

LÍTIUMION CELLÁK HEGESZTETT KÖTÉSEINEK FEJLESZTÉSE

BONDING TECHNOLOGY DEVELOPING OF LITHIUMION CELLS

Kovács Péter¹, Sztupinszky Zsolt², Patkás Simon², Béres Gábor^{1*}, Hareancz Ferenc¹

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

² Videoton Elektro-PLAST Kft., Magyarország
<https://doi.org/10.47833/2021.3.ENG.002>

Kulcsszavak:

hegesztés
ellenállás dudurhegesztés
lézersugaras hegesztés
akkumulátor
kötéstechnológia

Keywords:

welding
resistance projection welding
laserbeam welding
accumulator
bonding technology

Cikktörténet:

Beérkezett 2021. szept. 8.
Átdolgozva 2021. szept. 15.
Elfogadva 2021. szept. 20.

Összefoglalás

A hegesztést előszeretettel használják vékony lemezek összekötésére. Az elektronikaipar és elektromos járművek fejlődésével egyre kiemelkedőbb számban gyártanak akkumulátorpakkokat, amelyekhez elengedhetetlen az akkumulátor cellák kötéseinek fejlesztése. Az ellenálláshegesztés egy ismert, kidolgozott technológia, amely biztosítja gyártásuk esetén a szükséges kötéstechnológiai paramétereket. A cikk összehasonlítja az ellenállásdudurhegesztett és lézersugaras hegesztéssel létrehozott kötéseket. Célunk bemutatni a technológiák működését és az ellenállás dudurhegesztés és lézersugaras hegesztés kötésminőségeit, és fejlesztési lehetőségeit.

Abstract

Welding is preferably used to connect thin sheet metals. The development of electronics industry and electric vehicle industry increases production of accumulator packs. That is why the bonding of accumulator cells needs improvement. Resistance welding is a well-known technology, which assures the needed bonding parameters.

The article compares resistance projection welded bonds and laser beam welded bonds. Our goal is to introduce behaviour of both technologies while showing quality of bonding types and possible developments.

1. Bevezetés

Napjaink fejlődő iparában a lézersugaras technológiák [17-20] kezdenek egyre jobban elterjedni. A lézersugaras hegesztéssel létrehozott kötések optimalizálásának lehetősége meghatározó kutatási területté vált, hiszen mind a gépipar, mind a járműipar területén egy nagyon elterjedt – és egyre gyakrabban alkalmazott - kötéstípusról van szó. A hegesztett kötéseknek meg kell felelniük az egyre szigorúbb minőségi követelményeknek, a varratgeometriának előírászerűnek kell lennie.

A különböző fizikai folyamatok következtében a lézersugaras hegesztéseknek két típusa van, amelyek leginkább a geometriájukról ismerhetők fel. Ha a hegesztéshez használt lézersugár

* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 20 287 52 64
E-mail cím: kovacs.peter2@gamf.uni-neumann.hu

$\approx 10^6$ W/cm²-nél kisebb teljesítmény sűrűségű, akkor a hővezetési hegesztésről beszélhetünk. E határ fölött – egy új fizikai jelenség következtében – a mélyvarratos hegesztés feltételi szabályozzák a technológiai folyamatot.

Technológiai és minőségbiztosítási szempontból lényeges, hogy a különböző hegesztési paraméterekkel milyen varratgeometriákat hozhatunk létre. Ilyen paraméterek a lézersugár teljesítménye, a hegesztési sebesség, a fókuszolt pozíciója, a védőgáz használata és a lézersugár gerjesztési üzemmódja (CW, pulzáló). Ezen beállítások bármelyikének módosítása a varratgeometriában lényeges változást eredményez. A sokféleség ellenére képesnek kell lennünk igazodni a műszaki követelményekhez és a geometriai előírásokhoz. A hegesztési varratok geometriájának jellegzetes adatai a varratmélység, a korona szélesség, a korona magasság, a gyök szélesség és a kidudorodás illetve beszívódás.

A lézersugár–anyag kölcsönhatás eredményeként kialakuló hegesztési varratok geometriai változatosságát hegesztési kísérlet alapján vizsgáltuk. A hegesztési varratok geometriai jellemzőit digitális fénymikroszkóppal vizsgáltuk.

