

Lézeres kötések elektromos ellenállásának jellemzése

Körmöczi Andor*, Horváth Gábor, Szörényi Tamás, Geretovszky Zsolt
Szegedi Tudományegyetem, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

H-6720 Szeged, Dóm tér 9, Magyarország

*kandor@titan.physx.u-szeged.hu

Absztrakt

Napjainkban a környezettudatos gondolkodásnak köszönhetően egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a hibrid és a tisztán elektromos repülőgépek fejlesztésére, amelyek az akkumulátorok korlátozott kapacitása miatt csak viszonylag kis távok megtételét teszik lehetővé. Az akkumulátorbankokban tárolt energia felhasználásának hatékonysága az akkucellák kémiai állapotának és felépítésének fejlesztése mellett az egyes cellák kötésekor fellépő energiaveszteségek csökkentésével is javítható. Ezt a cellák minél kisebb elektromos ellenállású kötéseivel lehet elérni. Erre nyújt egy lehetséges megoldást a lézeres hegesztés és a hozaganyaggal történő lézeres lágy/ keményforrasztás.

A lézeres technikákkal készült kötések tipikusan néhány 10 – néhány 100 $\mu\Omega$ -os ellenállással rendelkeznek. Az ilyen nagyságú ellenállások mérése érdekes és komplex probléma, amelynek megoldására jelenleg nem található szabványosított módszer. Munkánkban – egy rövid bevezetőt követően – bemutatjuk a lézeres kötések elektromos ellenállása jellemzésének kihívásait és az általunk kidolgozott mérési módszert. Ezt követően két DC01 acéllemez lézeres kötéseinek, a javasolt mérési módszerrel kapott, elektromos jellemzésének eredményeit ismertetem. A teljes megértés érdekében a rendszer elektromos viselkedését analóg áramkörök segítségével, illetve Comsol programmal modelleztem. Befejezésésként a modell számítások eredményeit összevetem a mért adatokkal.

Munkánkat az EFOP-3.6.1-16-2016-00014 számú, „Diszruptív technológiák kutatásfejlesztése az e-mobility területén és integrálásuk a mérnökképzésbe” című projekt támogatja.

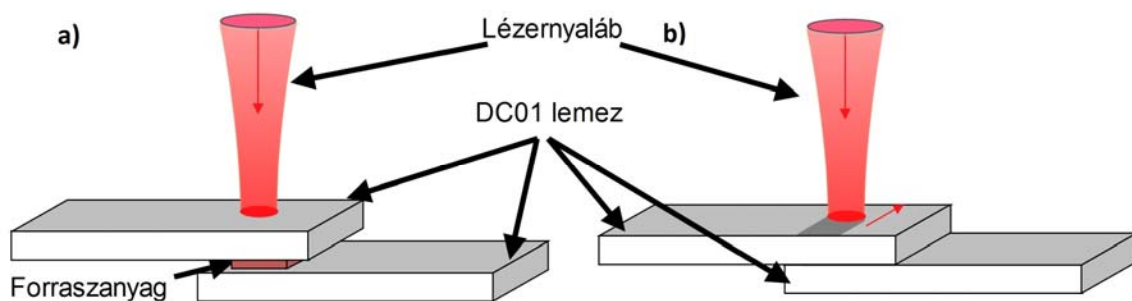
1. Bevezető

Napjainkban a környezettudatos szemléletnek köszönhetően egyre nagyobb teret nyernek a környezetbarát megoldások. A modern járművek fejlesztése kapcsán ennek jegyében jöttek létre a hagyományos belső égésű motorok alternatívájaként a hibrid vagy teljesen elektromos meghajtású rendszerek [1]. Az elektromos járművek fő problémája az akkumulátor cellák korlátozott kapacitása [2] mellett az akkumulátorbankokba összekapcsolt cellák között kialakított kötéseknél fellépő energiaveszteség [3].

Az energiaveszteséget a kötések elektromos ellenállása határozza meg. A szigorú követelményeknek megfelelő kötések létrehozásának ígéretes alternatívája lehet a lézeres hegesztés és a hozaganyaggal megvalósított lézeres kötés, a lágy-, illetve keményforrasztás [4,5]. Az utóbbival kiváló elektromos tulajdonságú kötéseket lehet létrehozni alacsony hőterhelés mellett. Többek között ezért is alkalmazzák a lézeres forrasztást előszeretettel az elektronikában. Ebben a cikkben az ilyen technikákkal létrehozott kötések elektromos jellemzése kihívásait mutatjuk be.

