

Vékony fémlamezok lézeres hegesztése átlapolt kötési geometriában

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Horváth Gábor

Témavezető:

Dr. Geretovszky Zsolt
egyetemi docens

Társtémavezető:

Dr. Szörényi Tamás
önkéntes segítő

Fizika Doktori Iskola
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék
Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar

Szeged
2023

1. Bevezetés

A hibrid vagy tisztán elektromos hajtásrendszerrel rendelkező modern járművek akkumulátor pakkjainak összeállítása során kivételesen nagy figyelmet kapnak a permanens kötéstechológiai eljárások a különböző gazdasági és praktikussági szempontok miatt. Ezek közül is különlegesen kiemelkednek a különféle hegesztési, ezen belül is a lézeres hegesztési eljárások, elsősorban azok széleskörű testreszabhatósága, automatizálhatósága és gyártástechológiákba való integrálhatósága miatt [1-3].

A lézeres hegesztéstechológia ugyanakkor egy viszonylag összetett, kivételesen sok szabadsági fokkal és paraméterrel rendelkező eljárás, amelynek optimalizálása egy komplex feladat. Egy megfelelően optimalizált lézerehegesztési eljárás ugyanakkor számottevő javulást tud eredményezni az akkumulátor pakkok összeállításának legalacsonyabb szintjein, amelyek a nagy cella számosság miatt összességében igen jelentős javulást eredményezhetnek [4-6].

A lézeres hegesztések akkumulátor technológiai alkalmazásokra való optimalizálását nehezíti, hogy a hegesztéstechológiai eljárások elektromos és mechanikai aspektusainak egyidejű vizsgálta viszonylag újszerű és kevésbé vizsgált terület. Ennek megfelelően jelenleg nincsen sem szabványosított mérési eljárás, sem jellemzési módszer a lézeres hegesztések elektromos és mechanikai egyidejű jellemzésére [7-9].

Ebből adódóan a legtöbb hegesztési eljárásnál problémát jelent a kötések egyidejű optimalizálása mind elektromos mind mechanikai szempontól, amely akkumulátor technikai alkalmazások szempontjából kifejezetten kritikus szempont.

Dolgozatom tárgya ennek megfelelően az acéllemezeken létrehozott lézeres mélyvarratos hegesztések elektromos és mechanikai szempontból történő átfogó tanulmányozása.

A hegesztési varratok minőségét és tulajdonságait, a kialakulásuk során az olvadékmedencében és valamennyi hőterhelt zónában egyidejűleg lejátszódó folyamat együttesen befolyásolja. Praktikusan szinte mindegyik folyamat külön-külön nyomonkövethető és felhasználható arra, hogy a lézerhegesztés után vagy bizonyos esetekben a lézerhegesztés során előrejelzést adjon a kötés minőségéről. Ezen folyamatok együttes hatása nemcsak a hegesztési varrat belsejében, hanem a hegesztési varrat felületén is megdermedve visszamarad, ennek eredményeképpen az a felszínen vizuálisan eltérő varratmorfológiákat eredményez.

Annak felismerése, hogy a lézeres hegesztések ezen inherens tulajdonsága (varrat morfológia) tudatosan alkalmazható a hegesztések mechanikai, illetve elektromos szempontból történő optimalizálására, saját kutatásom eredménye.

Ezen felül széleskörűen vizsgáltam a hegesztések

geometriai paramétereken keresztül történő optimalizálási lehetőségeit, úgy, mint varrat alakzat, szegmens szám, szegmens hossz, szegmens távolság és vertikális kiterjedés hatását.

2. Célkitűzések

Kísérleteim első eredményei rámutattak arra, hogy a lézeres mélyvarratos hegesztés akkumulátor technológiai alkalmazásokra való optimalizálására rendkívül sok lehetőség áll rendelkezésre. Ezen lehetőségek elsősorban a technika rugalmasságából, sokoldalúságából és a folyamat fizikai értelemben vett komplexitásából fakadnak.

Kísérleteim megtervezésekor elsődleges célul tűztem ki, hogy fémszalagok esetén, átlapolt kötési geometriában, autogén módon (azaz mind a két szalag anyaga megegyezett) lézerrel létrehozott hegesztések elektromos és mechanikai tulajdonságait együttesen optimalizáljam.

Köztudomású, hogy lézeres hegesztéssel létrehozott varratok tulajdonságainak optimalizálására alapvetően kétféle lehetőség van. A leggyakrabban alkalmazott módszer a folyamat paraméterek közvetlen változtatásával történő optimalizálás. A másik módszer pedig egy rögzített folyamat paraméterek mellett történő kötési alakzat és konfigurációoptimalizálás, ahol a lehetőségeknek csak a képzelet szabhat határt.

