

VÉKONY FÉMLEMEZEK LÉZERES HEGESZTÉSE ÁTLAPOLT KÖTÉSI GEOMETRIÁBAN

PhD-értekezés

HORVÁTH GÁBOR

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

Témavezető:

DR. GERETOVSZKY ZSOLT egyetemi docens
Szegedi Tudományegyetem, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Társtémavezető:

DR. SZÖRÉNYI TAMÁS önkéntes segítő
Szegedi Tudományegyetem, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Szeged

2023

TARTALOMJEGYZÉK

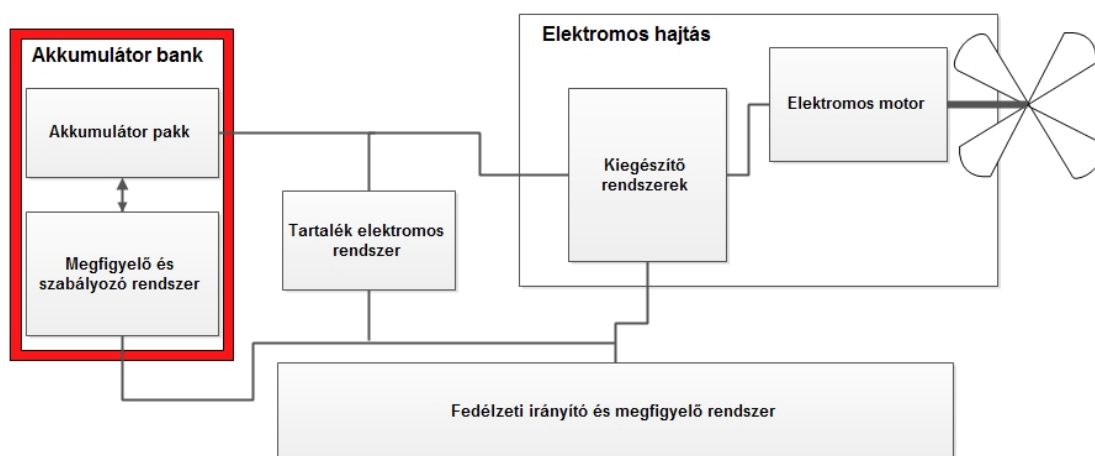
I. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK.....	4
1. BEVEZETÉS ÉS IRODALMI ÁTTEKINTÉS	4
1.1. Az akkumulátor cella	5
1.1.1. Az akkumulátor cellák kémiája.....	5
1.1.2. Az akkumulátor cellák geometriája.....	8
1.1.3. Az akkumulátor cellákban alkalmazott anyagok	9
1.2. Kötéstechnológiák.....	9
1.3. Hegesztés és forrasztás.....	11
1.3.1. Ultrahangos hegesztés	14
1.3.2. Kavaró dörzshegesztés	15
1.3.3. Elektronsugaras hegesztés.....	16
1.3.4. Ellenállás hegesztés.....	17
1.4. Lézeres kötéstechnológiák	17
1.4.1. A lézersugaras forrasztás.....	18
1.4.2. A lézersugaras hegesztés.....	19
1.5. A védőgázok szerepe a lézerhegesztésben	21
1.6. A lézeres kötéstechnológiák akkumulátor technológiai alkalmazása	24
1.6.1. Ponthegeztés és varrathegeztés	24
1.6.2. Az időbeli és térbeli moduláció hatása a varrathegeztésnél	25
1.7. A lézeres hegesztés kutatására irányuló igények és motiváció	26
2. CÉLKITŰZÉSEK	28
3. KÍSÉRLETI MÓDSZEREK	30
3.1. Lézeres hegesztőrendszer.....	30
3.1.1. Az 1D hegesztő rendszer.....	30
3.1.2. A 2D hegesztőállomás.....	32
3.2. Elektromos tulajdonságok mérése.....	34
3.3. A mechanikai tulajdonság mérése.....	35
3.4. A keménységmérés	36
3.5. Csiszolatok készítése.....	38
3.6. COMSOL modellezés	39
II. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	43
4. A LÉZERES HEGESZTÉSI VARRAT ÉS KÖRNYEZETÉNEK VIZSGÁLATA.....	43
4.1. A lézeres hegesztés szerkezeti vizsgálata.....	43
4.2. Vickers-féle mikrokeménységmérés	43
4.3. Csiszolatok	45
5. A VARRATMORFOLÓGIA ÉS ANNAK HATÁSA AZ ELEKTROMOS ÉS MECHANIKAI VISELKEDÉSRE.....	47
5.1. A lézerparaméterek hatása az elektromos és mechanikai viselkedésre.....	47

5.2. A morfológia térkép	54
5.3. Az elektromos és mechanikai tulajdonságok függése a morfológiától	56
5.4. Kísérletek Hilumin anyagon.....	60
5.5. Az eredmények tézisszerű megfogalmazása	62
6. A HEGESZTÉSI ZÓNA KONFIGURÁCIÓJA ÉS ANNAK AZ ELEKTROMOS ÉS MECHANIKAI VISELKEDÉSRE GYAKOROLT HATÁSA.....	63
6.1. A kötési keresztmetszet kialakításának optimalizálása	65
6.1.1. A varrat alakzat hatása	65
6.1.2. Többszörös kötések	67
6.2. A kötési terület növelésének hatása	70
6.2.1. A varrathosszúság hatása	71
6.2.2. A varratszámosság hatása	72
6.3. Az átfedő, de nem hegesztett lemezterületek méretének hatása.....	73
6.4. A geometriai optimalizálási lehetőségek összevetése	74
6.5. Az eredmények tézisszerű összefoglalása	75
7. ÖSSZEFOGLALÁS.....	77
7.1. Bevezetés.....	77
7.2. Célkitűzések	77
7.3. Alkalmazott módszerek.....	78
7.4. Új tudományos eredmények.....	79
7.5. Kitekintés	80
8. SUMMARY	82
8.1. Introduction	82
8.2. Objectives.....	82
8.3. Materials and methods	83
8.4. New scientific results	83
8.5. Outlook.....	84
9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	86
10. HIVATKOZÁSJEGYZÉK.....	87

I. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK

1. BEVEZETÉS ÉS IRODALMI ÁTTEKINTÉS

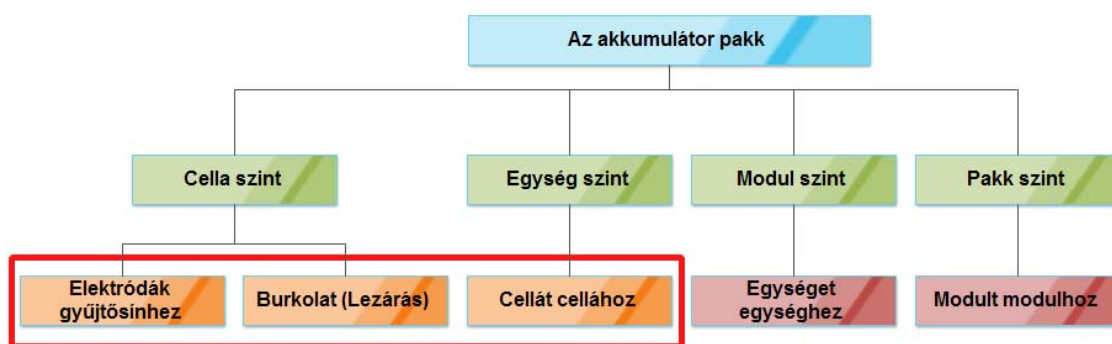
Napjainkban a környezetbarát megoldások egyre nagyobb figyelmet kapnak a technológia és a kutatás minden területén. A mérnökök és tudósok új típusú energiaforrásokat keresnek, a keresés két fő mozgatóereje: a fosszilis tüzelőanyagok fogyatkozó készletei és a természet kisebb mértékű terhelése. Ennek eredményeképpen a modern járművek a hagyományos belsőégésű motorok helyett alternatív hajtásrendszerekkel rendelkeznek, a leggyakoribb ilyen konstrukciók a hibrid vagy a teljesen elektromos meghajtású rendszerek. Napjainkban főként az autóiiparban (Tesla Motors, Nissan, BMW stb.) láthatjuk ezeket a trendeket, már akár a prémiumszektorban is megjelennek a teljesen elektromos autók. Ez a kezdődő trend elkerülhetetlenül bővül, és várhatóan a teljes vagy részben elektromos (hibrid) járművek átveszik a teljes piacot. Ez a változás a légi közlekedésben is jelen van, de a folyamat lényegesen lassabb, főként az energiatároló egységek (akkumulátorok) korlátozott teljesítménye és a biztonsági kérdések kritikussága miatt. Jelenleg a légi közlekedésben a hibrid hajtásrendszerek a legelterjedtebbek az alternatív megoldások közül, a teljesen elektromos változatok lemaradnak. A hibrid járművek általában egy hagyományos (belső égésű) meghajtórendszerrel rendelkeznek, amelyhez egy kis teljesítményű kiegészítő villanymotor kapcsolódik, amely ugyanúgy működik, mint a teljesen elektromos meghajtórendszer. Mindezek ellenére a fejlesztések végcélja a teljesen elektromos hajtásrendszerrel rendelkező gépek kifejlesztése és megvalósítása. Erre irányulóan jelenleg számos kutatás és fejlesztés zajlik melyeknek akár részét képezi teljesen elektromos repülőgép prototípusok építése is. Egy jelenleg létező és működő, teljesen elektromos hajtású kisrepülőgép (VUT 051 RAY) egyszerűsített, vázlatos elektromos hajtásrendszere az 1. ábrán látható [1]. A fenti okok miatt ennek a gépek a repülési ideje (jellemzően kevesebb, mint egy óra) és teherbírása (néhány száz kilogramm körüli) nagyon korlátozott, de két üléses modelleknek, pl. pilóta oktatási célokra tökéletesen megfelelnek [2].