2. A kísérleti körülmények

A kísérleteink során használt modellrendszerben két 0,5 mm vastag DC01-es acél lemez között hoztunk létre kötést. Az acél lemezek a Li-ion hengeres cellák saruinak anyagát, a Hilumin® helyettesítették. A Hilumin® nikkel ötvözzel bevont DC04-es acél. Az alapfém elektromos és mechanikai tulajdonságai hasonlóak a DC01-eshez. Forrasztás esetén a lemezek közé 0,16 mm vastag, 5 mm széles Sn99.3Cu0.7 lágyforrasztóanyag szeleteket helyeztünk (olvadási hőmérséklet 227 °C), ahogy ez a sematikus 1a. ábrán látható. A lemezeket átlapolt geometriában egy mintatartóban összefogva helyeztük a fény útjába. Hegesztés esetén a mintatartóba befogott mintát egy nagy sebességű, programozható mozgató asztallal (Allen Bradley Ultra 3000) mozgattuk a lézernyaláb alatt. Ez az elrendezés a sematikus 1b. ábrán látszik.



1. ábra: a) forrasztás és b) hegesztés sematikus rajza

Hőforrásként egy 400 W-os, folytonos üzemű, 1071 nm hullámhosszú, 1,08 M² értékű, SPI gyártmányú szállézer használtunk. Hegesztés esetén a fényútba egy 300 mm fókusztávolságú gyűjtőlencsét helyeztünk, ami 0,3 mm átmérőjű foltméretet eredményezett. A forrasztás esetén a gyűjtőlencse fókusztávolsága 1000 mm volt. Az összeforrasztandó lemezeket úgy helyeztük be a fényútba, hogy a konvergens nyaláb 4,5 mm átmérőjű foltot hozzon létre a minta felszínén. A lencse elé helyezett kicsatoló elemmel in-situ teljesítménymérést végeztünk egy S130C fotodióda segítségével.

Nyilvánvaló, hogy a mérés célja a létrejövő kötések elektromos jellemzése. . Méréstechnikai nehézséget jelent az, hogy az ilyen kötések kis ellenállásúak, tipikusan néhány 10 – néhány 100 $\mu\Omega$ -osak. Ezek az értékek a mérőkábelek ellenállásának nagyságrendjébe esnek. A probléma megoldásának érdekében egy az irodalomban [6] használthoz hasonló, 4-pontos ellenállás mérést alkalmaztunk: az áramot a lemezek végén csavaros módszerrel tápláltuk be egy TTi CPX200 tápegységből, majd a 21°mm hosszú szakaszon eső feszültséget fixen tartott mérőtűkkel mértük egy Keithley 2401 asztali multiméter segítségével úgy, hogy a kötés geometriai közepe egybeessen a feszültségmérési távolság közepével [7]. Megjegyzendő, hogy ez a módszer a minták elektromos jellemzőinek összehasonlítására tökéletesen megfelelő, azonban egzaktsági ellenállást nem ad.

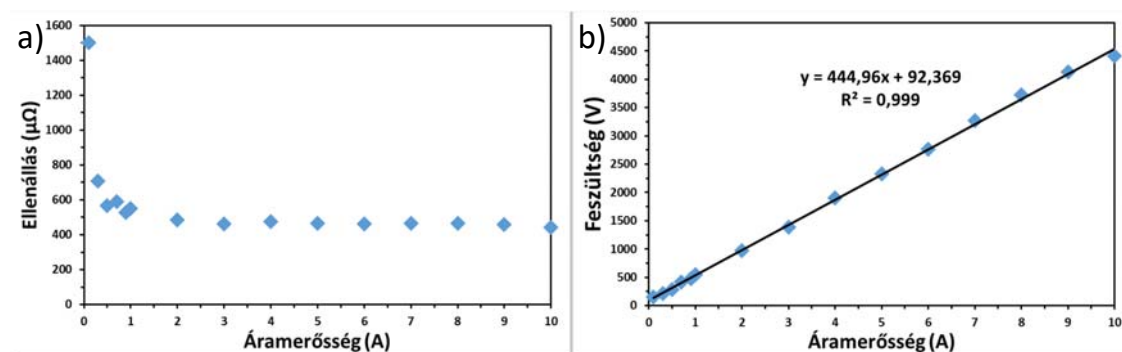
Az elektromos ellenállás mérés modellezése során a Falstad által készített Circuit JS, és a COMSOL Multiphysics® nevű programokat alkalmaztam.