Korábbi megfigyelések alapján a lézeres

paraméterek változásának hatására különféle varrat morfológiák figyelhetőek meg a lézerhegesztett minták felszínén a megmunkálás után elsősorban az olvadék áramlástanai viselkedése miatt. Kutatásaim egyik célja volt, hogy lemezanyagok esetén feltárjam a kapcsolatot egyrészt a lézerparaméterek és a kialakuló morfológiai osztályok között másrészt, hogy alaposan megvizsgáljam, hogy az egyes osztályok milyen karakterisztikus elektromos és mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek.

Végezetül a kutatásaim célját képezte a lézeres hegesztési varratok elektromos és mechanikai tulajdonságainak optimalizálása a lézeres paramétereiktől függetlenül. Azaz, hogy szabályszerűséget és kapcsolatokat keressek a varratok konfigurációjának szisztematikus változtatása során.

3. Alkalmazott módszerek

Kísérleteim során egy saját magam által megépített 400W maximális teljesítménnyel rendelkező szállézeres (SPI SP-400C-0005: 1071 nm hullámhossz, 400 W maximális teljesítmény, polarizálatlan, $M2 = 1,08$) hegesztőrendszer és egy professzionális 1000W maximális teljesítményű hegesztőállomás (Trumpf Trufiber 1000: 1075 nm hullámhossz, 1000 W maximális teljesítmény, polarizálatlan sugár $M2=1,2$) segítségével hoztam létre lézeres mélyvarratos hegesztéseket 0,5 mm vastagságú hidegen hengerelt DC01 acél szalagokon

illetve 0,25 mm vastagságú nikkel bevonattal rendelkező rozsdamentes szalagokon, átlapolt kötési geometriában.

A lézeres hegesztett minták elektromos vizsgálatához külső tápegységgel (TTi CPX200, a mérési folyamat során használt maximális 10 A-os áram esetében 1,1%-os pontossággal) ellátott négyponos ellenállás módszert (Keithley 2401, a kísérleteinkhez használt feszültségtartományban 0,1%-os mérési pontossággal) alkalmaztam. A mechanikai vizsgálatokhoz pedig mechanikai szakító berendezést (Tinius Olsen H5KT), valamint digitális 3d mikroszkópot (Olympus DSX510). A digitális 2D és 3D felvételeket ImageJ szoftverben manuálisan értékeltem ki. Vizsgálataimat kiegészítettem Vickers féle mikro keménységméréssel (Reichert mikrokeménységmérő mikroszkóp) és csiszolatok készítésével egyaránt. Az elektromos áramlási folyamatok mélyebb megértésének érdekében Comsol szoftver segítségével fizikai modellt is készítettem.

4. Új tudományos eredmények

1. Az irodalomban eddig nem alkalmazott közelítésként, együttesen vizsgáltam 0,5mm vastagságú, hidegen hengerelt DC01 acéllemezek átlapolt kötési geometriában történő autogén hegesztésével előálló varratainak elektromos és mechanikai viselkedését. Az elektromos ellenállást vizsgálva megállapítottam, hogy 300, 400, 600, 800 és 1000 W beeső lézer teljesítmény

esetén rendre a 20-75, 50-150, 50-200, 50-220 és 50-240 mm/s pásztázási sebességtartomány a legmegfelelőbb paraméterablak a kiemelkedően alacsony elektromos ellenállással és kiváló reprodukálhatósággal ($1,09 \pm 0,05$ k faktor) rendelkező minták előállítására. Az 50-75, 50-175, 50-200, 50-200 és 50-600 mm/s pásztázási sebesség tartományban készült próbatestek közepesnek tekinthető és közel állandó (255 ± 6 MPa) szakító nyírószilárdságot mutatnak. Mindkét tulajdonságot figyelembe véve, eredményeim azt bizonyítják, hogy az 50-75, 50-150, 50-200, 50-200 és 50-240 mm/s pásztázási sebességtartomány az optimális a vizsgált DC01 modellrendszer esetében. [T1, T2]

2. Megmutattam, hogy 0,5 mm vastag hidegen hengerelt DC01 acéllemezek átlapolt kötési geometriában, 200-1000 W teljesítmény és 0,1-1100 mm/s pásztázási sebesség ablakban történő autogén lézeres hegesztése során ugyanaz az öt varratmorfológia típus (Rosenthal, egyhullám, elnyújtott kulcslyuk, eldomborodó és domborodó), ugyanabban a pásztázási sebesség sorrendben jelenik meg, mint ahogyan azt korábban kizárólag tömbi anyagok lézeres megmunkálása esetén Fabbro leírta. Megadtam, hogy az egyes morfológiai típusok hol jelennek meg a teljesítmény – szkennelési sebesség síkon, és az öt morfológiai típus mindegyikéhez egyértelmű elektromos és mechanikai viselkedést rendeltem. [T2]