1. ábra: Egy teljes elektromos hajtásrendszer vázlata [1]

Ami az elektromos motor energiaforrását illeti, a legjobb mérnöki gyakorlat azt diktálja, hogy a nagy kapacitású akkumulátor pakkot több, párhuzamosan és sorba kapcsolt, kis

kapacitású cellából hozzák létre, ahelyett, hogy egyetlen nagy kapacitású egységet használnának. Ezzel a módszerrel költséghatékony (a kis cellák nagy sorozatú gyártása alacsonyabb költségeket biztosít), nagymértékben testre szabható (a konstrukciótól függő egyedi feszültség- és áramerősség-értékek) és moduláris rendszert kapunk, ami kivételesen fontos, tekintettel arra, hogy az egyes cellák élettartama nagyon eltérő lehet. Ezeket a nagy kapacitású akkumulátor pakkokat a 2. ábrán [3] bemutatott többszintű gyártási séma segítségével állítják elő.



2. ábra: Az akkumulátor pakk készítés hierarchiája [3]

A gyártási folyamat különböző szintjein különböző kötési technikákat alkalmaznak, amelyek sajnos nem lehetnek általánosak, mivel az akkumulátorcsomagok specifikációi általában egyediek és mindig az adott műszaki problémára vannak fejlesztve. Általánosságban elmondható, hogy az összeszerelési folyamat pakk- és modulszintjein a modularitás megőrzése érdekében mechanikus kötést (csavarozás, szegecseles stb.) alkalmaznak, míg az egység- és cellaszinteken valamilyen állandó és sokkal kifinomultabb kötési módszert (pl. hegesztés vagy forrasztás) használnak az össztömeg és az elektromos ellenállás csökkentése, valamint a kötés jobb mechanikai tulajdonságának elérése érdekében [3]. Az autó és repülőgépiparban használt akkumulátorcsomagok gyártása során az esetek túlnyomó többségében az említett alacsony szinteken lézeres vagy ultrahangos hegesztéseket alkalmaznak.

1.1. Az akkumulátor cella

Az akkumulátor pakkok legfundamentálisabb alapegysége az akkumulátor cella. Ezen cellák típusának és paramétereinek minél hatékonyabb megválasztása kulcsfontosságú szereppel bír. Az akkumulátor cellák számos tulajdonsága közül a gépjármű és repülőgépgyártás igényeinek szempontjából a legfontosabb azok úgynevezett fajlagos energiája, azaz, hogy mennyi energiát képesek tárolni egységnyi tömegre (bizonyos esetekben egységnyi térfogatra) vonatkoztatva. Ennek a paraméternek a kiemelt jelentősége abból fakad, hogy ez a saját súly/hasznos tömeg arányon keresztül közvetlenül határozza meg az elektromos jármű hatásfokát valamint a maximálisan megtehető távolság mértékét. [1,2]

1.1.1. Az akkumulátor cellák kémiája

Az akkumulátor cellák fajlagos energiája elsősorban attól függ, milyen kémiai folyamatok révén tárolják, illetve adják le az elektromos energiát. Ezt a

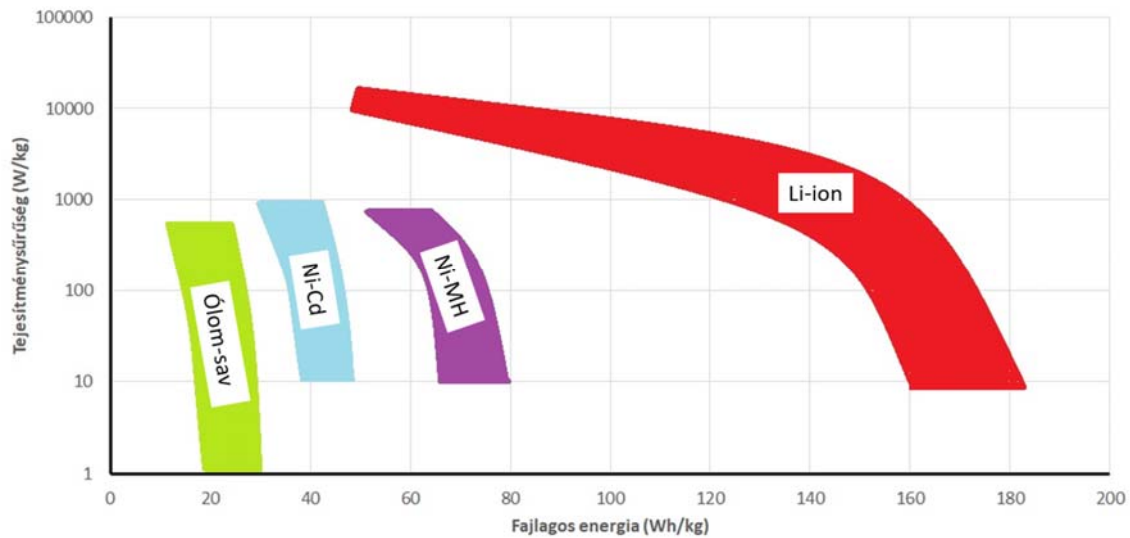
akkumulátortechnológiai szakirodalomban cella kémiának, vagy akkumulátor kémiának szokás hívni. Az 1. táblázatban összefoglaltam néhány gyakran alkalmazott akkumulátor típust, azok kémiájának és fajlagos energiájának feltüntetésével.

Akkumulátor kémia	Fajlagos energia (Wh/kg)	Kapocsfeszültség (V)	Gazdaságosság (\$/kWh)
Ólom-sav	10-30	2	100-200
Nikkel-Kadmium	30-50	1,2	300-600
Nikkel-Metál-Hidrid	50-80	1,2	300-600
Nikkel-Cink	100	1,65	300-600
Ezüst-Cink	250	1,3-1,6	500-1000
Lítium-Kobalt-Oxid	150-200	3,6	100
Lítium-Mangán-Oxid	100-150	3,7	200-400
Lítium-Vas-Foszfát	90-120	3,2-3,3	100-350
Lítium-Levegő (prototípus)	13000	1,7-3,2	NA

1. Táblázat: A különböző típusú akkumulátorok jellemzői [4-7]

A hagyományos személygépjárművek önindító motorjának is energia forrásául szolgáló klasszikus ólom-sav akkumulátor technológia szemmel láthatóan a legkisebb fajlagos energia értéket nyújtja. Az iparban ennek ellenére (elsősorban alacsony költsége miatt) még napjainkban is jelentős szerepet tölt be. A nikkel-kadmium típusú cellák szintén mérsékelt fajlagos energiát képviselnek. Ugyanakkor nagy előnyük a többi típussal szemben, hogy a kémiai reakció sajátossága miatt rendkívül sokszor újratölthetőek, s ezáltal kimagaslóan hosszú élettartammal rendelkeznek. Ezen típus egyfajta speciális változata az úgynevezett nikkel-metál-hidrid cella, amelyben a negatív elektróda kadmium helyett hidrogén megkötő fémötvözet. Ez a speciális akkumulátor típus amellet, hogy megőrzi az alapvetően hosszú cella élettartamot, akár 50%-al magasabb fajlagos energiát kínál a hagyományos nikkel-kadmium típussal szemben. Az összes típus közül azonban egyértelműen kiemelkedik az úgynevezett lítiumion technológia, amely rendkívül széles körben kutatott és ebből kifolyólag számos vállfaja létezik. A leggyakrabban alkalmazott típus a lítium-kobalt-oxid alváltozat, amely a többi akkumulátor kémiához képest viszonylag magas fajlagos energia értékeket képes biztosítani. Másik számottevő előnye, hogy a technika globális elterjedésével és a gyártósorok fejlesztésével a lítium ion cellák gyártásának költség hatékonysága manapság eléri vagy akár meghaladja a klasszikus ólom-savas akkumulátorokét.