3. Az eredmények

3.1. Az elektromos ellenállás mérésére kidolgozott módszerek

A kis ellenállások pontos meghatározása érdekében nagy betáplált áramot kell alkalmazni, hiszen nagy áram esetén nagyobb lesz a mintán eső feszültség, amelyet az asztali multiméterrel így pontosabban tudunk meghatározni. A számok nyelvén: egy $15 \mu\Omega$ nagyságú, réz anyagú ellenállás 1 %-os hibán belüli meghatározásához legalább 180 A nagyságú áram szükséges [6]. Ilyen nagy áramok használata viszont hőmérséklet növekedést okoz, amely megváltoztatja a mérni kívánt ellenállás nagyságát, végső esetben akár a kötés károsodását is okozva. Ezért ez az út nem járható, a hőmérséklet megemelkedését okozó nagy áramok alkalmazása helyett más megoldási módszert kellett találni.

Az általunk *aszimptotikus módszerek* keresztelt egyik megoldás lényege, hogy a mért ellenállást több áramerősségen is megmérjük, majd a kapott értékeket az áramerősség függvényében felrakva meghatározzuk milyen ellenállás érték felé tart a görbe. A 2a. ábrán példaként egy 360 W-os lézerteljesítménnyel és 50 mm/s szkennelési sebességgel hegesztett minta ellenállásának a mérőáram nagyságától való függését mutatom be. Ez a módszer szemléletes, de viszonylag pontatlan. Az általunk *meredekség módszerek* hívott másik megoldás alapja, hogy a több áramerősségen mért feszültség-áramerősség párokat ábrázolva, a mérési pontokra illesztett egyenes meredeksége megadja a mért ellenállás értékét. Ennek a módszernek, azon felül, hogy pontosabban megadja az ellenállás értékét, mint az előző módszer, további előnye, hogy egyben önellenőrző is, hiszen, ha minden pont jól illeszkedik az egyenesre, ez azt jelenti, hogy a mérés során alkalmazott áramerősségek mindegyikére igaz, hogy az átfolyó áram nem okozott hőmérséklet emelkedést, az ellenállás konstans. Erre a módszerre példaként a 2a. ábrán felrakott mérési adatokra illesztett egyenest mutatom be a 2b. ábrán.

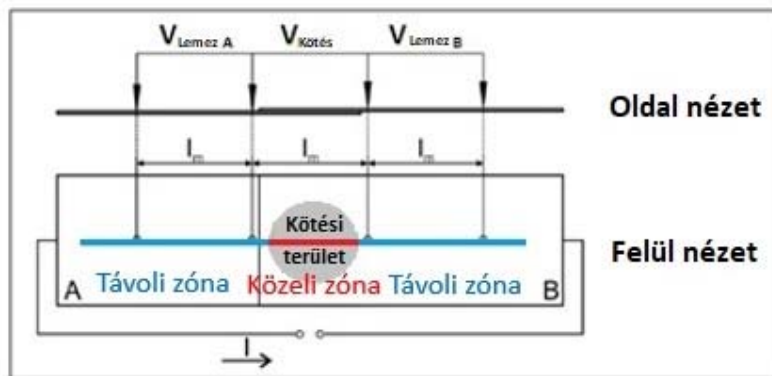


2. ábra: Egy 360 W-os lézerteljesítménnyel és 50 mm/s szkennelési sebességgel hegesztett minta ellenállás mérésének kiértékelése az aszimptotikus a), illetve a meredekség b) módszerrel

Az alábbiakban bemutatott mérésink során a meredekség módszert alkalmaztuk. További vizsgálatok alapján határoztuk meg, hogy maximum 10 A-ig mérhetünk észrevehető hőmérséklet emelkedés nélkül. Megállapítottuk, hogy az ellenállás 1 %-os hibán belüli meghatározásához legalább 6 mérési pontra van szükség. Ennek megfelelően a teljes 10 A-es tartományban 0,1; 0,5; 1; 3; 6 és 10 A áramon mértünk.