Ezeket a kötéseket ellenálláshegesztett kötésekhez hasonlítottuk, ugyanis az iparban ez egy ismert, kiemelkedő számban alkalmazott technológia. Rendelkezésünkre álltak ellenállás dudorhegesztett cellák, amelyek szintén fénymikroszkópos vizsgálatra kerültek.

A technológiákat összevetve az ellenállás dudorhegesztést szeretnénk felváltani lézersugaras hegesztéssel.

2. A vizsgált kötéstehnológiák bemutatása

A kísérlet során, lítiumion cellák hegesztését vizsgáltuk meg. Célunk volt a kötés technológiáját leváltani, jobb paraméterekkel rendelkező lézersugaras hegesztett kötés létrehozásával. Ugyanis ebben az esetben, fejlődik a termelékenysége a gyártási folyamatnak, egyszerűbb csatlakozó kialakítások kerülhetnek alkalmazásra. Ehhez alaposan megvizsgáltuk a jelenleg alkalmazott és az újonnan fejlesztett kötéstehnológiát.

2.1. Ellenállás dudorhegesztés

Az MSZ EN ISO 4063:2016 szabvány szerinti egyezményes rendszerezést figyelembe véve az ellenállás dudorhegesztések közül a következő típusokat különböztetjük meg:

2 - Ellenállás-hegesztések

23 - Ellenállás dudorhegesztés

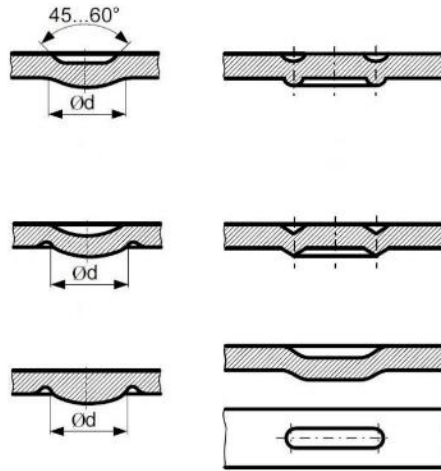
231 - Egyoldali ellenállás dudorhegesztés

232 - Kétoldali ellenállás dudorhegesztés [1].

Ellenállás dudorhegesztés kialakítása történhet természetes dudorokkal, amely esetben a hegesztendő elemek geometriából adódóan alakul ki a kötés feltétele. Nincs szükség a munkadarabok geometriájának átalakítására. Csövek és rudak hegesztésekor beszélhetünk arról, hogy egy pont, vagy vonal mentén érintkeznek a munkadarabok a hegesztés során. A folyamat során az áram hő fejlődést, megolvad az anyag és sajtolóerő hatására kötés jön létre [2-4].

Mesterséges dudorkialakítást kis falvastagságú lemez-lemez, lemez-cső, vagy lemez-csap hegesztésénél használják legtöbbször, de bármilyen alakú munkadarab dudorhegesztését el lehet készíteni mesterséges dudorok kialakításával. Alapkövetelménynek tekintik, hogy a dudor kialakításához szükséges szerszám és a hegesztő elektródok ne legyenek akadályozva a hozzáférhetőségben, és rendelkezésünkre álljon a dudorok kialakításához szükséges berendezés. A dudorok szerepe a hegesztési folyamatban a hegesztett kötés helyének és alakjának pontos meghatározása, emellett, szükséges sajtolóerő és hegesztő áram koncentrációja a kívánt térfogatba [2-4].

Különböző dudorok kialakítására van szükség a technológia során, melyet a 1. ábrán láthatunk



1. ábra: Dudorkialakítások alkalmazása sík lemezeknél [3]

2.2. Lézersugaras hegesztés

A lézersugaras hegesztés legnagyobb előnye abban rejlik, hogy kontaktus nélkül képes kötéseket létrehozni kis és nehezen hozzáférhető helyeken is. Ez azért lehetséges mivel a gépből kilépő fénysugár nagy koncentrátsága miatt nagy hőmennyiséget képes bejuttatni. Az ellenállás ponthegesztéshez képest nagyobb varratok kialakítására is képes és ehhez nem szükséges hozaganyagot használni [5,6].