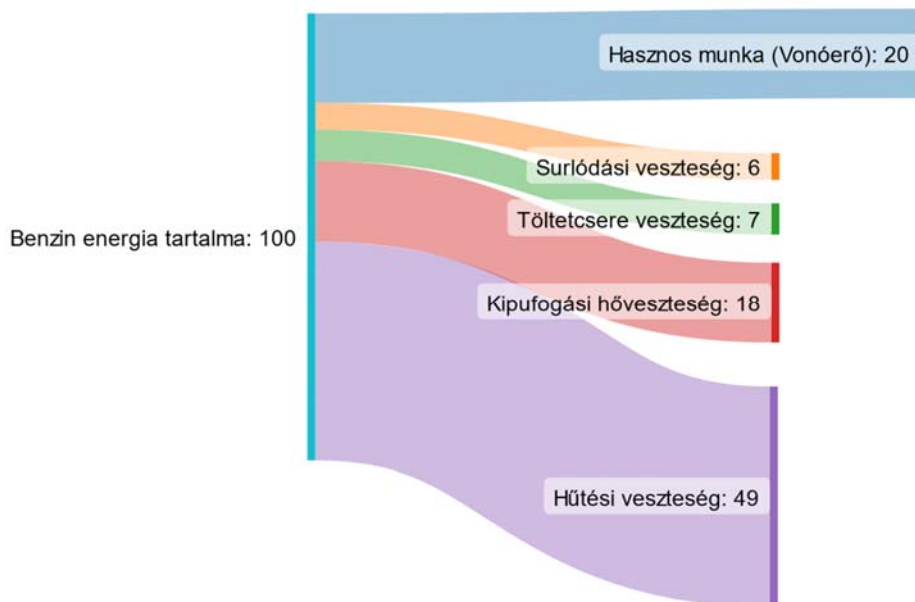
Az egyes akkumulátor típusok tulajdonságainak vizualizációja érdekében az 3. ábrán ábrázoltam a különböző kémiák fajlagos energiáját és az egységnyi tömegre vonatkoztatott átlagos teljesítményként definiált teljesítménysűrűségét.



3. ábra: Akkumulátor típusok összehasonlítása [8]

Ezen grafikon alapján is egyértelműen látható, hogy a lítiumion család kimagasló tulajdonságokkal rendelkezik. A Li-ion cellák kapcsolófeszültsége 3,6 V, az élettartamuk a nikkell-kadmium cellákhoz hasonlóan viszonylag magas, akár ezerszer újrtölthetőek. Az ilyen típusú cellák közel 100%-os hatékonysággal tudják az energiát tárolni [9]. További előnyük, hogy a kisülési és töltési folyamatok során nem képződnek fém kristályok, ezért a celláknak nincsen úgynevezett memóriaeffektusa. Ebből fakadóan a cellák nem szorulnak tréningezésre, azaz teljes lemerítése és teljes feltöltésre, sőt kifejezetten kerülendő azok teljes kisütése. A járműipar szigorú biztonsági feltételei miatt szintén fontos tulajdonság az is, hogy a lítiumion cellák viszonylag kis mennyiségben vagy egyáltalán nem tartalmaznak mérgező összetevőket [9-10].

Fontos leszögezni, hogy az akkumulátor technika jelenleg nem képes felvenni a versenyt a fajlagos energia tekintetében a klasszikus belső égésű motorokkal és a jövőben jelentős fejlesztésekre, új kémiai kidolgozására van szükség. Példaképpen a benzin fajlagos energiája 11,9 kWh/kg, amely közel a 100x-osa az 1. Táblázatban bemutatott akkumulátorok fajlagos energiájának. Ezen az alapvető különbségen az sem sokat változtat, ha figyelembe vesszük, hogy egy klasszikus Otto-motorban a benzin fűtőértékének csak hozzávetőlegesen az 1/5-e hasznosul vonóerőként (4. ábra).



4. ábra: Egy klasszikus Otto-motor energia hasznosításának Sankey ábrája [11]

A klasszikus belsőégésű és a modern elektromos hajtásrendszerek energiaforrásainak fajlagos energiája között így is legalább egy nagyságrend a különbség az előbbieik javára.

Jelenleg fejlesztés alatt állnak egyéb alternatív üzemanyag cellák, amelyek fajlagos energiája akár egy nagyságrenddel meghaladja majd az itt említett akkumulátorokét és a jövőben ténylegesen felvehetik a versenyt a fosszilis energiahordozókkal. Ugyanakkor ezek jelenleg csak prototípus szinten állnak rendelkezésre, gyártásuk rendkívül költséges, így a tömegtermelésben nem alkalmazható. Példaképpen az úgynevezett lítium-levegő technológia, amelynek fajlagos energiája elméletileg akár 13 kWh/kg is lehet, vagyis gyakorlatilag megegyezik a benzin, mint üzemanyag fajlagos energiájával, komoly lehetőségeket kínál [12]. Laboratóriumi kísérletekben ez a fajta akkumulátor ugyanakkor jelenleg csak 1 kWh/kg fajlagos energiát produkált, és élettartama mindössze 50 töltési ciklus volt, feltehetően az instabil kémiai reakciók miatt [2, 12].

1.1.2. Az akkumulátor cellák geometriája

Az akkumulátor cellák típusát nem kizárólag csak az akkumulátor kémiai elv alapján lehetséges csoportosítani, hanem a cella geometriai kialakítása is gyakori szempont. A cella geometria szempontjából általában tasakos, hengeres, szögletes és gomb alakú akkumulátorokat különböztetünk meg.

A gomb alakú cellák jellemzően kis kapacitásúak, nem, vagy csak nagyon lassan újra tölthetők, ezért járműipari alkalmazásuk nem célszerű [13]. A nagy kapacitású, újratölthető akkumulátor bankok létrehozásához szinte kizárólag tasakos, szögletes vagy leggyakrabban hengeres típusú lítium ion akkumulátorokat alkalmaznak.

A hengeres cellatípus népszerűségéhez hozzájárul a többi típushoz képest viszonylag egyszerű gyártási eljárás és a kialakításból fakadó jó mechanikai stabilitás. A hengeres cellák képesek a fokozott biztonsági előírásoknak is megfelelni, ugyanis többségük rendelkezik

felmelegedés, túlnyomás vagy akár robbanás elleni szelepekkel is. Ugyanakkor hátrányuk, hogy a szorosan egymás mellé rendezett cellák térkihasználása nem optimális [13,14].

1.1.3. Az akkumulátor cellákban alkalmazott anyagok

A legszélesebb körben alkalmazott lítiumion hengeres cellák kivezetései és praktikusan a burkolat egy (a korrózióállóságot elősegítő) vékony (1–5 μ m vastagságú) nikkell réteggel bevont 0,1–1,2 mm vastag hidegen hengerelt acéllemezből vannak kialakítva. A hidegen hengerelt acél mag egy vasalapú ötvözet, amely specifikációja szerint legfeljebb 0,12% szén, 0,6% mangánt, 0,045% foszfort és 0,045% ként, tartalmaz [15]. Szögletes és tasakos cellák esetén az anód anyaga réz, ritkábban nikkell, a katód pedig jellemzően alumíniumból készül. A cellák összekapcsolásához használt, az angol szakirodalomban busbar-ként ismert gyűjtősín többnyire általában (esetleg annak ötvözeteiből) vagy esetenként alumíniumból készül. Ennek fő oka, hogy a réz és ötvözetei rendkívül jó elektromos vezetőképességgel rendelkeznek, míg az alumínium, sűrűsége révén (70%-al kisebb sűrűségű, mint a réz), az olyan rendszerekben kívánatos elektródanyag, ahol a rendszer össztömege kiemelkedően fontos szempont (mint pl. a repülőgépgyártás). Rendkívül ritka esetekben szokás alkalmazni olyan nemes fémeket is amelyek még kiválóbb elektromos és mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, úgy mint például az ezüst, viszont ezek tömegtermelés szempontjából történő alkalmazása azok rendkívül magas költsége miatt nem célravezető [16-19].