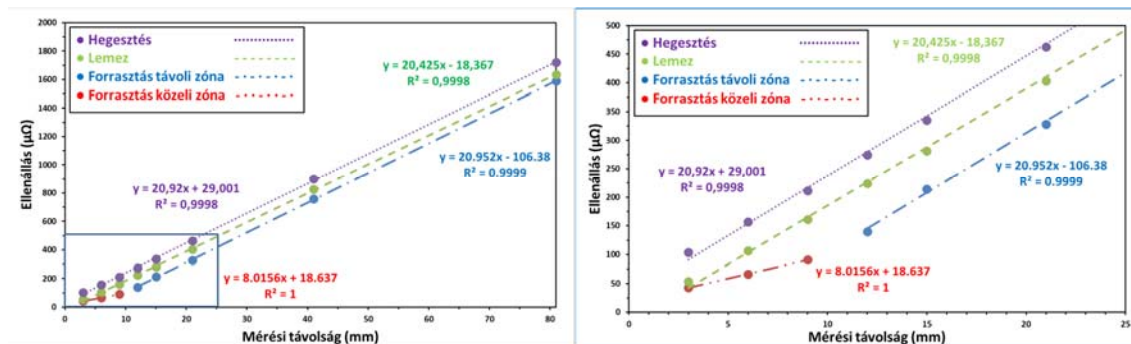
3.2. Hegesztés-forrasztás, a távoli zóna

Annak vizsgálatára, hogy a kötés ellenállása mekkora részét képezi az előzőekben ismertetett módszerrel mért ellenállásnak, a mérőtűk távolságát 3, 6, 9, 12, 15, 21, 41 és 81 mm-re beállítva mértem az ellenállás változását. Az eredmények kiértékelése során két esetet különböztettem meg. *Távoli zónabelinek* tekintettem azokat az eseteket, amikor a kötési területen kívül mértem, *közeli zónának* pedig azokat, amikor a mérés a kötési területen belül történt (3. ábra).



3. ábra: A távoli és a közeli zóna megkülönböztetése a mérés során.

Forrasztás esetén a kötési terület akár 10 mm átmérőjű is lehet. Hegesztésnél ez a kötési terület sokkal kisebb. A hegesztési varrat szélessége 0,5 mm körüli, így hegesztés esetén minden mérés a távoli zónában történt. Az összehasonlítás érdekében a kötés nélküli lemezen is mértünk ellenállásokat a fent említett távolságokon. Az eredményeket a 4. ábrán mutatjuk be. A forrasztás esetén a két zóna közötti határ jól definiálható, hiszen különböző meredekségű egyenesekre illeszkednek a mért pontok a két zónában. Hegesztés esetén ilyen határt nem figyeltünk meg, ami várható volt, hiszen nem tudtunk mérni a kötési területen belül.



4. ábra: Egy DC01 lemezen kötés nélkül, illetve hegesztett és forrasztott mintákon mért ellenállások a mérési távolság függvényében.

A távoli zónában a három egyenes meredeksége 2 %-on belül megegyezett. Ennek alapján, a jól ismert

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

összefüggés analógiájára, a meredekséget egy az anyagra jellemző, áramjárta keresztmetszettel normált, fajlagos ellenállás szerű mennyiségként értelmeztük. Azt, hogy ebben a zónában a lemez okozta ellenállás a domináns, az is bizonyítja, hogy – amint azt az 1. táblázatban megmutatjuk – különböző anyagú, azonos szélességű lemez csíkok ellenállásának a mérése során különböző meredekségeket kaptunk.

Lemez anyaga	Vastagság (mm)	Meredekség ($\mu\Omega/\text{mm}$)
DC01	0,50	20,259
Edzett acél	0,50	22,543
Saválló acél	0,50	58,075
Hilumin	0,25	322,310
Alumínium ötvözet	1,00	1,799
Alumínium (99%)	1,00	1,717
Réz ötvözet (bronz)	1,00	4,144

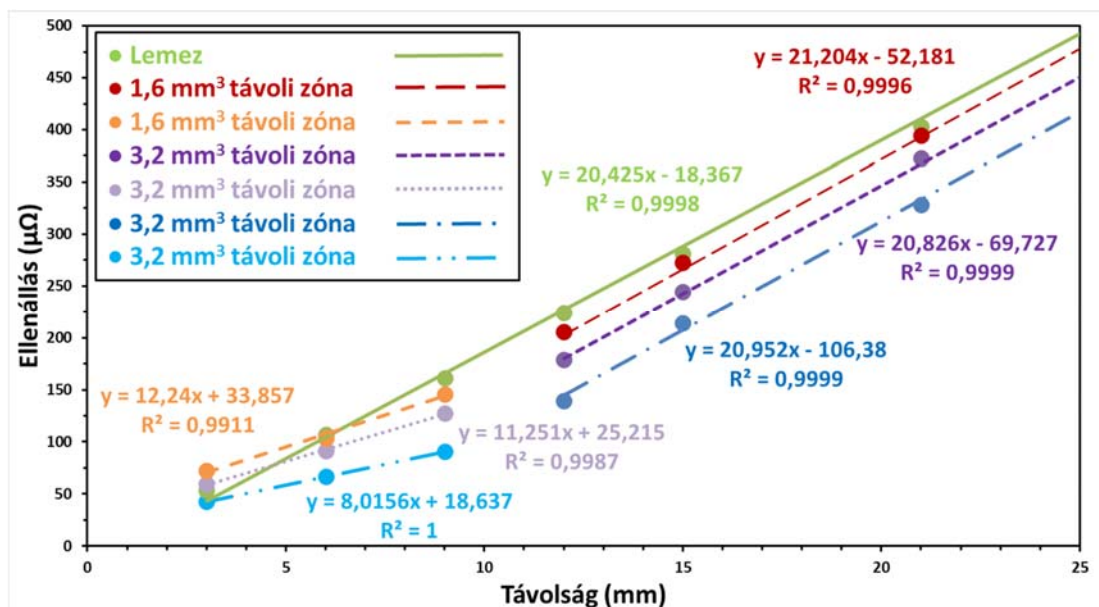
1. táblázat: Az eltérő anyagok meredeksége különböző