A módszer egyik nagy hátrányának mondható az, hogy a többi eljárashoz viszonyítva nagyon komplex és épp ezért speciális képzettségek szükségesek hozzá. Negatív tulajdonságaihoz sorolható még az is, hogy egyes esetekben körülményes a hegesztés véghezvitele. Ugyanis egyes felületekről a fény visszaverődhet és ezáltal az elnyelt hő mennyisége szignifikánsan megváltozhat [5].

Az akkumulátor cellák hegesztése során a gyakorlatban két féle sugárforrás terjedt el. A szállézer és a Nd:YAG lézerek. A reflektív anyagok használata esetén az impulzus üzemű lézerek terjedtek el az ipari környezetben. Ennek magyarázata az, hogy az energiát nagyon rövid impulzusok formájában juttatják be a darabba, így a működés során a bejuttatni kívánt energia sokkal nagyobb mértékben elnyelődik, mint a folyamatos üzem esetén. A korábban említett két forrás mindkét üzemmódban fellelhető a piacon, ezáltal a felépíthető rendszerek széles választékát képesek kitenni [5,7,8].

A hegesztés során létrejövő kötés minőségét számos paraméter együttese határozza meg. Ezek közül kiemelendő a teljesítmény, hegesztési sebesség és impulzus sűrűség [9]. A felsorolt paraméterek mind hatást gyakorolnak a varrat minőségére, a beolvadás mélységére és a varrat szélességére [10]. A különbség csupán annyi a felsorolt változók között, hogy a teljesítményt változtatva a varrat méretei egyenes arányban változnak, míg a sebességet változtatva fordított viselkedést tapasztalunk [5].

A paraméterek jó beállításával könnyedén képesek vagyunk változtatni a vastag és vékony darabok kötéseinek kialakítását, valamint a fúziós zóna kiterjedését [11]. Az akkumulátor cellák hegesztése esetén kiemelkedően fontos az, hogy vékony kötéseket létesítsünk. Erre azért van szükség mivel fent áll a kockázata annak, hogy a lézerefény átégeti a cella felszínét és megsérti azt [12]. Abban az esetben azonban, ha több millimétert kell esetlegesen összekötni lehetséges a kulcslyukhegesztés alkalmazása [5].

A lézersugaras technológia egyik legnagyobb előnye a gyors fő és mellékmozgások alkalmazása. Ezzel a módszerrel szemben egy ellenállás ponthegesztést vizsgálva, 1 pár ponthegesztés elkészülése alatt több lézeres hegesztést lehet készíteni, pásztázó optika alkalmazásával [13-15]. A lézersugaras technológiával lehet elérni a legnagyobb termelékenységet és a legkisebb karbantartás igényt [16].

A folyamat cellára gyakorolt hatása:

Lézersugaras eljárás esetén a rövid impulzusok alkalmazásával eredményesen el lehet kerülni a nagy felmelegedést, hiszen a bejuttatott hő szinte azonnal el is vezetődik, így a felmelegedés

elhanyagolható. Kutatások kimutatták azt, hogy nagy energia használatával, illetve hosszú hegesztési folyamattal a cella kritikus hőmérsékletre hevül. A Li-ion akkumulátorok esetén ez az érték 70°C [5].

