gépészeti Találkozó (OGÉT), Arad, 2013. 04. 25- 2013.04.28. pp. 278 - 281 ISSN: 2068-1267,
- (23) Meilinger, Á.: *Nagyszilárdságú alumíniumötvözetek lineáris dörzshegesztéssel készült kötéseinek tulajdonságai*, 27. Hegesztési Konferencia, Óbudai Egyetem, 2014.05.22-2014.05.24. pp.435 – 443, ISBN: 978-963-08-8585-0.
- (24) Meilinger, Á., Török, I.: *Új szemlélet a lineáris dörzshegesztés technológiai paramétereinek optimalizálásában*, XXII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó (OGÉT), Nagyszeben, 2014. 04. 24- 2014.04.27. pp. 248 – 251, ISSN: 2068-1267.

- (25) Balogh, A., Dobosy, Á., Frigyik, G., Gáspár, M., Kuzsella, L., Lukács, J., Meilinger, Á., Nagy, Gy., Pósalaky, D., Prém, L., Török, I., : *Hegeszthetőség és a hegesztett kötések tulajdonságai*, Miskolci Egyetem, 2015, ISBN: 978-963-358-081-3, pp. 1-324.
- (26) Meilinger, Á., Török, I.: *Lineáris dörzshegesztéssel készült kötések jellemzői kisciklusú fázasztó igénybevétel esetén*, GÉP LXVII. évf. 1. szám, 2016, ISSN: 0016-8572
- (27) Meilinger, Á., Török I.: *A lineáris dörzshegesztett kötések kisciklusú fázasztó igénybevétellel szembeni ellenállása*, 28. Hegesztési Konferencia, Dunaujvárosi Egyetem, 2016. 05.26-2016.05.28.

6. A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] Sakurai, T.: *The latest trends in aluminium alloys sheets for automotive body panels*, Kobelco Technology Review No. 28, 2008, pp. 22-28.
- [2] Skillingberg, M., Green, J.: *Aluminium applications in the rail industry*, Light Metal Age, 2007, pp. 1-5.
- [3] Végvári, F.: *Gépjárműgyártás, fenntartás*, egyetemi tananyag, Kecskeméti Főiskola, 2011, pp. 75, ISBN: 978-963-279-654-3
- [4] Dúl, R., Jármái K.: *Alumínium körcső alakváltozásának végeelemes analízisa*, EME, X. Fiala Műszaki Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, 2005. pp. 55-58.
- [5] Santos J. F., Gabor R.: *Friction stir welding development of aluminium alloys for structural connections*, Proceedings of Romanian Academy, Series A, Vol. 14, 2013, pp. 64 – 71.
- [6] Ohba, H., Ueda, C., Agatsuma, K.: *Innovative vehicle – the „A-train”*, Hitachi Review, Vol 50., 2001, pp. 130 – 133.
- [7] Wang, X., Kang, J-K., Kim, Y., Wirsching, P. H.: *Low cycle fatigue analysis of marine structures*, ABS Technical Papers, 2006, pp. 95-99.
- [8] Ericsson, M., Jin, L-Z., Sandström, R.: *Fatigue properties of friction stir overlap welds*, International Journal of Fatigue 29, 2007, pp. 57-68.
- [9] D’Urso, G., Giardini, C., Lorenzi, S., Pastore, T.: *Fatigue crack growth in the welding nugget of FSW joints of a 6060 aluminium alloy*, Journal of Material Processing Technology 214, 2014, pp. 2075 – 2084.
- [10] Sauvage, X., Dédé, A., Cabello Muñoz, A., Huneau, B.: *Precipitate stability and recrystallisation in the weld nuggets of friction stir welded Al-Mg-Si and Al-Mg-Sc alloys*, Material Science Engineering A491, 2008. pp. 364-371.
- [11] Wang, H., Colegrove, P., Mayer, H.M., Campbell, L., Robson, R.D.: *Material Constitutive Behaviour and Microstructure Study on Aluminium Alloys for Friction Stir Welding*, Advanced Material Research Vol. 89-91, 2010. pp. 615-620.
- [12] McNelley, T.R., Swaminathan, S., Su, J.Q.: *Recrystallization mechanisms during friction stir welding/processing of aluminum alloys*, Scripta Materialia 58, 2008. pp. 349-354.
- [13] Hallberg, H., Wallin, M., Ristinmaa, M.: *Modeling of Continuous Dynamic Recrystallization in Commercial-Purity Aluminum*, Material Science and Engineering A, 2010. pp. 1126-1134.
- [14] Zheng, Q.G.: *Characterization for Dynamic Recrystallization Kinetics Based on Stress-Strain Curves*, InTech Publications, 2013. pp. 61-88.