3. 0,25 mm vastagságú Hilumin® lemezeken megismételt kísérleteim eredményei az anyagi jellemzők különbsége által indukált eltéréseken túl ugyanazt a morfológia térképet adták, mint a DC01 modellrendszeren mértek, bizonyítva, hogy az eredményeim általánosíthatóak. [T2]

4. Kísérletileg igazoltam, hogy a 0,5mm vastagságú DC01 acéllemezek átlapolt geometriában történő autogén lézeres hegesztésekor (400 W beeső lézer teljesítmény, 50mm/s szkennelési sebesség 1075 nm hullámhossz, 0,35 mm foltátmérő) az általam vizsgált alap varratalakzatok (párhuzamos egyenes, merőleges egyenes, X, +, /, dupla merőleges és dupla párhuzamos egyenesek) közül a legalacsonyabb elektromos ellenállása ($1,031 \pm 0,010$ *k* faktor) és legmagasabb szakító nyírószilárdsága ($540,3 \pm 19,1$ MPa) azon alap alakzatoknak van, amelyek rögzített kötési keresztmetszet mellett legalább két egymástól független (nem átfedő) szegmensből állnak. [T3]

5. 0,5mm vastagságú DC01 acéllemezek átlapolt geometriában történő autogén lézeres hegesztésekor (400 W beeső lézer teljesítmény, 50mm/s szkennelési sebesség 1075 nm hullámhossz, 0,35 mm foltátmérő) az egymással párhuzamos, egyenes szegmensekből álló alakzatok összhosszúságát állandó 16 mm értéken tartva, szisztematikusan változtattam az egyes szegmensek hosszát 2,6-8 mm között és egymástól mért távolságát 1-

8 mm között. Az így definiált alakzatok k faktorait és szakító nyírószilárdságát meghatározva megállapítottam, hogy az egymással párhuzamos, egyenes szegmensekből álló alakzatok esetén a legszélső szegmensek egymástól mért távolsága (a varrat geometria vertikális kiterjedése) mutat korrelációt a varratok elektromos és mechanikai viselkedésével. [T3]

6. 0,5mm vastagságú DC01 acéllemezek átlapolt geometriában történő autogén lézeres hegesztésekor (400 W beeső lézer teljesítmény, 50mm/s szkennelési sebesség 1075 nm hullámhossz, 0,35 mm foltátmérő) meghatároztam, hogy 8 mm-es, diszkrét párhuzamos varrat szegmensekből álló alakzatok esetén csak akkor érhető el 10%-ot meghaladó javulás az elektromos vezetőképességet jellemző k faktor tekintetében a standard egyszeres varrathoz képest, ha a varratok számát egyről legalább tízre növeljük. Ugyanakkor a varratok számosságának növelése a kötés szakító nyírószilárdságát tekintve nem hoz számottevő javulást. [T3]

5. Hivatkozások

[1] R. Cipin, J. Kadlec, B. Klima, P. Hutak: Battery System for the Airplane VUT 051 RAY, ECS Transactions, 48 (1) 217-222 (2014)

- [2] I. Gál, I. Jankovics, Gy. Bicsák, Á. Veress, J. Rohács, D. Rohács: Conceptual design of a small 4-seater aircraft with hybrid propulsion system, IFFK 2017 (2017)
- [3] S. Shawn Lee, Tae H. Kim, S. Jack Hu, Wayne W. Cai, Jeffrey A. Abell: Joining Technologies For Automotive Lithium-Ion Battery Manufacturing – A Review, MSEC2010-341682010, (2010)
- [4] Katayama S.: Handbook of laser welding technologies, Woodhead Publishing, (2013)
- [5] J. F. Ready: LIA Handbook of Laser Materials Processing, Magnolia Publishing Inc., (2001)
- [6] K. Ferjutz, Joseph R. Davis: ASM Handbook Vol6 Welding, Brazing and Soldering, ASM International, (1993)
- [7] Schmidt, P.A., Schweier, M., Zaeh, M.F., “Joining of lithium-ion batteries using laser beam welding: electrical losses of welded aluminum and copper joints.” ICALEO 2012. Paper #805 (2012) DOI: 10.2351/1.5062563
- [8] M. J. Brand, P. A. Schmidt, M. F. Zaeh, A. Jossen: Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances, Journal of Energy Storage 1 7–14, (2015)

[9] M. J. Brand, E. I. Kolp, P. Berg, T. Bach, P. Schmidt, A. Jossen: Electrical resistances of soldered battery cell connections, *Journal of Energy Storage* 12 45–54, (2017)

