

Vékony fémlamezek lézeres forrasztása átlapolt kötési geometriában

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Körmöczi Andor

Témavezető:

Dr. Geretovszky Zsolt
egyetemi docens

Társtémavezető:

Dr. Szörényi Tamás
c. egyetemi docens

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

Szeged
2024

1. Bevezetés

A növekvő környezettudatosság hatására egyre nagyobb figyelmet kapnak a környezetbarát megoldások számos tudományterületen, így a járműfejlesztésben is [1]. Az elektromobilitás térnyerése kritikus a klímaváltozás elleni harcban és a közlekedésfejlesztésben. Ennek eredményeként alakultak ki az új hibrid és teljesen elektromos hajtásrendszerek, mint a hagyományos belső égésű motorok alternatívái [2]. Az elektromos járművek energiaforrása az akkumulátorcsomagja, amelynek összeállításában, gazdaságossági és praktikussági szempontok miatt, kiemelt figyelmet kapnak a permanens kötéstechológiai eljárások. Ezek között a forrasztás, és különösen a lézeres forrasztás, mint elektromos értelemben kiváló kötéseket létrehozó technológia, vonzó alternatíva [3] testreszabhatósága, automatizálhatósága és egyszerű gyártási sorba integrálhatósága miatt [4].

A lézeres forrasztás rendkívül sok szabadsági fokkal és paraméterrel rendelkezik, így bár optimalizálása komplex feladat, egy megfelelően optimalizált lézeres forrasztási eljárás a paraméterek jelentős javulását eredményezheti az akkumulátorcsomagok alacsony szintjein, ami, különösen nagy számú cella esetén, összességében jelentős előrelépést eredményezhet a rendszer teljesítőképességében [5].

A lézeres forrasztás optimalizálása az akkumulátortechológiai alkalmazásokban izgalmas lehetőség, ugyanakkor jelentős kihívás. Ugyanis a

lézerforrasztott kötések elektromos és mechanikai viselkedésének egyidejű vizsgálata viszonylag kevésbé kutatott terület. Nincsenek standardizált mérési módszerek vagy bevett eljárások a lézeres forrasztások elektromos és mechanikai tulajdonságainak együttes értékelésére. A konkurens kötési technikákkal elérhetőnél kisebb ellenállású, ugyanakkor megfelelő mechanikai szilárdsággal rendelkező kötések előállításának lehetőségeit és korlátait feltárni így inspiráló kutatási feladat [6, 7, 8].

2. Célkitűzések

A fent említett igényből és motivációból fakadóan a dolgozat a fő célja az volt, hogy egy modellrendszeren, átlapolva kötési geometriában, autogén módon lézerral forrasztott kötések esetén, egyidejűleg optimalizáljam azok elektromos és mechanikai tulajdonságait. Ennek érdekében meg kellett vizsgálnom az összekötendő fémlemezok előkészítésének, a forrasztóanyag mennyiségének és a lézernyalábhoz viszonyított helyzetének a hatását a kialakított kötések tulajdonságaira ugyanúgy, mint azt, hogy hogyan függ a lézerforrasztott lemezpárok ellenállása és szakító-nyíró szilárdsága a megmunkálási paraméterektől, nevezetesen a lézerteljesítménytől és a besugárzási időtől. Ezen paraméterek változtatásának hatására, elsősorban a forrasztóanyag megolvadási típusai miatt, a megmunkálás

után három különféle kötési morfológia alakul ki a lézerforrasztott lemezek között.

Fel kellett tárjam a kapcsolatot a vizsgált paraméterek és a forrasztanyagban ezek változtatásának hatására kialakuló morfológiai osztályok között, és fel kellett derítenem, hogy az egyes morfológiai osztályok és a folyamatparaméterek milyen elektromos és mechanikai viselkedést eredményeznek.

Mivel az akkumulátortechnológiai alkalmazások szempontjából a kötések elektromos ellenállása a kritikus paraméter, kiemelt figyelmet kellett szentelnem a lézeres forrasztással előálló kötések elektromos tulajdonságai mérésének, amihez extra motivációt jelentett az, hogy ehhez nincs kidolgozott és elfogadott szabvány. A kísérleti megközelítéssel párhuzamosan COMSOL Multiphysics környezetben végzett numerikus modellezéssel kontrolláltam, hogy mennyire teljes és konzisztens a fizikai kép.