Megfigyelhető, hogy a jobban vezető anyagoknál (mint például az alumínium vagy a réz ötvözet) a mért meredekség kisebb, míg a kevésbé jól vezető anyagok (mint például a bevonatolt acéllemezek) meredeksége nagyobb. Ez is alátámasztja a meredekség fenti értelmezését.

A 4. ábrán jól látszik, hogy a mért ellenállások hegesztés esetén (lila pontos egyenes) mindig nagyobbak a lemez ellenállásánál (zöld szaggatott egyenes), 21 mm-es mért távolság esetén pl. ~ 450 vs. $410 \mu\Omega$, míg forrasztással (kék pont-szaggatott egyenes) a lemez ellenállásánál kisebb ellenállású (~ 320 vs. $410 \mu\Omega$) kötést lehet létrehozni. A 4. ábrán a tengelymetszetek különbségeként leolvasható ellenállás értékek előjele és nagysága a hegesztéssel, illetve forrasztással összekötött DC01 lemezeknek az alapfémhez viszonyított ellenállása különbségeként értelmezhető. A különbség egy oka lehet az, hogy forrasztáskor az ekvivalens körhöz hozzáadunk egy új, eredendően kisebb ellenállású tagot, míg hegesztéskor a varrat vezetőképessége a megváltozott anyagi tulajdonságok következtében rosszabb lesz az acél lemez vezetőképességénél, ami egy nagyobb ellenállású tagot jelent.

3.3. A közeli zóna forrasztás esetén

A közeli zónában ellenállásokat mérni csak forrasztott minták esetén tudtunk, hiszen ott a kötés laterális kiterjedése ezt megengedte. A közeli zónára vonatkozó ellenállás-távolság görbe meredekségének és tengelymetszetének értelmezéséhez 1,6; 3,2 és 4,8 mm³ térfogatú forrasztanyag felhasználásával készült mintákon végeztünk méréseket. Minden további folyamatparaméter állandóan tartása mellett a forrasztanyag mennyisége határozza meg a kötési terület nagyságát. Amint az az 5. ábrán látható, a forrasztanyag mennyiségének és így a kötési terület nagyságának a növelésével monoton csökken a mért ellenállás, az egyenesek folyamatosan távolodnak a kötésmentes lemez egyenesétől. Az ellenállás forrasztanyag mennyiségének növelésével bekövetkező csökkenése a tengelymetszetek értékének folyamatos csökkenésében is manifesztálódik.



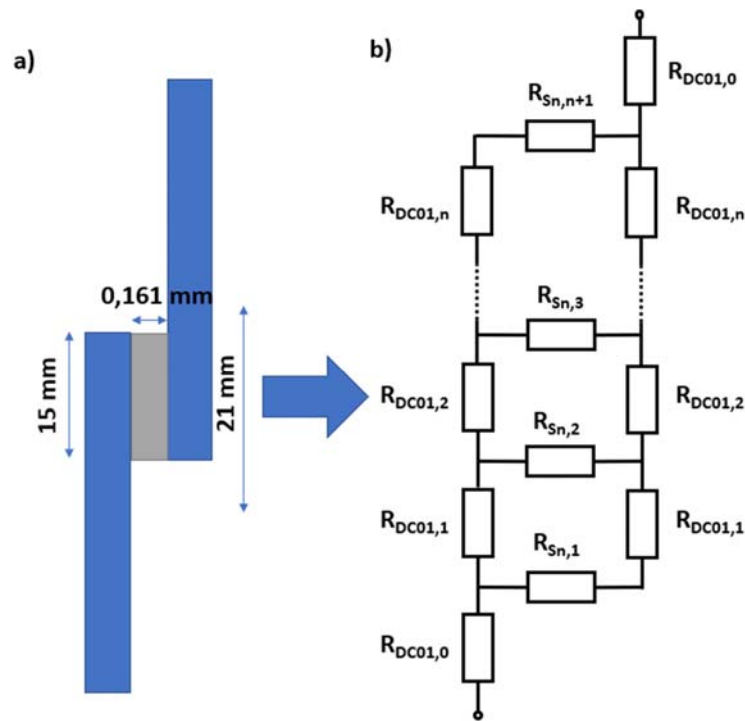
5. ábra: Forrasztott minták ellenállás – mért távolság grafikonja különböző forrasztanyagmennyiség esetén.