Általánosságban elmondható, hogy ezen cella és gyűjtősín anyagok autogén módon történő (azonos anyagból lévő mintadarabokat hegesztünk egymáshoz) kötése nem jelent sem kémiai sem metallurgiai értelemben problémát. Ugyanakkor a vegyes (heterogén) kötések kialakítása például réz és alumínium anyagok között már sokkal bonyolultabb feladat, akár a jelentősen eltérő olvadási hőmérsékletek vagy akár az kötés során, nagy hőmérsékleteken lejátszódó kémiai folyamatok során létrejövő törékeny intermetallikus vegyületek keletkezése miatt [18,19].

1.2. Kötéstechnológiák

Kötésnek azt a technológiai műveletet nevezzük, amelynél két mintadarab felszínei között egy olyan állandóan jelen lévő hatást hozunk létre (egy kapcsolat létrehozásával vagy egy már meglévő kapcsolat módosításával), amely a felületek egymástól történő elválását megakadályozza [20]. A kötés lehet:

- Oldható: A kötés a folyamat után szétválasztható és a kötő eszköz újra felhasználható
- Nem oldható (permanens): A kötés roncsolás nélkül nem szétválasztható

A kötések ezen felül szokásos még az oldás elleni biztosítás módja szerint is csoportosítani. Ilyen tekintetben megkülönböztetünk:

- Alakkal záró kötés: A kötés alakja, vagy bizonyos részeinek helyzete végzi a biztosítást
- Erővel záró kötést: Külső erő segítségével (általában súrlódási erővel) záró kötés

- Anyaggal záró kötést: A molekulák és atomok között fellépő erők tartják össze a kötést

Az anyaggal záró kötés a kapcsolat minősége szerint lehet továbbá:

- Adhéziós: pl.: ragasztás, forrasztás
- Kohéziós: pl.: hegesztés, ráolvasztás

Az iparban gyakran alkalmazott kötéstechológiák a következők:

Ráolvasztás (nem oldható, anyaggal záró, kohéziós kötés):

Alkalmazási területe az üvegek vagy üvegszerű tulajdonságokkal rendelkező anyagok fémmel vagy ritkábban kerámiával történő kötése. A folyamat során a felhevített és ennek hatására meglágyuló üveg egy szintén felhevített fém/kerámia darabhoz külső erő hatására hozzáköt. A folyamat során fontos elvárás, hogy a használt fém/kerámia hőtágulási együtthatója kisebb legyen, mint az üvegé [21].

Ragasztás (nem oldható, anyaggal záró, kohéziós kötés):

Ragasztáskor a nélkül alakítunk ki erős kapcsolatot két szilárd test között, hogy a kötött anyagok eredeti tulajdonságai vagy szerkezeti felépítése lényegesen megváltozna. A ragasztót gyakran még folyékony állapotban viszik fel a felületekre (például szuszpenzió vagy kolloid oldat formájában), ami a kötés lejátszódása során megszilárdul. Lényeges, hogy a ragasztó még folyékony állapotban nedvesítse az összekötendő felületeket. A ragasztást főleg nyíró terhelések esetén célszerű alkalmazni, a ragasztott kötés a síkjára merőleges erővel szemben gyenge [22].

Csavarozás (oldható, erővel záró kötés):

A csavarkötés olyan erőzáró kötés, amely szinte bármilyen kötési geometriában, egyszerűen és olcsón hoz létre oldható kapcsolatot két mintadarab között. A csavarkötés tulajdonképpen egy húzó/nyomó rugó rendszernek felel meg. Ebben az értelemben a csavar a húzórugó, míg az összekötendő anyag a nyomórugó. Megszorításnál a csavar a terhelő erő hatására megnyúlik és ennek az erőnek az ellenerejével szorítja össze a két összezsavarozandó mintadarabot [23].

Szegecselés (nem oldható, alakkal záró kötés):

Szegecselés során egy szegecs segítségével alakítunk ki kötést két mintadarab között. Szegecselést alkalmaznak permanens kötésként olyan esetekben, amikor leggyakrabban hőterhelésből adódó fém szövetszerkezeti változások káros hatással vannak a végtermék tulajdonságaira nézve. A szegecs anyaga legtöbbször azonos az összekötendő anyaggal, amelynek elektrokémiai és hőtágulásból fakadó okai vannak. Ennek megfelelően a szegecs anyaga jellemzően acél, sárgaréz, vörösréz vagy alumínium [24].

Az itt említett technológiák általánosságban véve megfelelően jó mechanikai szilárdsággal képesek kötéseket kialakítani a mintadarabok között. Ugyanakkor az akkumulátor technológiai alkalmazások esetében elengedhetetlen, hogy a kötés a megfelelő mechanikai tulajdonságok mellett rendelkezzen megfelelően jó elektromos vezetőképességgel is. Ebből kifolyólag ezekhez az alkalmazásokhoz kivétel nélkül olyan kötéstechnológiai eljárásokat választanak, amelyek olyan kötést hoznak létre, amely egyszerre rendelkezik kiváló elektromos és mechanikai tulajdonságokkal. A kötéstechnológiák közül elektromos alkalmazások és különösképpen az akkumulátor technológiai alkalmazások szempontjából kimagaslik az úgynevezett hegesztés és forrasztás technológia, amelyeket ezért a következőkben az egyéb kötéstípusoknál részletesebben tárgyalok [25].

1.3. Hegesztés és forrasztás

A hegesztés során a munkadarabokat hővel, nyomással, esetlegmindkettővel egyesítjük oly módon, hogy a munkadarabok között nem oldható, az anyagok természetének megfelelő kohéziós kapcsolat jön létre. A hegesztés ebből kifolyólag alapvetően különbözik más kötési eljárásoktól, például a keményforrasztástól vagy a lágyforrasztástól, ahol az alapanyag nem, vagy csak nagyon csekély mértékben olvad meg. A kötés mechanikai, elektromos és kémiai (pl. korrózióállóság) tulajdonságainak javítása érdekében az olvadékmédencébe segédanyagokat lehet adagolni. Az ilyen eljárást a szakirodalom forraszhegesztésnek nevezi. Ez utóbbi módszerrel akár az alapfémnél mechanikailag erősebb kötés is kialakítható. A hegesztési folyamathoz általában védőgázra van szükség valamilyen inert gáz (vagy gázkeverék) formájában, amely megvédi az olvadékmédencét a szennyeződéstől és a kémiai átalakulásoktól (leginkább az oxidációtól vagy nitridizációtól). Erre a célra jellemző a nemesgázok (pl. hélium, vagy argon) használata, ugyanakkor a nitridizáció szempontjából nem túl kritikus esetekben szokás akár nitrogén vagy széndioxid gázokat is alkalmazni. [26,27].

A forrasztás olyan anyagösszekötő módszer, amelyek során két vagy több fémdarabot kötnek össze egy forraszfém megolvasztása és visszaszilárdítása révén. Két alaptípusa a keményforrasztás és a lágyforrasztás. A lágyforrasztás és a keményforrasztás közötti fő különbség az a hőmérséklet, amely a kötés kialakításához szükséges. A lágyforrasztásnál a forraszanyag liquidus hőmérséklete 450 °C alatt, míg a keményforrasztásnál 450 °C fölött van. Az olvadt forraszanyag a kapilláris hatás következtében erős kapcsolatot létesít az illesztendő alkatrészekkel, azaz nedvesíti az illesztendő területeket. A lágyforrasztás és a keményforrasztás során általában valamilyen folyasztószert is használnak, hogy segítsék a nedvesítést a folyamat hőmérsékletén, valamint hogy megvédjék az olvadt forraszanyagot a szennyeződéstől és oxidációtól [26,27]. A forrasztás abban különbözik a hegesztéstől, hogy a forrasztás során nem történik meg az összekötendő darabok megolvadása, ezért a forrasztott kötést nem metallurgikus, hanem mechanikus kötéstípusnak mondják.

A hegesztési és forrasztási eljárások főbb jellemzőit a 2. táblázat foglalja és hasonlítja össze.

Paraméter	Kötés mechanizmusa		
	Lágyforrasztás	Keményforrasztás	Hegesztés
Tipikus hőforrások	Forrasztó vas, Ultrahang, Ellenállás, Kemence, Lézer	Kemence, Kémiai reakció, Indukció, Fáklya, Lézer	Plazma, Elektron nyaláb, Ultrahang, Ellenállás, Lézer
Létrejövő kötés típusa	Mechanikai	Mechanikai	Metallurgiai
Maximális hőmérséklet (°C)	<450	>450	>450
Alakváltozás	Nem jellemző	Nem jellemző	Alakváltozás és deformáció előfordulhat
Belső feszültség	Nem jellemző	Nem jellemző	A hegesztési területnél valószínű
Összekötendő fémek	Nem olvadnak meg	Nem olvadnak meg	Az olvadás altípustól függ
Nedvesítést elősegítő anyag	Opcionális	Szükséges	-
Olvadékot védő gázkörnyezet	Nem szükséges	Szükséges	Szükséges

2. Táblázat: A hegesztés, lágy- és keményforrasztás összevetése [27]

A hegesztési technikákhoz általában a lemez-szerű anyagok a legalkalmasabbak, de a hegesztés más geometriák (például csövek [28]) esetén is alkalmazható. A 3. táblázatban néhány, a mérnöki gyakorlatban gyakran használt lemezanyag-összekötési geometria szerepel. Az akkumulátortechnológiái érdeklődésére számot tartó geometriák pirossal vannak szedve.