3. Eszközök és módszerek

A lézeres forrasztásokat egy 400W maximális teljesítményű szállézerrel (SPI SP-400C-0005: hullámhossz: 1071 nm, polarizálatlan, M2=1,08) végeztem az általam megépített optikai rendszerben. Modellrendszerként az akkumulátor cellák burkolatának és saruinak anyagát képező, nikkal bevonatú rozsdamentes acél, Hilumin[®], illetve DC01 lemezpárokat használtam. A

forrasztásokat autogén módon, átlapolt kötési geometriában végeztem. Forraszanyagként egy standard, ón alapú forraszanyagot (Sn99,3Cu0,7) használtam, amit méretre szabott vékony lemez formájában helyeztem a két kötendő acéllemez közé. A lemezeket a megmunkálás alatt egy speciálisan erre a célra tervezett mintabefogóban rögzítettem.

Munkám során az elektromos és mechanikai jellemzők mérésére összpontosítottam. A lézerrel forrasztott lemezpárok elektromos ellenállását külső tápegységgel ellátott, négyponos ellenállásméréssel határoztam meg, amihez TTi CPX200 tápegységet és Keithley 2401 feszültségmérőt használtam. A mechanikai tesztelésre szolgáló szakítógépet egy Tinius Olsen H5KT volt. A szétszakított mintákon visszaszilárdult forraszanyag morfológiájának vizsgálatára Olympus DSX510 digitális 3D mikroszkópot alkalmaztam. A digitális 2D és 3D felvételeket ImageJ szoftverben, manuálisan értékeltem ki. Vizsgálataimat Reichert mérőmikroszkóppal végzett Vickers féle mikrokeménységméréssel egészítettem ki. A különböző forraszanyag geometriáknak a lézerforrasztott lemezpárok ellenállására gyakorolt hatását COMSOL Multiphysics környezetben végzett modellezés segítségével tártam fel. Ehhez felépítettem egy olyan realiztikus fizikai modellt, amely a megfelelő peremfeltételek kijelölése után segítséget nyújtott a mögöttes fizikai effektusok kibontására.

4. Új tudományos eredmények

Az akkumulátor csomagot alkotó cellák kötését modelleztem a Li-ion akkucellák többségénél saruanyagként és burkolatként használt Hilumin[®], és DC01 lemezek lézeres forrasztásával, lap geometriában. Szisztematikusan változtatva a kísérleti (lemez tisztítás, felületi érdesség, forraszanyag mennyiség) és a lézer (lézer teljesítmény, besugárzási idő) paramétereket feltérképeztem a lézerforrasztott lemezpárok elektromos ellenállásának, szakító-nyíró szilárdságának és morfológiájának a folyamatparaméterektől való függését.

T1.1. A lézerforrasztott lemezpárok szétszakítását követően, a töretfelületek optikai mikroszkópos vizsgálatával megmutattam, hogy 1) a törés minden esetben a forraszanyag rétegben következett be, és 2) a töretfelületek megjelenése alapján a kötések három morfológiai típusát azonosítottam.

A leghomogénebb, egyszersmint a legkevesebb buborékot tartalmazó – általam II. típusként azonosított – morfológiát, amely a forraszanyag teljes térfogatának tökéletes átolvasztásával érhető el, Hilumin[®] lemezpárok esetén $1,6 \text{ mm}^3$ forraszanyag 80 W-on 5 másodpercig tartó besugárzásával, míg DC01 lemezpárok esetén $4,8 \text{ mm}^3$ forraszanyag és 120 W lézerteljesítmény mellett, 5 s besugárzási idővel valósítottam meg [A1, A2].

T1.2. A kísérleti körülmények változtatásának a lézeres forrasztással, átlapolt geometriában készített kötések elektromos és mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatására vonatkozóan