A távoli zónában az egyenesek meredeksége ismét 2%-on belül állandó. A forrasztanyag mennyiségének 1.6 mm³-ről 4.8 mm³-ig növelése az összeforrasztott lemezeknek az alaplemez ellenállásához viszonyított ellenállásában 33,8; 51,4, illetve 88,0 μΩ-os csökkenéshez vezet. A közeli zónában mind az egyenesek meredeksége mind a tengelymetszet csökken a forrasztanyag mennyiségének a növelésével, ami érthető, hiszen a hozaganyag okozta kötés ellenállása egyre meghatározóbb. A meredekség csökkenése annak a következménye, hogy a forrasztanyag jobb vezető, mint az acél lemez, az egyre csökkenő ellenállás értékek pedig egyre inkább a kötés ellenállását jellemzik.

4. Modellezés

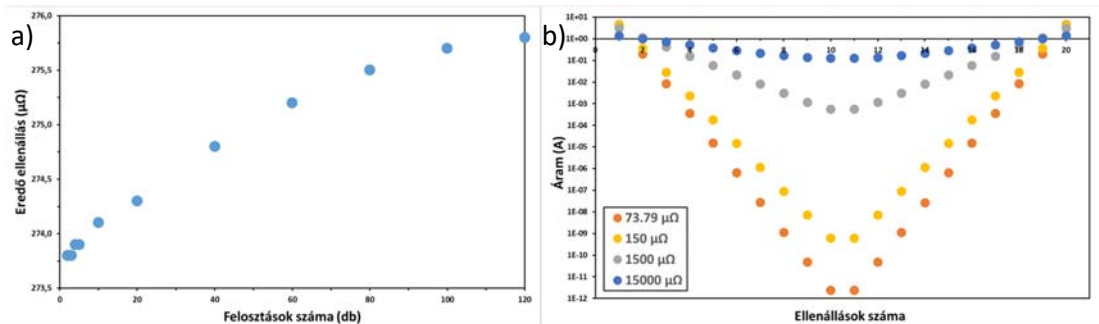
4.1. Az analóg áramkör modell

A kísérleti eredmények értelmezését segítő első közelítésként analóg áramkörrel modelleztük a rendszert. A modellben a forraszanyag téglatest formájában helyezkedett el a két lemez teljes átfedésén, ahogy az a 6a. ábrán látszik. Ennek ellenállását 1D-ban 2 és 120 közötti számú rész-ellenállásra osztottam fel az áram irányában. Az ellenállások értékét a rendszerben részt vevő anyagok geometriája és mért fajlagos ellenállása alapján határoztam meg. A 6b. ábrán a rendszer analóg áramköre látható $n+1$ felosztás esetén. Az ekvivalens körök eredő ellenállását a Falstad által készített Circuit JS program segítségével számoltam ki.



6. ábra: A forrasztott minta a) sematikus ábrája és annak b) analóg áramkörös modellje.

A felosztások számának a növelésével az eredő ellenállások egy adott ellenállás értékhez tartanak. Ez az érték $275,8 \mu\Omega$ (7a. ábra). A modellezés fontos tanulsága az volt, hogy a betáplált áram nagy része a szélső ellenállásokon folyik. Az ott folyó és a teljes betáplált áram aránya a forraszanyag ellenállásának nagyságától függ. A 7b. ábra 20 ellenállás esetére logaritmikus skálán mutatja az egyes ellenállásokon átfolyó áramot. A forraszanyag geometriájából a mért fajlagos ellenállás figyelembevételével adódó ellenállással ($73,79 \mu\Omega$) számolva, a modell szerint a betáplált áram 95,8% a szélső ellenállásokon folyik. Ha 2 nagyságrenddel nagyobb forraszanyag ellenállással számolunk, akkor ez az arány ugyan lecsökken 62,9 %-ra (a V alakú görbe ellaposodik), de a „széli” effektus változatlan marad.