[T1] G. Horváth, A. Körmöczi, T. Szörényi and Zs. Geretovszky: Laser welding and its implementation in the assembly of battery packs in aviation, *International Journal of Sustainable Aviation*, 6(1), 51-65 (2020), DOI:10.1504/IJSA.2020.108094

[T2] G. Horváth, A. Körmöczi, T. Szörényi and Zs. Geretovszky: Bead morphology of laser welded steel sheets and its correlation to the joint's electrical and mechanical properties, *Journal of Laser Applications*, 35(2), 022020 (2023), DOI:10.2351/7.0000996

[T3] G. Horváth, A. Körmöczi, T. Szörényi and Zs. Geretovszky: Improvement of electrical and mechanical properties of laser welded lap joints via dimensional optimization, (bírálólat alatt)

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott, mint a

G. Horváth, A. Körmöczi, T. Szörényi and Zs. Geretovszky: *Laser welding and its implementation in the assembly of battery packs in aviation*, International Journal of Sustainable Aviation 6(1), 51-65 (2020), DOI:10.1504/IJSA.2020.108094

publikáció társszerzője nyilatkozok arról, hogy a Horváth Gábor doktor jelölt „*Vékony fémlemezek lézeres hegesztése átlapolt kötési geometriában*” című doktori értekezésében felhasznált, a jelölt 1. tézispontjában megfogalmazott eredményeket ismerem. Ezek elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezen eredményeket eddig nem használtam fel tudományos fokozat megszerzésére és ezt a jövőben sem teszem. Hozzájárulok ahhoz, hogy a jelölt az első tézispontban szereplő eredményeket PhD fokozata megszerzéséhez felhasználja.

Szeged, 2023.⁰⁹ hó ..²⁰ nap



Dr. Geretovszky Zsolt

témavezető

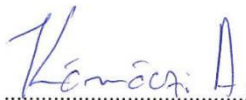
társszerző



Dr. Szörényi Tamás

társtémavezető

társszerző



Körmöczi Andor

társszerző

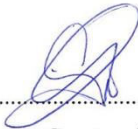
TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott, mint a

G. Horváth, A. Körmöczi, T. Szörényi and Zs. Geretovszky: *Bead morphology of laser welded steel sheets and its correlation to the joint's electrical and mechanical properties*, Journal of Laser Applications **35**(2), 022020 (2023), DOI:10.2351/7.0000996

publikáció társzerzője nyilatkozok arról, hogy a Horváth Gábor doktor jelölt „*Vékony fémlemezek lézeres hegesztése átlapolt kötési geometriában*” című doktori értekezésében felhasznált, a jelölt 1., 2., 3. tézispontjában megfogalmazott eredményeket ismerem. Ezek elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezen eredményeket eddig nem használtam fel tudományos fokozat megszerzésére és ezt a jövőben sem teszem. Hozzájárulok ahhoz, hogy a jelölt az első, második és harmadik tézispontban szereplő eredményeket PhD fokozata megszerzéséhez felhasználja.

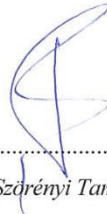
Szeged, 2023.⁰⁹..... hó²⁰.....nap



Dr. Geretovszky Zsolt

témavezető

társzerző



Dr. Szörényi Tamás

társtémavezető

társzerző



Körmöczi Andor

társzerző

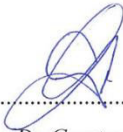
TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott, mint a

G. Horváth, A. Körmöczi, T. Szörényi and Zs. Geretovszky: *Improvement of electrical and mechanical properties of laser welded lap joints via dimensional optimization*,
(bírálat alatt)

publikáció társzerzője nyilatkozok arról, hogy a Horváth Gábor doktor jelölt „*Vékony fémlemezek lézeres hegesztése átlapolt kötési geometriában*” című doktori értekezésében felhasznált, a jelölt 4., 5., 6. tézispontjában megfogalmazott eredményeket ismerem. Ezek elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezen eredményeket eddig nem használtam fel tudományos fokozat megszerzésére és ezt a jövőben sem teszem. Hozzájárulok ahhoz, hogy a jelölt a negyedik, ötödik és hatodik tézispontban szereplő eredményeket PhD fokozata megszerzéséhez felhasználja.

Szeged, 2023.⁰⁹..... hó²⁰.....nap



Dr. Geretovszky Zsolt

témavezető

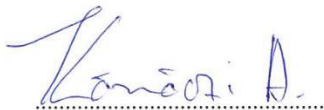
társzerző



Dr. Szörényi Tamás

társtémavezető

társzerző



Körmöczi Andor

társzerző