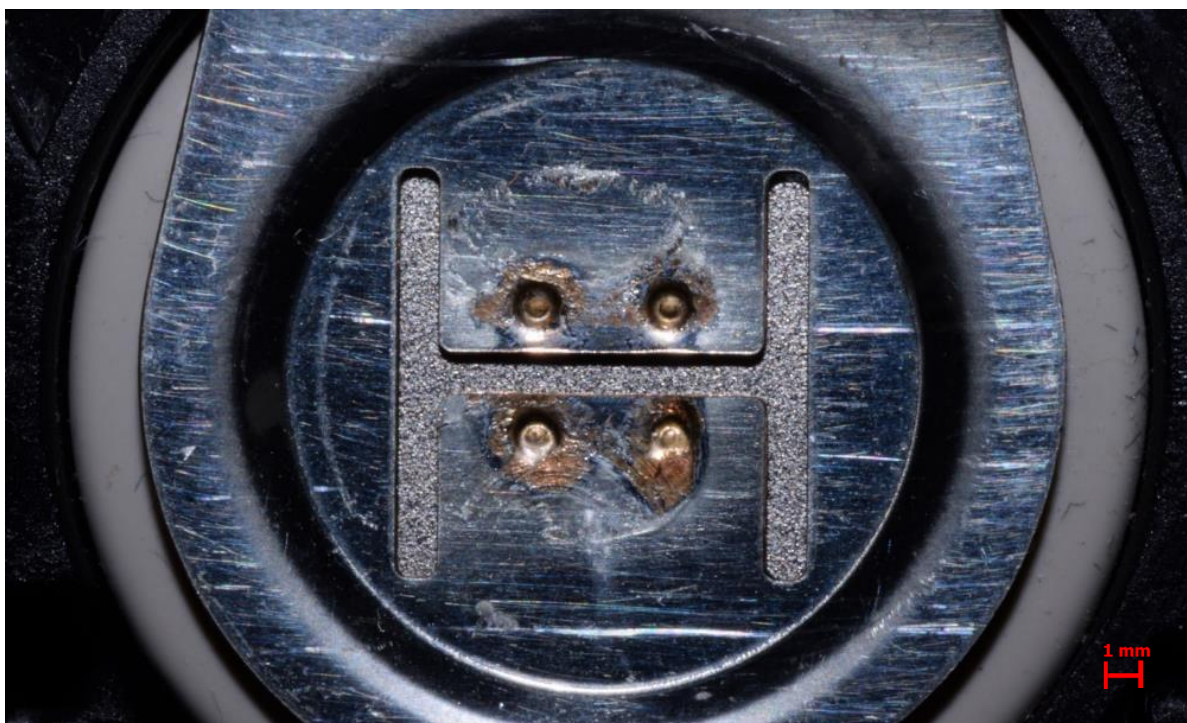
Ennek a technológiának a használatával kis kötések is létrehozhatók. Abban az esetben azonban, ha a létrejött kötés kisebb, mint a rajta átfolyó áram, növekedni fog az ellenállás. Ennek az ellenállásnak a növekedése folytán töltés, illetve mérítés során melegedés lesz tapasztalható, aminek köszönhetően az elem élettartama csökken [5].

3. Elvégzett kísérlet leírása

Elsősorban a jelenleg alkalmazott ellenállás dudorhegesztett kötések mikroszkópi vizsgálatával kaptunk összehasonlítási alapot, a már megfelelt kötések szemügyre véve.

3.1. Ellenállás dudorhegesztés

A 2. ábrán egy ellenálláshegesztett kötés homlokfelülete, és a bonyolultan kialakított csatlakozó geometriája látható. A csatlakozó anyaga ón bevonatos réz, amelyen H alakú kivágás és dudorok vannak kialakítva. A hegesztés mellett fröcskölés látható.

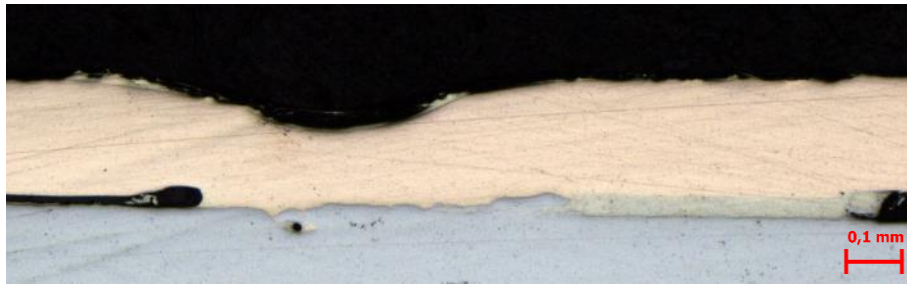


2. ábra: Ellenállás dudorhegesztett kötés homlokfelülete (negatív kupak)

Az 3. és 4. ábrán a cella pozitív oldalára hegesztett kötést láthatjuk. Jól látható, hogy a csatlakozó teteje benyomódott, majd a kötés ez a felület alatt kezdett kialakulni a réz csatlakozó és a cella tetején lévő nikkel bevonatos acél között.