Kötés típusa	Átlapolt kötés	Perem kötés	T-kötés	Tompa kötés	Sarok kötés
Alkalmazási terület	Szinte valamennyi anyagra a leggyakrabban alkalmazott geometria.	Általában olyan vékony lemezek kötésekor alkalmazzák, ahol a hegesztési varrat szélessége a két lemez együttes vastagságának nagyságrendjébe esik.	Viszonylag korlátozott szögben lehetséges a megmunkálás, viszont teljes lemezszélességet átölölő kötés is létrehozható kellően nagy hegesztési teljesítmények esetén.	Nagyon gyakran alkalmazott geometria magas vas tartalmú vagy egyéb nagy viszkozitású ötvözetek hegesztésekor.	A T-kötéshez hasonló, vékony anyagok hegesztésekor nehezen kivitelezhető.
illusztráció					

3. Táblázat: Jellemző kötés geometriák fémek esetére [26]

Mivel a legelterjedtebb lítiumion-akkumulátor cella geometriák a hengeres és a tasakos konfigurációk [29], az akkumulátorok kötési technológiáinál használt leggyakoribb kötéskialakítások az átlapolt- (vagy angol terminológiában „lap”) és a peremgeometriák. A lap geometria mind a hengeres, mind a tasakos típusú cellákhoz használható, és számos előnnyel rendelkezik a többi kötési típussal szemben. Ezek közül a legjelentősebbek talán a nagy hibátűrűsű illesztéspontosság igény, eltérő vastagságú anyagokkal szembeni rugalmasság, nagy szabadsági fok a megmunkálás irányára vonatkozóan. Ez a geometriai elrendezés rendkívül jól tolerálja az összekötendő elemek vastagságkülönbségéből fakadó problémákat, általában a vékony-felül és a vastag-alul hegesztések könnyen megvalósíthatók (a vastag-felül és a vékony-alul hegesztések kevésbé praktikusak), és a többszörös hegesztési varratok (több menet) ebben

a konfigurációban jelentősen javíthatják a hegesztés szilárdságát. A peremkötés a hengeres cellák összekötésére kevésbé alkalmazható emiatt annak elterjedtsége jóval szűkebb körű, de még mindig a legnépszerűbb geometriák közé tartozik, széleskörűen alkalmazzák pl. az akkumulátorok modul-modul kötéseinél. A peremkötés legnagyobb előnye, hogy az élek megfelelő kialakításával a csatlakozási szögek széles skálája megvalósítható. A peremcsatlakozás mechanikai szilárdsága elsősorban a lapok közötti hegesztési varrat mélységétől függ (a hő/energia elnyelés és átadás hatásai ebben az esetben kritikusak) [18, 26].

A hegesztés többféle hőforrással is megvalósítható, és általában minden hőforrás más-más hegesztési technikát jelent. A 4. táblázat tartalmazza a leggyakoribb és legelterjedtebb hegesztési módszerek közül, és bemutatja azok jellemző tulajdonságait.

Tulajdonságok	Lézer nyaláb	Elektron nyaláb	Ultrahang	Ellenállás	Ív	Súrlódás	Szíkra kislülés
Kapcsolódó ISO szabvány	EN ISO 25901-2	EN ISO 4063: 51	EN ISO 4063: 41	EN ISO 4063: 22	EN ISO 4063: 113	EN ISO 18785-1	EN ISO 4063: 78
Hegesztés minősége	kiváló	kiváló	kiváló	megfelelő	jó	jó	kiváló
Hegesztés sebessége	magas	magas	magas	mérsékelt	mérsékelt	mérsékelt	nagyon magas
A közölt hő mennyisége	alacsony	alacsony	alacsony	mérsékelt	nagyon magas	mérsékelt	alacsony
Az illesztés pontossága	magas	magas	magas	alacsony	alacsony	mérsékelt	magas
Behatolási mélység	magas	magas	alacsony	alacsony	mérsékelt	magas	alacsony
Hegeszthető anyagok száma	széles	széles	szűk	szűk	szűk	széles	széles
Hegesztési geometriák és méretek száma	széles	mérsékelt	csak átlapolt kötés	széles	széles	szűk	szűk
Írányíthatóság	nagyon jó	jó	jó	megfelelő	megfelelő	mérsékelt	mérsékelt
Automatizálás egyszerűsége	kiváló	mérsékelt	jó	kiváló	megfelelő	jó	jó
Kezdeti költségek	magas	magas	magas	alacsony	alacsony	mérsékelt	magas
Üzemeltetési és fenntartási költségek	mérsékelt	magas	magas	mérsékelt	alacsony	alacsony	mérsékelt
Eszköz költségek	magas	nagyon magas	magas	mérsékelt	mérsékelt	alacsony	nagyon magas

4. Táblázat: A fontosabb hegesztési technikák és összehasonlításuk [26]

A táblázatban látható módon a bemutatott szempontok alapján hegesztési minőség tekintetében egyértelműen ígértetésnek tűnnek az elektron nyalábos, ultrahangos, szikrakislüléses, súrlódásos és lézeres hegesztéstechnikák. Ezek közül továbbá egyértelműen kimagaslik az elektron nyalábos illetve lézeres technika azok kivételesen jó behatolási mélysége, alacsony hőterhelése és igen nagy szabadsági fokú hegesztési geometriai lehetőségei miatt. A kettő közül ugyanakkor az elektron nyalábos technika jellemzően magasabb beruházási és üzemeltetési költségekkel rendelkezik.

A megfelelő hegesztéstechnika megválasztásához mindig ismernünk kell, hogy az adott alkalmazásban milyen kihívásoknak kell megfeleljünk. Járműipari és akkumulátor technológiai alkalmazások esetén például tisztában kell lennünk azzal, hogy egy személygépjárműhöz több ezer, egy nagyobb repülőgéphez akár több tízezer alkatrészt szükséges egymáshoz rögzíteni.

Ezen összekötési folyamatok során napjainkban egyre kritikusabbak a gazdasági és biztonsági szempontok is. Az egyre nagyobb számú alkatrész és az egyre nagyobb fokú biztonságra való törekvés, végső soron azt eredményezi, hogy a járműiparban a hegesztéstechnológiáknak egy új szintre kell lépniük. Ebből kifolyólag a korábban kevésbé alkalmazott kötés és hegesztés típusok egyre nagyobb teret hódítanak illetve a korábbi, kevésbé gazdaságos folyamatok helyett újabb, kisebb járulékos tömeget eredményező, gazdaságos, rendkívül magas fokon automatizálható technológiákat alkalmaznak. [25]

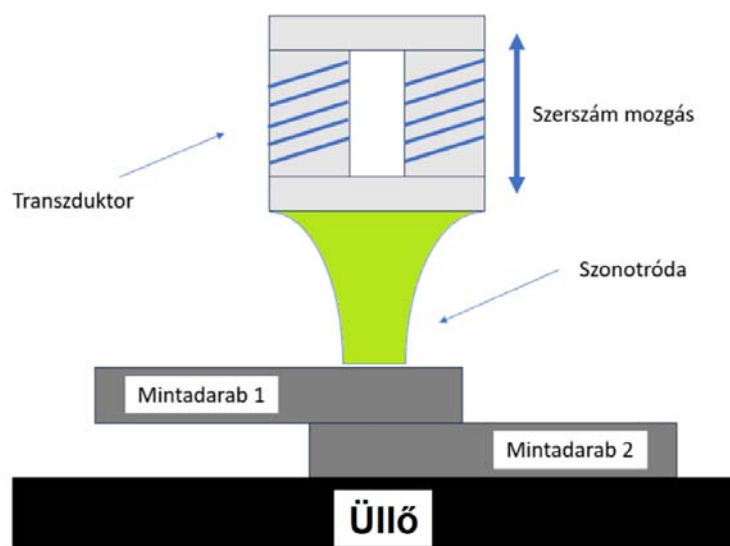
A fenti okok miatt széleskörben szakmailag elfogadott, hogy a lézerhegesztés jól alkalmazható a járműipari és az akkumulátorok csatlakoztatási problémáira egyaránt, de alkalmazását gondos rendszertervezés és pontos számítások kell megelőzzék [26].