- megmutattam, hogy az összeforrasztandó lemezek megfelelő előtisztításával maximum 5%-os javulás érhető el mind a Hilumin® mind a DC01 lézerforrasztott lemezpárok elektromos és mechanikai tulajdonságaiban, úgy, hogy az acetonnal, etanollal vagy propanollal végzett kémiai tisztítási módok között nincs szignifikáns különbség.
- Bebizonyítottam, hogy a felületi érdesség változtatásának jelentős hatása van a lézerforrasztott lemezpárok elektromos és mechanikai tulajdonságaira. Az átlagos felületi érdesség, R_a 2,63-ról 2,04 mikrométerre csökkenése a Hilumin®, illetve a DC01 lemezpárok ellenállásában 11,9, illetve 14,4 %-os, míg szakító-nyíró szilárdságukban 1,7, illetve 2.5-szeres javulást eredményez.
- A forrasztóanyag mennyiségét állandó lézer teljesítmény, 80 W, és besugárzási idő, 5 s mellett 0,40 mm³-től 3,20 mm³-ig változtatva bebizonyítottam, hogy létezik optimális forrasztóanyagmennyiség. A vizsgált teljesítmény – idő pár esetén a 1,6 mm³ térfogatú forrasztóanyag adta mind elektromos mind mechanikai szempontból a legjobb kötést.

Ezen eredmények alapján kísérleteim során minden esetben acetonos tisztítást használtam. Mivel megmutattam, hogy a p1200-as papír használatával elérhető átlagos felületi érdesség, $R_a=2,15 \mu\text{m}$ alatt a további javulás már nem szignifikáns, minden kísérlethez p1200-as papírral történő csiszolást alkalmaztam az előkezelés során [A1, A2].

T1.3. A feltérképezett lézerteljesítmény – besugárzási idő megmunkálási paraméter ablakban 6 zónát különböztettem meg: amelyekben az adott lézerteljesítmény-besugárzási idő pár hatására 1) a lemezpárok között nem jön létre kötés, 2) kötés alakul ki, 3) a kötés optimális tulajdonságokkal rendelkezik, 4) még mindig jó kötés kialakulása mellett a felső lemez felső felülete megolvad, 5) a lézernyaláb a felső lemez átolvasztásával abba lyukat fúr, míg 6) a kötés középső zónájában a lyukképződés az alsó lemezt is eléri. Igazoltam, hogy ez a hat zóna minden besugárzási időnél ugyanabban a teljesítmény sorrendben jelenik meg.

Megmutattam, hogy töretfelületek megjelenése alapján azonosított három morfológiai típus közül az mutatja a legjobb elektromos és mechanikai viselkedést, amely a forraszanyag tökéletes átolvadása mellett a leghomogénebb, a legkevesebb buborékot tartalmazza [A1, A2].

T1.4. Rögzített besugárzási idők mellett az alkalmazott lézerteljesítményt, illetve állandó lézerteljesítmény mellett a besugárzási időket változtatva feltérképeztem a lézerforrasztott Hilumin® és DC01 lemezpárok elektromos ellenállásának és szakító-nyíró szilárdságának e két folyamatparamétertől való függését. Kísérletileg igazoltam, hogy mind a teljesítmény, mind a besugárzási idő növelése javítja a kötés elektromos és mechanikai tulajdonságait, illetve csökkenti azok szórását, mindaddig, amíg az adott teljesítmény-besugárzási idő páros nem eredményezi a felső lemez megolvadását. Megállapítottam, hogy ezen olvadási küszöbhez tartozó energiánál nagyobb energiájú megmunkálás esetén a kötés mindkét tulajdonsága ugrásszerűen romlik, és mind az elektromos ellenállás, mind pedig a szakító-nyíró szilárdság szórása megnő [A1, A2].

Mivel a kötés jelentette elektromos ellenállás geometriai limitek miatt önmagában nem mérhető, a lézerforrasztott lemezpárok elektromos jellemzése komplex feladat. A mérési módszerre sincs elfogadott szabvány. Eredményeim – egy a nagy áramok okozta problémákat kiküszöbölő ellenállás mérési módszer bevezetése mellett – olyan összefüggéseket adtak meg a szendvics elektromos ellenállása és a kötetést alkotó forrasz mennyisége, geometriája és morfológiája között, amelyek hozzájárultak a bonyolult folyamatok jobb megértéséhez.

T2.1 A forrasztott lemezpárok elektromos viselkedésének mérésére alkalmazott négyponos ellenállásmérést önellenőrzővé tettem azzal, hogy az eddig kizárólagosan alkalmazott, állandó, értelemszerűen nagy áram mellett mért feszültségesésből számított ellenállás helyett több áramértéknél mértem a feszültségesést, és az ellenállás értékét a feszültségesést az áramerősség függvényében megadó egyenes meredekségként adtam meg. Azzal, hogy a mérés során az áramerősséget csak addig növeltem, ameddig a mérési pontok pontosan illeszkedtek az egyenesre, kiküszöböltem a nagy áramok melegítéssel okozott hibáját [A3].