3. ábra: Ellenállás dudorhegesztett kötés (pozitív kupak, bal oldal)



4. ábra: Ellenállás dudorhegesztett kötés (pozitív kupak, jobb oldal)

A 5. és 6. ábrán a negatív oldali cellakupakra hegesztett kötés látható.



5. ábra: Ellenállás dudorhegesztett kötés(negatív kupak, bal oldal)



6. ábra: Ellenállás dudorhegesztett kötés(negatív kupak, jobb oldal)

A negatív oldali hegesztéseken az látható, hogy a kötés keskenyebb mint a pozitív oldali cellák esetében. Ezt okozhatta a cellavégek kialakításának következtében kialakult hővezetési különbsége.

A 7. ábrán a cella negatív oldalán történő kötés látható a csatlakozó leszakítását követően. Mind a 4 érintkezési ponton kigombolódás látható.



7. ábra: Ellenállás dudorhegesztett kötés kigombolódott

Az ellenállás dudorhegesztés esetén olcsó a beszerzési költség, és jól ismert, kidolgozott a technológia. Hátrányként említhető, maga az elektróda állításának bonyolultsága, és cseréje,

illetve a szükséges bonyolult csatlakozó kialakítás. Hosszú távon az elektróda anyagköltségéből adódóan kevésbé költséghatékony.

A hegesztett kötések csiszolati képeit vetettük össze, hogy a legmegfelelőbb mintából tudjunk szakításhoz használható mintákat előállítani. A szakítást követő kigombolódást a gyakorlatban használják a kötés megfelelőségének vizsgálatára. A kötések jellemzésére szakítást a további kísérleteinkben alkalmazunk.

3.2. Lézersugaras hegesztés

A cellák felületén lézersugaras hegesztéseket hoztunk létre TruLaser 7020 lézerberendezés segítségével. A kötések létrehozásakor a gép paramétereit állítva kerestük a megfelelő tartományt, amikor a cella tetejére hegedt a csatlakozó. A hegesztési kísérletsorozatot a 1. táblázatban látható paraméterekkel hajtottuk végre, keresve a megfelelő hegesztett kötési állapotot.

1. táblázat: Lézersugaras hegesztési paraméterek

Minta száma	Li-ion cella hegesztett oldala	Hegesztési lézersugár átlagteljesítmény [W]	Lézer pulzálási frekvencia [Hz]	Argon gáz védelem [liter/perc]	Beütési csúcs-teljesítmény [W]	Beütési idő [sec]	Hegesztett kötés állapota
1	-	800	2000	9	2000	0,2	Nem jött létre kötés
2	-	1600	2000	9	4000	0,2	Nem jött létre kötés
3	-	4000	2000	9	4000	0,5	Átlyukadt
4	-	4000	5000	9	4000	0,2	Átlyukadt
5	-	2800	2000	6	4000	0,35	Létrejött kötés
6	-	2800	2000	6	4000	0,35	Létrejött kötés
7	-	2800	2000	6	4000	0,35	Létrejött kötés
8	-	2800	2000	6	4000	0,35	Létrejött kötés
9	-	2800	2000	6	4000	0,35	Létrejött kötés
10	+	2800	2000	6	4000	0,35	Nem jött létre kötés
11	+	2800	2000	6	4000	0,35	Nem jött létre kötés
12	+	2800	2000	6	4000	0,35	Létrejött kötés
13	+	2800	2000	6	4000	0,35	Létrejött kötés
14	+	2800	2000	6	4000	0,35	Létrejött kötés

15	-	2500	2000	6	4000	0,313	Létrejött kötés
16	-	3100	2000	6	4000	0,388	Létrejött kötés