Mielőtt ismertetem a lézeres kötéstechnológiákat, a következő alfejezetekben összefoglalom a leggyakrabban alkalmazott alternatív hegesztési megoldásokat, amelyeket szintén széleskörűen alkalmaznak akkumulátor cellák kötéséhez.

1.3.1. Ultrahangos hegesztés

Ez a technika műanyagok és fémek esetében egyaránt alkalmazható. Fémek hegesztése esetén jellemzően vékony, képlékeny fémek, pl. alumínium, réz, nikkel kisméretű hegesztéseire korlátozódik. Általában véve ezt a technikát kisméretű alkatrészeknél alkalmazzák (pl. mobiltelefonok, szórakoztató elektronika, eldobható orvosi eszközök, játékok stb.), de olyan nagyobb méretű munkadaraboknál is alkalmazható, mint egy kis autóiipari műszer. Az ultrahangos hegesztést - a szükséges teljesítményszintek miatt - nem használják pl. egy autó vagy akár egy kerékpár vázának összehegesztésére [30, 31].

Az ultrahangos hegesztő berendezéseket mindig az összekötendő mintadarabok anyagának és geometriájának megfelelően alakítják ki. Az alkatrészeket egy rögzített fészek (üllő) és egy transzduktorhoz csatlakoztatott szonotróda (szarv) közé helyezik, amelyek néhány tíz kHz-es, kis amplitúdójú akusztikus rezgést bocsátanak ki. Egy ultrahangos hegesztő készülék sematikus rajza az 5. ábrán látható.



5. ábra: Ultrahangos hegesztés vázlat

Az ultrahangos hegesztésnél általában a két alkatrész határfelületét speciálisan úgy alakítják ki, hogy a kötési folyamatot elősegítsék. Az egyik felület általában egy feldurvított, tüskés struktúrából álló felszínnel rendelkezik, amely érintkezik a második mintadarab felszínével. Az ultrahangos hegesztő berendezés energiája megolvasztja az alkatrészek közötti pontszerű érintkezéseket és ez által jön létre a kötés. Fémeknél a hegesztés a felületi oxidok nagynyomású diffúziója és az atomtörzsek helyi mozgása miatt következik be. Az ultrahangos hegesztés során bár van hőképződés, de ez nem elegendő az alapanyagok megolvasztásához.

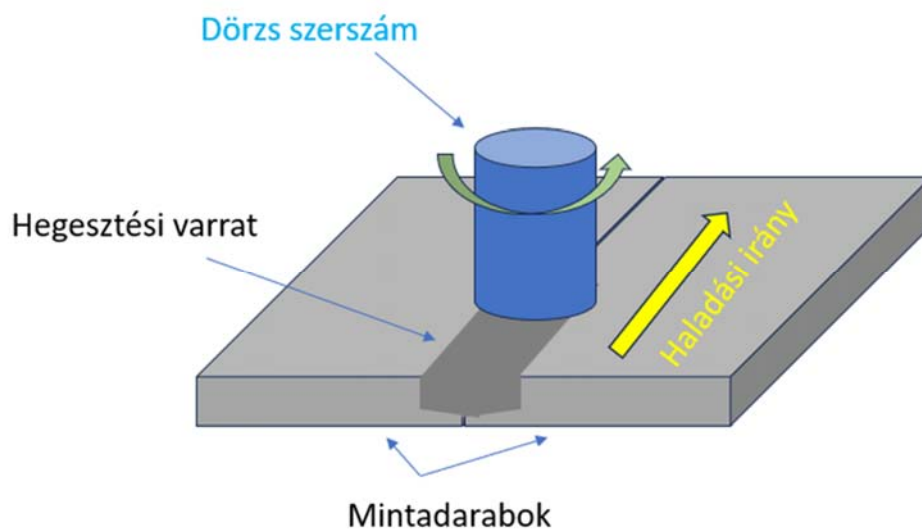
Az ultrahangos hegesztés előnye, hogy a kötési idő sokkal rövidebb, mint a hagyományos ragasztóknál vagy oldószereknél, így a munkadarabokat nem kell hosszú ideig rögzítésben tartani, amíg a kötés megszárad vagy megszilárdul. A hegesztés könnyen automatizálható, tiszta és precíz kötéseket készít; a hegesztés helye nagyon tiszta, és ritkán igényel utómunkálatokat. Az érintett mintadarabokra gyakorolt alacsony hőhatás lehetővé teszi, hogy ilyen technikával akár több rétegben lehessen anyagokat összehegeszteni mivel a hőtágulásból adódó alak deformáció gyakorlatilag elhanyagolható.

Az ultrahangos hegesztés széleskörű alkalmazása 1960-as szabadalmaztatását követően csak a '80-as évektől kezdődött meg és éppen ezért számos kutatás tárgyát képező folyamat [32]. Számos aspektusa még további tanulmányozást igényel.

1.3.2. Kavaró dörzshegesztés

A dörzshegesztést (angol terminológiában friction stir welding) egy forgó hengeres szerszámmal végzik, amelynek profilozott csapja (más néven szonda) kisebb átmérőjű, mint a váll átmérője. A hegesztés során a szerszámot két befogott munkadarab közötti illesztésbe vezetik be, amíg a szonda a munkadarabba nem fűrődik, és válla nem érinti a munkadarabok felületét. A szonda a szükséges hegesztési mélységnél valamivel rövidebb, a szerszám válla a munkafelületen halad. Rövid tartózkodási idő után a szerszámot az előre beállított hegesztési sebességgel a hegesztésivonal mentén mozgatják [33-35].

A folyamat sematikus ábrája az 6. ábrán látható.



6. ábra: A kavaró dörzshegesztés vázlata

A kopásálló szerszám és a munkadarabok között súrlódási hő keletkezik. Ez a hő, valamint a mechanikus keverési folyamat és az anyagban lévő adiabatikus tágulás által generált hő hatására a kevert anyagok felpuhulnak anélkül, hogy megolvadnának. Ahogy a szerszámot előre mozgatják, a szonda speciális profilja a megömlött anyagot az elülső oldalról hátrafelé kényszeríti, ahol a megmunkáló erők segítik a hegesztési varrat képződését.

A dörzshegesztéses folyamat során sajnos jelentős mértékű szilárd fázisú deformáció keletkezik, amely magában foglalja az alap fém dinamikus rekrisztallizációját is.

A kavaró dörzshegesztés szilárd fázisú jellege számos előnnyel bír a fúziós hegesztési módszerekkel szemben, mivel elkerülhetők a folyadék fázisból való lehűléssel kapcsolatos problémák. A dörzshegesztés során nem merülnek fel olyan problémák, mint a porozitás, az oldott anyagok újraelosztása, vagy a szilárdulás során keletkező mikrorepedések. Általánosságban elmondható, hogy az eljárás nagyon toleráns a folyamat-paraméterek és az anyagi tulajdonságok megváltozásaival szemben [36].

Mindazonáltal a technika számos sajátos hibát eredményezhet, ha nem megfelelően van alkalmazva. Az alacsony forgási sebességek vagy a nagy haladási sebességek miatt nem megfelelő hegesztési hőmérséklet például azt eredményezheti, hogy a hegesztendő anyag nem képes felvenni a hegesztés során fellépő nagymértékű deformációt. Ez hosszú, alagútszerű, a hegesztési varrat mentén futó hibákat eredményezhet, amelyek a felületen vagy a felszín alatt egyaránt keletkezhetnek. Az alacsony hőmérséklet leronthatja a kötés folytonosságát a hegesztés mindkét oldaláról származó anyag között. Ez a hiba különösen aggasztó, mivel nagyon nehéz roncsolásmentes módszerekkel, például röntgen- vagy ultrahangos vizsgálattal kimutatni. Ha a csap nem elég hosszú, vagy a szerszám nem emelkedik ki a lemezből, akkor előfordulhat, hogy a hegesztési varrat alján lévő határfelületet a szerszám nem munkálja meg [33, 36].

1.3.3. Elektronsugaras hegesztés

Az elektronsugaras hegesztésnél a szükséges energiát nagyfeszültséggel (60-150 kV) felgyorsított elektronok juttatják a folyamat zónájába. A sugarat jellemzően nagyvákuumban ($<10^{-4}$ mbar) hozzák létre, ugyanakkor az eljárás normál nyomáson is működik. Utóbbi esetben legfeljebb 30 kW-os sugár teljesítményt használnak, ilyenkor a sugár kilépése és a munkadarab közötti munkatávolságnak 6 és 30 mm között kell lennie.