- [15] Mahmoodkhani, Y., Wells, M.A., Grajales, L., Poole, W.J., Parson, N.C.: *Material Flow and Grain Deformation During Extrusion*, Materials Science Forum Vols. 794-796, 2014. pp. 664-669.
- [16] Sherstnev, P., Zamani, A.: *Modeling of static and geometric dynamic recrystallization during hot extrusion of Al-Mg-Si alloy*, Materials Science Forum Vols. 794-796, 2014. pp. 728-733.
- [17] Mishra, R.S., Mahoney, M.W.: *Friction stir welding and processing*, 2007. pp. 3-17.
- [18] Adamowski, J., Gambaro, C., Lertora, E., Ponte, M., Szkodo, M.: *Analysis of FSW welds made of aluminium alloy 6082-T6*, Archives of Materials Science and Engineering, Vol. 28, 2007, pp. 453-460.
- [19] Yahr, G.T.: *Fatigue design curves for 6061-T6 aluminum*, 1993, pp. 1–5.
- [20] Spear, A., Ingraffea, A.: *Microstructurally small fatigue crack growth in thin aluminum-alloy, pressure vessel liner*, Procedia Engineering, Vol. 10, 2011, pp. 686-691.
- [21] Wang, X., Kang, J-K, Kim, Y., Wirsching, P.H.: *Low cycle fatigue analysis of marine structures*. ABS Technical Papers, 2006, pp. 95-99.
- [22] Czechowski, M.: *Fatigue life of friction stir welded Al-Mg alloys*, 13th International Scientific Conference on Achievements in Mechanical and Materials Engineering proceeding, 2005, pp. 83-86.
- [23] Li, J.: *The effect of microstructure and texture on high cycle fatigue properties of Al alloys*, University of Kentucky, Doctoral Dissertations, Paper 522, 2007.
- [24] Ericsson, M.: *Fatigue strength of friction stir welded joints in aluminium*, Doctoral Thesis. Department of Materials Science and Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2005.
- [25] Buffa, G., Donati, L., Fratini, L., Tomesani, L.: *Solid State Bonding in Extrusion and FSW: Process Mechanics and Analogies*, Journal of Materials Processing Technology Vol. 177, 2006. pp. 344–347.
- [26] Buffa, G., Hua, J., Shivpuri, R., Fratini, L.: *Design of the Friction Stir Welding Tool Using the Continuum Based FEM Model*, Materials Science and Engineering A Vol.419, 2006. pp. 381–388.
- [27] Masaki, K., Sato, Y., Maeda, M., Kokawa, H.: *Experimental Simulation of Recrystallized Microstructure in Friction Stir Welded Al Alloy Using a Plane-Strain Compression Test*, Scripta Materialia Vol. 58, 2008. pp. 355–360.
- [28] Tianzhong, L., Seidel, T., Wei, T., Reynolds, A.: *A Friction Stir Welding Model Using Computational Fluid Dynamics*, The Materials Society, 2003, pp. 299–312.

- [29] Hamilton, C., Dymek, S., Kalemba, I., Blicharski, M.: *Friction Stir Welding of Aluminium 7136-T76511 Extrusions*, Science and Technology of Welding and Joining Vol.13, 2008. pp. 714–720.
- [30] Mahoney, M., Rhodes, C., Flintoff, J., Spurling, R., Bingel, W.: *Properties of Friction Stir Welded 7075-T651 Aluminum*, Metallurgical and Materials Transactions A Vol. 29, 1998. pp. 1955–1964.
- [31] Sato, Y., Kokawa, H., Enomoto, M., Jogan, S.: *Microstructure Evolution of 6063 Aluminum During Friction Stir Welding*, Metallurgical and Materials Transactions Vol. A30, 1999. pp. 2429–2437.