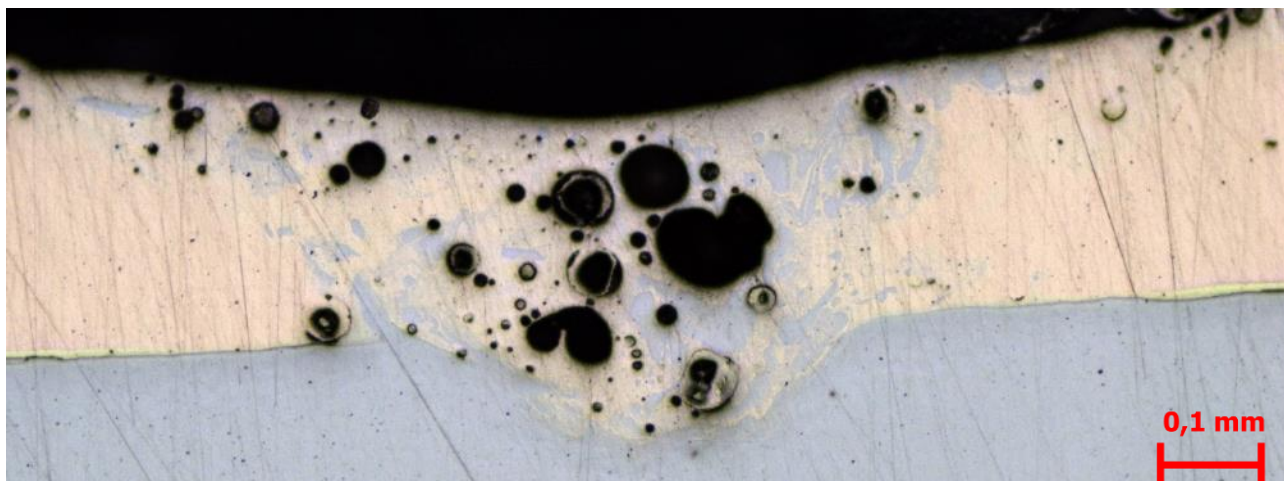
Az 1. táblázatból megfigyelhető, hogy a 10 és 11-es mintaszám esetén nem jött létre kötés. Ennek oka a negatív cellavégről pozitívrá váltásakor kialakult rossz leszorítás volt, ezáltal levegő került a hegesztendő lemezek közé. Ez javításra került hegesztési kísérlet során. A pozitív és negatív cellavégek közötti különbséget anyagvastagság különbség és cellavég kialakítás következtében tér el.

A 8. ábrán az akkumulátor cella negatív oldalán létrehozott kötés látható.



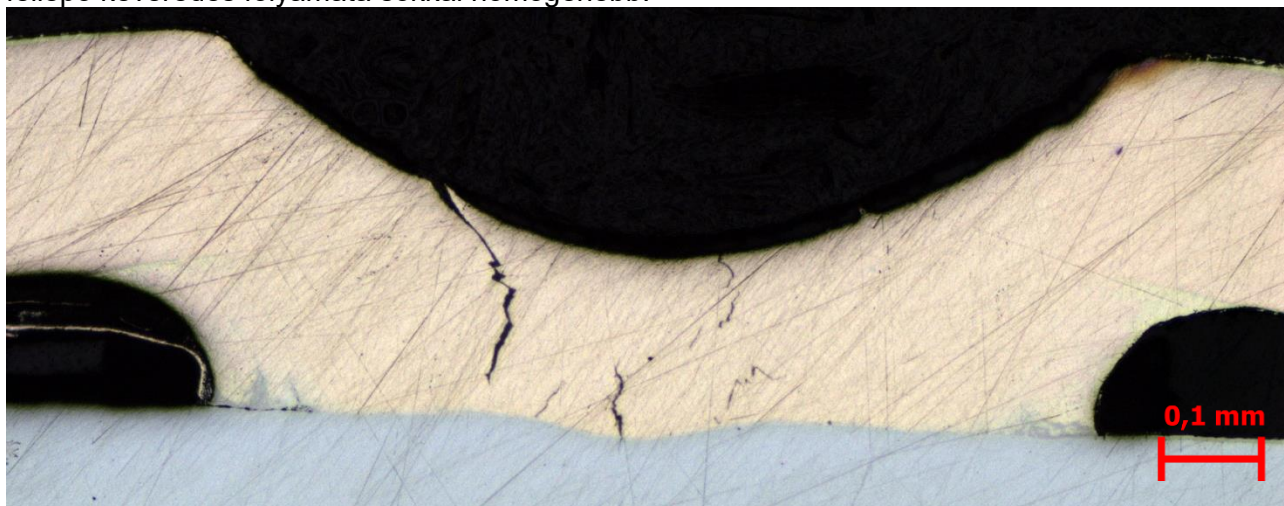
8. ábra: Lézersugaras hegesztés homlokl felülete (negatív oldal)

A 9. ábrán a cella negatív oldali kupakján létrehozott kötés látható. A kötésben megfigyelhető az anyag keveredése, míg zárványok is megjelentek a hegesztett kötésben.