Az elektronsugaras hegesztés körülbelül ugyanazt a teljesítményáram-sűrűséget kínálja, mint a lézersugaras hegesztés, a sugár előállításának nagyobb hatásfoka mellett (lézer: 3-40 %, elektronsugár: kb. 70 %). Ezen kívül az elektronsugaras hegesztés vákuumban kiküszöböli a védőgázok szükségességét. Mindkét tényező közvetlen hatással van az üzemeltetési költségekre, így egy elektronsugaras rendszer összességében és élettartama alatt olcsóbb lehet, mint egy hasonló lézerrendszer. Megjegyzendő ugyanakkor, hogy szükséges vákuumrendszer kiépítésének kezdeti beruházási költsége rendkívül költséges ezért ezt a technikát jellemzően csak olyan területeken alkalmazzák ahol a lézeres technika nem szolgáltat kellően jó eredményt vagy ahol az alkalmazás elbírja a nagyobb beruházási költségeket [37].

Az elektronsugaras hegesztés nagy hegesztési sebességet tesz lehetővé rendkívül mély, keskeny és párhuzamos varratok esetén. A kis varratszélesség és a nagyfokú párhuzamosság miatt a torzulás rendkívül kicsi maradhat. Ezért ez az eljárás a gyártási lánc végén is

alkalmazható. Az eljárás alkalmas a kis, bonyolult alakú hegesztési varratokhoz is, mivel az elektronsugár elektromos vagy mágneses mezőkkel pontosan és gyorsan eltéríthető. Ez azt jelenti, hogy nincs szükség az alkatrész mozgatására; az elektronsugár maga végzi el a mozgatást. A lehetséges varratmélységek tartománya 0,1 mm és 300 mm között van alumínium, 0,1-150 mm között acélok, 0,1-100 mm között réz, és 0,1-100 mm között titán anyagok esetén.

Az elektronsugaras hegesztő rendszereket gyakran használják az autópárházban (főként Japánban és Németországban) a sebességváltó alkatrészek tömeggyártásában. Az elektronsugaras hegesztést a repülőgépipar, a vasúti közlekedés, az orvostechika és az élelmiszeripar alkatrészeihez is alkalmazzák [37, 38].

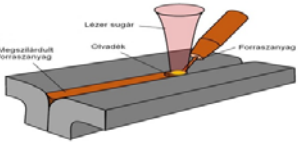
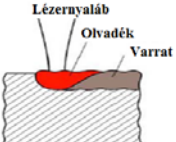
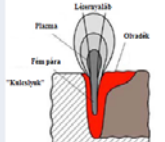
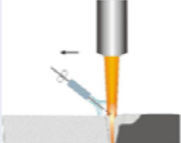
1.3.4. Ellenállás hegesztés

Az elektromos ellenálláshegesztés olyan hegesztési eljárás, amely során az egymással érintkező fémdarabokat elektromos árammal által generált Joule-hő segítségével megolvasztják meg és kötik össze. Az elektromos ellenálláshegesztést széles körben alkalmazzák például az acélcsonk gyártásánál és az autók karosszériájának összeszerelésénél. Az elektromos áramot lehet olyan elektródákhoz is vezetni, amelyek képesek összeszorító erőt is biztosítani. Ezen felül bizonyos elektródákat lehetséges külső mágneses térrel is indukálni. Az elektromos ellenálláshegesztési eljárás tovább osztályozható a varrat geometriája alapján is: megkülönböztetünk ellenállás ponthegesztést, és ellenállás varrathegesztést. A hegesztési hőmérsékletet befolyásoló főbb paraméterek a következők: a munkadarabok méretének egymáshoz viszonyított aránya, fémbevonat jelenléte vagy annak hiánya, az elektródák anyagai, az elektróda geometriája, az elektróda nyomóereje, az elektromos áram nagysága és a hegesztési idő hossza. A hegesztési folyamat során az olvadék képződés a mintadarabok legnagyobb elektromos ellenállással rendelkező pontján kezdődik meg, amikor azokon jellemzően 100-100000 A erősségű elektromos áram folyik át. Az ellenálláshegesztési módszerek általában hatékonyak és kevés környezetszennyezést okoznak, de alkalmazásuk viszonylag vékony anyagokra korlátozódik [39,40].

1.4. Lézeres kötéstechológiák

Az elektronsugaras hegesztéshez hasonlóan, mind a lézerhegesztés mind a lézerforrasztás sokoldalúan alkalmazható, és kiváló minőségű, igen jó mechanikai és elektromos tulajdonságokkal rendelkező kötést biztosít a legkülönbözőbb anyagok között. A lézeres kötéstechnikák egyetlen hátránya a viszonylag magas beruházási költség. E hátrányok ellenére manapság egyre inkább előtérbe kerülnek a lézeres kötéstechnikák, amelyek elterjedését nagyban segíti a nagy teljesítményű dióda- és folytonos üzemű szállérezek gyors fejlődése. Ezeknek a modern lézereknek a használatával nagy sebességgel, pontossággal és kivételes reprodukálhatósággal működő, nagymértékben automatizálható lézerrendszer építhető. A lézeres kötéstechológiák legfontosabb előnye többek között a kis hőterhelt zóna (HAZ), amely megakadályozza a fém torzulását (belső feszültség a hegesztés után). Ebből fakadóan lehetőség nyílik nagyon nagy folyamatsebességek elérésére is, amely biztosítja, hogy a folyamatok során csak minimális mennyiségű (rideg és nagy porozitású) intermetallikus vegyület (IMC) képződjön. A tökéletes körülmények eléréséhez alapos előzetes vizsgálatra és beállításra van azonban szükség. Ennek oka, hogy a lézeres kötési eljárások során rengeteg

lézer- és egyéb folyamatparaméter játszik szerepet (pl. lézerteljesítmény, hullámhossz, pásztázási sebesség stb.). Összefoglalva, a lézerhegesztés és a lézerforrasztás nagy lehetőségeket rejt magában az akkumulátorok összekapcsolására, de nagy körültekintéssel kell megvizsgálni és megtervezni a hegesztő, illetve forrasztó rendszereket. Mindhárom kötési módszernek több altípusa van. Az 5. táblázat tartalmazza a lézeres kötéstechológiák leggyakrabban használt alcsoportjait [18,26,27,41].

	Lézeres forrasztás		Lézeres hegesztés		
	Lágyforrasztás	Keményforrasztás	Hővezetési hegesztés	Mélyvarratos hegesztés	Hegesztés hozaganyaggal
Sematikus elrendezés					
Előnyök	Alacsony hőmérséklet	Mechanikailag erősebb kötés	Viszonylag alacsony hőmérséklet. Nem keletkeznek IMC-k	Gyors, sokoldalú technika gyakorlatilag bármilyen fémre	A varrat kémiai és egyéb tulajdonságai befolyásolhatóak
	Csak a forrasztóanyag olvad meg				
Hátrányok	Relative rossz mechanikai és elektromos tulajdonságok Védőanyag kell	Nincs univerzális forrasztó anyag Nem minden anyag forrasztható ugyan olyan jól	Lassú folyamat Relative gyenge mechanikai tulajdonságok	IMC-k keletkeznek, nagy hőmérséklet, nehezen modellezhető	IMC-k, nagy hőmérséklet, sok változós folyamat