7. ábra: A modellszámítás eredménye: az eredő ellenállás a rész-ellenállások számának függvényében a), illetve az egyes ellenállásokon átfolyó áramok 20 rész-ellenállás esetén b).

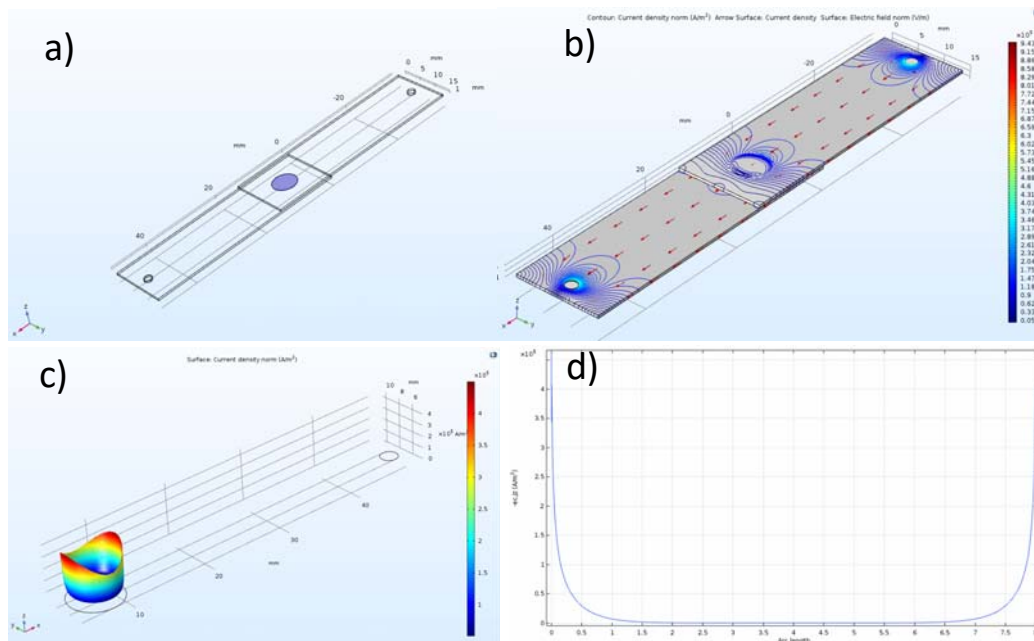
A modell geometria értelemben realisabb finomításaként a forraszanyag egy 5mm sugarú henger formájában helyezkedett el a két lemez között. Ez sokkal valóságghűbben írja le a kötés utáni állapotot. Az előző modell eredményéhez hasonlóan a felbontás számának növelésével egy adott eredő ellenálláshoz tartunk, ami most $276,6 \mu\Omega$. Ez az érték már közel hasonló az általunk eddig mért legjobb elektromos tulajdonságú kötés ellenállásához, ami $275,6 \mu\Omega$ volt. Az áram nagy része az előzőhöz hasonlóan a szélső ellenállásokon folyik.

Ezek az eredmények azt sugallják, hogy az élek mentén történő forrasztás egy jó kötési alternatíva, hiszen a térfogati kötés belsejében folyó áramok hozzájárulása a vezetéshez nem számottevő.

4.2. A 3D modell

Ahhoz, hogy megerősítsük azt a megállapításunkat, miszerint a kötési terület szélén folyik az áram legnagyobb része, egy realisabb, 3D-s numerikus modellt hoztam létre. A 3D-ban történő viselkedést a COMSOL Multiphysics® program segítségével modelleztük.

A modellben használt geometriát (két lemez között henger alakú forraszanyag) a 8a ábra mutatja be. A lemezek 50 mm hosszúak, 15 mm szélesek és 0,5 mm vastagok, 15 mm átfedéssel. Anyaguk a COMSOL Multiphysics® könyvtárban megtalálható „Iron [solid]”. Forraszanyagként szintén egy a könyvtárban megtalálható anyagot választottam, amelynek a tulajdonságai a legközelebb estek a kísérletekben használtéhoz. Ez a Sn96,5Ag3,5 volt, amelyet henger, illetve téglatest formában helyezkedett el a két lemez között. A henger sugarát 5 milliméterre, magasságát 0,06 milliméterre állítottuk be. A téglatest két oldala 8,8 mm, magassága szintén 0,06 mm volt. A program a beépített „Electric currents” modul segítségével számolta ki az áramsűrűség vektorok nagyságát és irányát, a program által definiált „extremely fine” tetraédes diszkretizáció mellett. Az 1 A nagyságú áram a jobb oldali lyuk peremén került betáplálásra, és a földpontot jelképező, bal oldali lyuk karimáján hagyta el a mintát. A program által kiszámolt áramsűrűség vektorok irányát, illetve az izovonalakat a 8b ábra mutatja.