9. ábra: Lézersugaras hegesztés (negatív oldal)

A pozitív oldalon megtörtént hegesztések alapján 10. ábrán láthatjuk, hogy a hegesztés során felületi ráolvasztás történt, nem volt keveredés megfigyelhető. A kötésekben azonban nagyobb repedés látható. Ezzel szemben a negatív oldali hegesztett kötések hőhatás övezete, és a kötésben fellépő keveredés folyamata sokkal homogénebb.



10. ábra: Lézersugaras hegesztés szakítást követően

A 11. ábrán láthatjuk a negatív kupakról leszakított csatlakozó képét. Bal oldalon a kigombolódott hegesztett kötés, illetve jobb oldalon a csatlakozó látszik a képen.



11. ábra: Lézersugaras hegesztés szakítást követően

A lézersugaras hegesztési technológia nagy előnye az ellenállás dudorhegesztéssel szemben, hogy nincs kopó elektróda, ezáltal hosszú távon költséghatékonyabbnak tekinthető. A hegesztés folyamata gyorsabban zajlik. Új kötési technológia, amellyel változatos kötési geometriákat alkalmazhatunk. Egyedül a beszerzési költség kiemelkedően magas, illetve szükséges a technológia kidolgozása is.

4. Összegzés

Elmondható a kísérletünkről, hogy sikerült lézersugárral hegesztett kötéseket létrehozunk a cellák kupakján a csatlakozókon. Amelyek az ellenállás ponthegeesztett kötésekhez képest jelenleg több zárvánnyal rendelkező, néhol repedt kötést értünk el. A technológia azonban még pontosításra szorul, ugyanis kis tartomány az, ahol létrejön megfelelő minőségű kötés. A kutatási folyamat folytatásaként további lézersugaras paraméterek tesztelését hajtjuk végre az optimális lézersugaras hegesztési paraméterek meghatározása érdekében.

Sikerült olyan paramétert találnunk mellyel létre tudtunk hozni lítiumion akkumulátoron lézersugaras hegesztett kötést ónbevonatos réz csatlakozók alkalmazásával. A kötések minden esetben kigombolódtak mely alapján szilárdságilag megfelelőnek nyilváníthatók. Azonban a metallográfiai felvételek alapján láthatók porozítások repedések.

Köszönetnyilvánítás

A dokumentum a 2019-1.1.1-PIACI-KFI-2019-00509 pályázati azonosítószámú és „Akkumulátor pakk konstrukció fejlesztés és univerzális szerelősor fejlesztés a VIDEOTON Elektro-PLAST Kft-nél” című projekt keretében készült.

Irodalomjegyzék

- [1] MSZ EN ISO 4063:2016
- [2] Gépipari tudományos egyesület: Hegesztés és rokon technológiák, ISBN 978-963-420-910-2, 2007
- [3] Dr. Baránszky-Jób Imre: Hegesztési kézikönyv, ISBN 963 10 6245 7, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985
- [4] Md. Ibrahim Khan: Welding Science and Technology, ISBN 978-81-224-2621-5, 2007
- [5] Harald Larsson, Alec Chamberlain, Sally Walin, Samir Schouri, Louise Nilsson, Elin Myrsell, Daniel Vasquez: Welding methods for electrical connections in battery systems Uppsala Universitet 2019
- [6] Philips D.H. Welding Engineering: An Introduction. New York: John Wiley & Sons; 2015. 5, High Energy Density Welding Processes; p. 114-22.
- [7] Amada Miyachi. Fiber Laser Welding. [Cited date 2019-05-15]
Webes cím: <https://www.amadamiyachi.eu/knowledge-base/fiber-laser-welding>
- [8] EBindustries. CW and Pulsed Laser Welding. [Cited date 2019-05-15]
Webes cím: <https://www.ebindustries.com/cw-and-pulsed-laser-welding/>
- [9] Shuhai Chen, Jihua Huang, Jun Xia, Xingke Zhao, Sanbao Lin: Influence of processing parameters on the characteristics of stainless steel/copper laser welding, Journal of Materials Processing Technology, Volume 222, August 2015, Pages 43-51, ISSN 0924-0136, DOI:10.1016/j.jmatprotec.2015.03.003.