T2.2. A mért ellenállás – mérési távolság függvények viselkedése alapján közeli és távoli zónákat különböztettem meg. Megmutattam, hogy ezek határát a kötési terület széle jelöli ki. Az ellenállás távolságfüggését mindkét zónában lineáris függvények írják le. Az egyenesek meredekségei a közeli zónában és a tengelymetszetek mindkét zónában érzékenyen változnak a forrasztóanyag mennyiségével, ami viszont nincs hatással a távoli zónabeli meredekségekre sem a Hilumin®, sem a DC01 lemezpárok esetén. Ez azt jelzi, hogy míg az első három mennyiség a kötéshez kapcsolható, a távoli zónabeli meredekség a lemez anyagi minőségét jellemzi. Az, hogy a kötéshez kapcsolható három mennyiség hogyan változik a forrasztóanyag térfogatának függvényében, teljes összhangban van az T1.1

tézispontban leírt morfológiai képpel [A3].

T2.3. A COMSOL Multiphysics rendszerben végzett numerikus modellezés hasznosnak bizonyult a kísérletileg nehezen vagy egyáltalán nem változtatható kísérleti paraméterek hatásának felderítésére. A közelítő modellekkel végzett numerikus szimulációk bebizonyították, hogy a forraszanyag következő öt geometriai tulajdonsága befolyásolja annak elektromos viselkedését: a két lemez közötti, visszaszilárdult forraszanyag vastagsága, az effektív kötési terület, a lyukak teljes területe, a teljes kötési terület, amely az effektív kötési terület és a lyukak területének összege, és végül a lyukak elhelyezkedése a teljes forrasztott területen belül.

Annak megértéséhez, hogy hogyan befolyásolja a visszaszilárdult forraszanyag geometriája az elektromos viselkedést, alapvető volt annak felismerése, hogy az egybefüggő kötési területeken az áram kb. 97%-a a külső 10%-os peremen folyik át, ugyanakkor minden egyes lyuk „visszatérő áram” forrásaként működik.

A közeli és távoli zónához tartozó meredekségekre és tengelymetszetekre vonatkozó szimulációs eredményeim alapján megállapítottam, hogy a távoli zónában a $R(d)$ függvény meredeksége valóban anyagspecifikus (lásd a 2.2), azt a lemezanyag elektromos fajlagos vezetőképességének és a lemez áramirányra merőleges

keresztmetszetének hányadosa definiálja. A közeli zónában a meredekségek a forrasanyag mennyiségével korrelálnak, annak növelésével csökkennek. A közeli és a távoli zónában is érvényes összefüggést adtam meg a meredekség és a lemezek és a forrasanyag fajlagos ellenállása és keresztmetszete között.

A tengelymetszetek a távoli zónában az effektív kötési területtől való reciprok függést mutatnak, 0,65-ös exponenssel. Változásuk azt jelzi, hogyan változik a forrasanyag ellenállásának a hozzájárulása a forrasztott lemezpár ellenállásához. A közeli zónában a metszéspontok viselkedését a forrasanyagban maradó lyukak dominálják: a tengelymetszet a lyukak összterületével arányosan változik. A tengelymetszetek tehát mindkét zónában arról hordoznak információt, hogyan és mennyire befolyásolja a forrasztott kötés geometriája annak ellenállását [A3].

5. Hivatkozások

[1] Európai Parlament, „Európai klímarendelet,” Európai Parlament, [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/hu/article/20190926STO62270/mit-jelent-a-karbonsemlegesség-es-hogyan-erhető-el-2050-ig>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].

[2] IEA, „Electric vehicles,” IEA, [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/transport/electric-vehicles>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024]

[3] M. Zwicker, M. Moghadam, W. Zhang és C. Nielsen, „Automotive battery pack manufacturing – a review of battery to tab joining,” *Journal of Advanced Joining Processes*, kötet 1, p. 100017, 2020.

[4] R. V. Nanditta és N. B. Rahul, „Review on Comparative Study of Various Automotive Cell Joining Techniques and Challenges,” in *IEEE, India*, 2022.

[5] H. Kastler és K. Menzl, „Effective Battery Design and Integration of Cylindrical Cells for High Power Application,” *Proceedings of CTI SYMPOSIUM 2019*, kötet 1, pp. 283-293, 2019.