8. ábra: A modellben alkalmazott geometria a), az áramsűrűség vektorok iránya és az izovonalak b), az áramsűrűség vektor nagysága a henger alakú forrasztóanyag felületén 2D-ban c), illetve 1D-ban d)

Ez a modell az áramsűrűség vektorok viselkedését adja meg. Az analóg áramkör modell felhasználásával kapott eredménnyel egyezően, a forrasztóanyag geometriájától függetlenül itt is igaznak bizonyult, hogy az áram döntő része a kötési terület szélén folyik. Ez jó látható a 8c ábrán, amely két dimenzióban mutatja az áramsűrűség vektor nagyságát a henger alakú forrasztóanyag felületén. Annak érdekében, hogy ez az eredmény összehasonlítható legyen az analóg áramkör modellnél kapott eredményekkel, a 8d ábrán egy dimenzióban is ábrázoltam az áramsűrűség vektor nagyságát a henger áram irányával párhuzamos szimmetria tengelye mentén. Logaritmus alapú skálán ábrázolva ennek a görbének az alakja tökéletesen megegyezik az áramkör módszerrel kapott, 7b ábrán bemutatott, V alakú görbéével. A 3D modell eredményei megerősítik azt a konklúziót, hogy az élek mentén forrasztott minta jó kötési alternatíva.

5. Összefoglaló

Az elektromos hajtásláncok alkalmazása során kulcskérdés az energiahatékonyság. Az energiavesztés az akkumulátorbank cellái közötti kötések elektromos ellenállása határozza meg. Az ilyen típusú kötések elektromos jellemzőinek mérése jelenleg még nincs szabványosítva. A cikkben a kötések elektromos ellenállásának mérésére kidolgozott módszerünket mutattuk be. A mérővezetékek ellenállásának kiküszöbölésére 4-pontos ellenállás mérést alkalmaztunk. Az ellenállás értékeket feszültség-áram párokat ábrázolva, a bevezetett meredekség módszerrel határoztuk meg, kiküszöbölve ezzel a nagy áramok okozta melegedést. Megmutattuk, hogy a hegesztési varrat ellenállása nagyobb, a forrasztott kötésé kisebb, mint az alap fémé.

A probléma analóg áramköri modellezése megmutatta, hogy már kevés felosztással is könnyen visszakapható a mért ellenállás, és hogy az áram nagy része a kötési terület szélén található ellenállásokon folyik mind téglatest mind henger alakú forrasztanyagot feltételezve. A COMSOL Multiphysics® három dimenzióban is ugyanerre az eredményre vezetett: az élek mentén történő forrasztás jó kötési alternatíva.

Az eredmények alapján a jövőbeli célok között szerepel a közeli- és a távoli zónabeli viselkedés és az élek mentén történő forrasztási geometria modellezése, továbbá a kötések jellemzése a kísérleti- és a modellezés során kapott eredmények összehasonlítása alapján, a Li-ion hengeres cellák saruinak anyagát képező Hilumin® lemezek hegesztése és forrasztása esetén.

6. Köszönetnyilvánítás

Munkánkat az EFOP-3.6.1-16-2016-00014 számú, „Diszruptív technológiák kutatásfejlesztése az e-mobility területén és integrálásuk a mérnökképzésbe” című pályázat támogatja. Köszönjük az Eduvus Egyetemnek a projektben használt szállézer biztosítását.

7. Felhasznált irodalom

- [1] 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)
- [2] V. Madonna, P. Giangrande, M. Galea, Electrical Power Generation in Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities. IEEE transactions on transportation electrification, 2018, Vol. 4., No. 3
- [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, MSEC2010-34168, pp. 541-549 (2010)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [8] P. A. Schmidt, M. Schweier, M. F. Zaeh, “Joining of lithium-ion batteries using laser beam welding: electrical losses of welded aluminum and copper joints”, ICALEO 2012,
- [9] A. Körmöczi, G. Horváth, T. Szörényi, and Zs. Geretovszky, “LaserAssisted Filler-Based Joining for Battery Assembly in Aviation,” SAE Int. J. Aerosp. 13(2):2020, doi:10.4271/01-13-02-0011.