- [10] Yueqiao Feng, Zhen Luo, Zuming Liu, Yang Li, Yucan Luo, Yongxian Huang: Keyhole gas tungsten arc welding of AISI 316L stainless steel, *Materials & Design*, Volume 85, 15 November 2015, Pages 24-31, ISSN 0264-1275, DOI:10.1016/j.matdes.2015.07.011.
- [11] Peter Stritt, Christian Hagenlocher, Christine Kizler, Rudolf Weber, Christoph Rüttimann, Thomas Graf: Laser Spot Welding of Copper-aluminum Joints Using a Pulsed Dual Wavelength Laser at 532 and 1064 nm, *Physics Procedia*, Volume 56, 2014, Pages 759-767, ISSN 1875-3892, DOI:10.1016/j.phpro.2014.08.083.
- [12] Shengyong Pang, Xin Chen, Jianxin Zhou, Xinyu Shao, Chunming Wang: 3D transient multiphase model for keyhole, vapor plume, and weld pool dynamics in laser welding including the ambient pressure effect, *Optics and Lasers in Engineering*, Volume 74, November 2015, Pages 47-58, ISSN 0143-8166, DOI:10.1016/j.optlaseng.2015.05.003.
- [13] Jaehun Kim, Sehyeok Oh, Hyungson Ki: A study of keyhole geometry in laser welding of zinc-coated and uncoated steels using a coaxial observation method, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 225, November 2015, Pages 451-462, ISSN 0924-0136, DOI:10.1016/j.jmatprotec.2015.06.029.
- [14] F. Tenner, C. Brock, F. Klämpfl, M. Schmidt: Analysis of the correlation between plasma plume and keyhole behavior in laser metal welding for the modeling of the keyhole geometry, *Optics and Lasers in Engineering*, Volume 64, January 2015, Pages 32-41, ISSN 0143-8166, DOI:10.1016/j.optlaseng.2014.07.009.
- [15] S. Li, G. Chen, M. Zhang, Y. Zhou, Y. Zhang: Dynamic keyhole profile during high-power deep-penetration laser welding, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 214, Issue 3, March 2014, Pages 565-570, ISSN 0924-0136, DOI:10.1016/j.jmatprotec.2013.10.019.
- [16] M. Vänskä, F. Abt, R. Weber, A. Salminen, T. Graf: Effects of Welding Parameters Onto Keyhole Geometry for Partial Penetration Laser Welding, *Physics Procedia*, Volume 41, 2013, Pages 199-208, ISSN 1875-3892, DOI:10.1016/j.phpro.2013.03.070.
- [17] Berczeli Miklós, Tajti Ferenc: Optimization of material removal parameters by femtosecond laser pulses, *IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING* 903 p. 012026 (2020) DOI:[10.1088/1757-899X/903/1/012026](https://doi.org/10.1088/1757-899X/903/1/012026)
- [18] Berczeli M, Buza G: Relationship between the keyhole laser welding and the plasma IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 448 Paper: 012051 (2018) DOI:[10.1088/1757-899X/448/1/012051](https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012051)
- [19] Berczeli Miklós, Buza Gábor: The Effect of Laser Beam Welding Parameters onto the Evolving Joints Geometry *MATERIALS SCIENCE FORUM* 885 pp. 178-183. , 6 p. (2017)
- [20] Hlinka József, Berczeli Miklós, Buza Gábor, Weltsch Zoltán Wetting properties of Nd: YAG laser treated copper by SAC solders *SOLDERING & SURFACE MOUNT TECHNOLOGY* 29 : 2 pp. 69-74. , 6 p. (2017) DOI:[10.1108/SSMT-01-2016-0003](https://doi.org/10.1108/SSMT-01-2016-0003)