[6] J. F. Ready: *LIA Handbook of Laser Materials Processing*, Magnolia Publishing Inc., (2001)

[7] K. Ferjutz, Joseph R. Davis: *ASM Handbook Vol6 Welding, Brazing and Soldering*, ASM International, (1993)

[8] M. Brand, E. Kolp, P. Berg, T. Bach, P. Schmidt és A. Jossen, „Electrical resistances of soldered battery cell connections,” *Journal of Energy Storage*, kötet 12, pp. 45-

54, 2017.

6. Publikációk

[A1] **A. Körmöczi**, G. Horváth, T. Szörényi and Zs. Geretovszky: „Laser-Assisted Filler-Based Joining for Battery Assembly in Aviation”, SAE International Journal Of Aerospace, 13(2), 129-141 (2020), MTMT: 31880888, IF(2022): 0,4

[A2] **Andor Körmöczi**, Gábor Horváth, Tamás Szörényi, Zsolt Geretovszky, „Laser soldering of nickel plated steel sheets”, Journal of Laser Applications, 36 (1), 012030 (2024), IF(2022): 2,1

[A3] **Andor Körmöczi**, Gábor Horváth, Tamás Szörényi, Zsolt Geretovszky, „Combined experimental and numerical modelling of the electrical behaviour of laser soldered steel sheets”, [under review],

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott, mint a

Andor Körmöczi, Gábor Horváth, Tamás Szörényi, Zsolt Geretovszky, „*Laser soldering of nickel plated steel sheets*”, Journal of Laser Applications, **36** (1), 012030 (2024)
doi.org/10.2351/7.0001244

publikáció társzerzője nyilatkozok arról, hogy a Körmöczi Andor doktor jelölt „*Vékony fémlemezek lézeres forrasztása átlapolt kötési geometriában*” című doktori értekezésében felhasznált, a jelölt 1.1., 1.2., 1.3., 1.4. tézispontjaiban 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 1.1., 1.2., 1.3., 1.4. tézispontokban szereplő eredményeket PhD fokozata megszerzéséhez felhasználja.

Szeged, 2024. 02. hó 29. nap



Dr. Geretovszky Zsolt

témavezető

társzerző



Dr. Szörényi Tamás

társfémavezető

társzerző



Horváth Gábor

társzerző

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott, mint a

Körmöczi, A., Horváth, G., Szörényi, T., and Geretovszky, Z., “*Laser Assisted Filler-Based Joining for Battery Assembly in Aviation*”, SAE International Journal of Aerospace. 13(2):129-141 (2020), doi:10.4271/01-13-02-0011

publikáció társszerzője nyilatkozok arról, hogy a Körmöczi Andor doktor jelölt „*Vékony fémlamezek lézeres forrasztása átlapolt kötési geometriában*” című doktori értekezésében felhasznált, a jelölt 1.1., 1.2., 1.3., 1.4. tézispontjaiban 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 1.1., 1.2., 1.3., 1.4. tézispontokban szereplő eredményeket PhD fokozata megszerzéséhez felhasználja.

Szeged, 2024.02..... hó ..29..nap



Dr. Geretovszky Zsolt

témavezető

társszerző



Dr. Szörényi Tamás

társtémavezető

társszerző



Horváth Gábor

társszerző

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott, mint a

A. Körmöczi, G. Horváth, T. Szörényi and Zs. Geretovszky, “*Combined experimental and numerical modelling of the electrical behaviour of laser soldered steel sheets*”,
(bírálat alatt)

publikáció társzerzője nyilatkozok arról, hogy a Körmöczi Andor doktor jelölt „*Vékony fémlemezek lézeres forrasztása átlapolt kötési geometriában*” című doktori értekezésében felhasználta, a jelölt 2.1., 2.2., 2.3. tézispontjaiban 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 2.1., 2.2., 2.3. tézispontokban szereplő eredményeket PhD fokozata megszerzéséhez felhasználja.

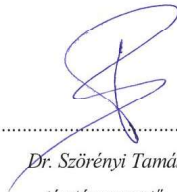
Szeged, 2024. ⁰²..... hó ²⁹.....nap



Dr. Geretovszky Zsolt

témavezető

társzerző



Dr. Szörényi Tamás

társ-témavezető

társzerző



Horváth Gábor

társzerző