5. Táblázat: Lézeres kötéstechológiák összevetése [18,27]

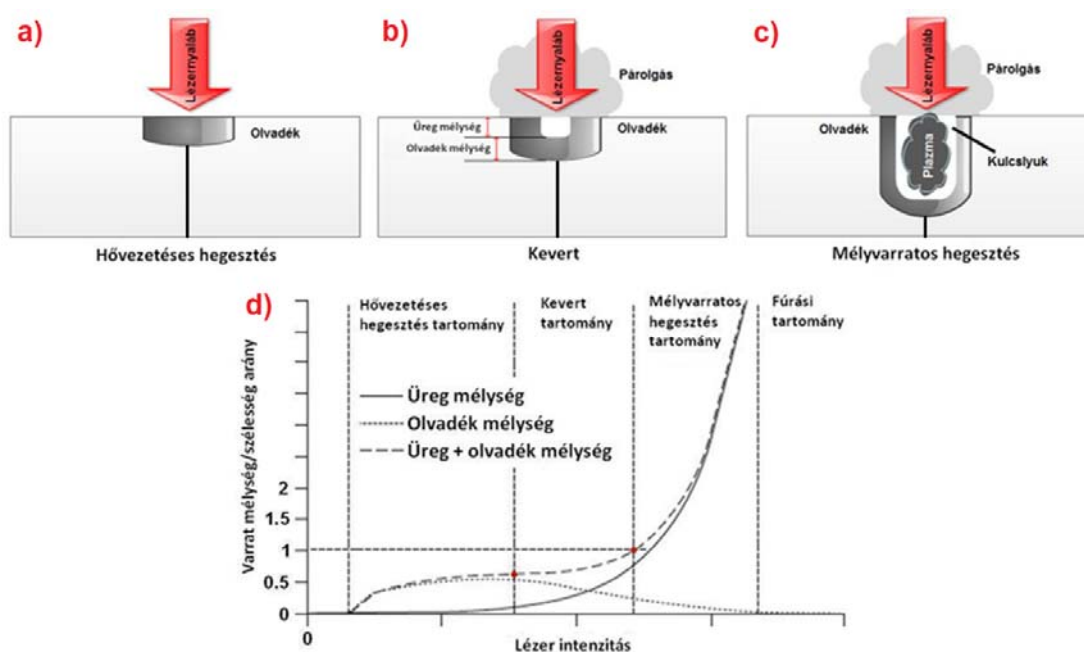
1.4.1. A lézersugaras forrasztás

A lézersugaras forrasztás, (továbbiakban lézerforrasztás) a klasszikus technikához hasonlóan két altechnikára bontható, ezek teljesen analóg módon a lézeres lágyforrasztás és a lézeres keményforrasztás. Mindkettő viszonylag kis lézernyaláb-teljesítménnyel és nem túl nagy pozicionálási pontosság igénytel is elvégezhető. Mivel a lágyforrasztás viszonylag alacsony hőmérsékleten történik, és alacsonyabb olvadáspontú forrasztóanyagot használ, ezért a megmunkálási folyamat során mérsékelt a mintadarab hőterhelése. A forrasztóanyagot többféle módon lehet hozzáadni a rendszerhez, gyakori megoldás az előre felhordott forrasztóanyag vagy a por befecskendezése a kötés területén. Egy másik gyakran alkalmazott módszer a forrasztóanyag hozzáadása hideg (egy esetben fűtött) huzal formájában. Ez utóbbi esetben a huzaladagoló egység nagyon pontos beállítására van szükség, mert ha a huzalt túl gyorsan vagy túl lassan vezetik be a forrasztási pontba, akkor a kötési terület megsérülhet, a kialakuló kötés hibás lehet, vagy a kötés akár egyáltalán nem is alakul ki [26,27]. A klasszikus forrasztáshoz hasonlóan a fő különbség a technika két altípusa között abban a hőmérsékletben van, ahol a kötés kialakul. A lézeres lágyforrasztás 450 °C alatt, míg a lézeres keményforrasztás e hőmérséklet felett történik. Általános szabályként az utóbbi szilárdabb kötést eredményez, alacsonyabb elektromos kontaktellenállással. E technikák kisebb kellemetlensége, hogy a lágyforrasztó- és keményforrasztó anyagok nem univerzálisak, minden egyes összekötendő fémkombinációhoz egyedileg kell kiválasztani őket, és nem minden fémkombináció köthető egyformán jól össze ezekkel a módszerekkel. A lehetséges kötési geometriák is korlátozottak. Összefoglalva, a lézerforrasztás műszaki szempontból kevésbé igényes, mint a lézerhegesztés,

de még mindig elég jó minőségű kötést eredményezhet, amely elegendő lehet az akkumulátor cellák összekapcsolásához [27].

1.4.2. A lézersugaras hegesztés

A lézersugaras hegesztés (a következőkben lézeres hegesztés) megvalósításához a lézerforrasztáshoz viszonyítva jóval nagyobb teljesítményű lézerrendszerre van szükség (hiszen ebben az esetben mindkét összekötendő fémot meg kell olvasztani). A lézeres hegesztés általában autogén kötési folyamat, ami azt jelenti, hogy a hegesztési folyamatban résztvevő anyagok egyneműek. A hibás kötések eredményező kötési hibák előfordulásának csökkentésére általában valamilyen összeszorító rendszert vagy készüléket használnak. Ha a fém abszorpciója a hegesztő lézer hullámhosszán (Yb:YAG és Nd:YAG lézer esetén $1\ \mu\text{m}$, míg a CO_2 lézernél $10,6\ \mu\text{m}$ közelében) elég nagy, akkor kisebb teljesítményű lézer is alkalmazható. A lézerhegesztést széles körben alkalmazzák hasonló fémek összekötésére, és a legtöbb fémkombináció esetében eltérő anyagok összekötésére (azaz heterogén összekötésre) is használható. A lézerhegesztés általában kiváló mechanikai és elektromos tulajdonságokkal rendelkező kötések eredményez. A lézerhegesztés a lehetséges hegesztési geometriák széles spektrumával rendelkezik, ahogyan azt korábban a 3. táblázatban bemutattam. A 7. ábrán szematikusan bemutatott három fő lézerhegesztési típus közötti különbség elsősorban i) a kialakított hegesztési medence geometriájában és ii) a hegesztés kialakulása során domináló termikus folyamatokban rejlik [18,26].



7. ábra: Lézeres hővezetési (a), kevert (b) és kulcslyuk (c) típusú hegesztés, valamint (d) a hegesztési olvadékmedence geometriájának a lézer intenzitásától való függése [18]

Hővezetési hegesztésről akkor beszélünk, ha a hegesztési medence mélysége kisebb, mint a szélességének a fele, és nem történik forrás vagy intenzív párolgás az egyesítendő fémek között. Ha a mélység egyenlő vagy nagyobb, mint a szélesség, és egy úgynevezett "kulcslyuk"

kialakul (ahol a párolgás, a plazmaképződés és a forrás együttesen van jelen), akkor mély behatolásról vagy kulcslyukhegesztésről beszélünk (néhány ritka esetben tartósan kialakul egy kevert rezsim is) [18].

A két fő típus tulajdonságait a 6. táblázat foglalja össze.

	Hővezetési hegesztés	Mélyvarratos hegesztés
Előnyök	Nincs gőzfázis Kevés kötési hiba Nincs kicsapódás Stabilabb folyamat Gyengébb minőségű lézernyaláb elegendő	Minimális mértékű alakváltozás Nagy mélységű hegesztés Nagy termelékenység (sebesség)
Hátrányok	Alacsony energiabecsatolási hatások Lassú folyamat Nagy mértékű alakváltozás lehetséges	Ötvözetek összetételének módosulása Nagy porozitás Sok kicsapódás Mechanikai tulajdonságok romlása Kiváló minőségű lézernyaláb szükséges

6. Táblázat: Lézeres hegesztés két fő típusa [18,26]

A hővezetési lézerhegesztés általában kis teljesítményű, vagy defókuszált lézernyalábbal történik. A kötés kialakítása során az alapanyag nagy részét nem közvetlenül a lézerfény melegíti, hanem a hő, hővezetés révén, a felső fémrétegből származik, amelyet a sugár közvetlenül megolvaszt. Ez az eljárás sokkal lassabb (általában feleakkora sebességgel végezhető), mint a kulcslyuk típusú lézerhegesztés, és gyengébb minőségű kötést eredményez (mind a mechanikai, mind az elektromos tulajdonságok tekintetében). Ennek a hegesztési módnak azonban óriási előnye a sekély behatolás és a nagyon korlátozott fémolvadás, amely gyakorlatilag kizárja az IMC-k kialakulását. A hővezetési lézerhegesztés akkor is alkalmazható, ha nem tudjuk elérni a tökéletes illeszkedést az összekötendő fémrészek között, mivel nagyobb lézerfoltméretet (defókuszált nyaláb) használ a kulcslyuk típusú lézerhegesztéshez képest [18].

A mélyvarratos vagy kulcslyuk típusú lézerhegesztés során, amely jellemzően sokkal nagyobb energiasűrűséggel történik, mint a vezetési hegesztés, mind a két munkadarab megolvad, és egy úgynevezett „kulcslyuk” keletkezik közöttük. A kulcslyukban a két fém keveréke több fázisban (szilárd, folyékony, gőz és még plazma is) van jelen, és bonyolult kémiai és fizikai folyamatok zajlanak le benne. Ezeknek részletes tárgyalása nagy kihívást jelent és nehezen modellezhető. Az energiacsatolás ebben a módban kiváló, mivel a lézersugár energiáját a kulcslyuk falai mentén végbemenő többszörös visszaverődések elosztják, így a folyamat energiatakarékos és gyors lehet, ha megfelelő lézerforrást és beállítást használunk. A mélyvarratos hegesztés nagyon pontos anyagkötést és finom paraméterhangolást igényel, de sokoldalú, nagyon gyors megoldást nyújt szinte minden fémkombináció kötésére. A folyamat megtervezésénél ugyanakkor szem előtt kell tartani a tényt, hogy bizonyos fémkombinációk hegesztése, még akár lézeres módszerrel is, IMC-ben gazdag, rideg kötéseket eredményez. [18,26].

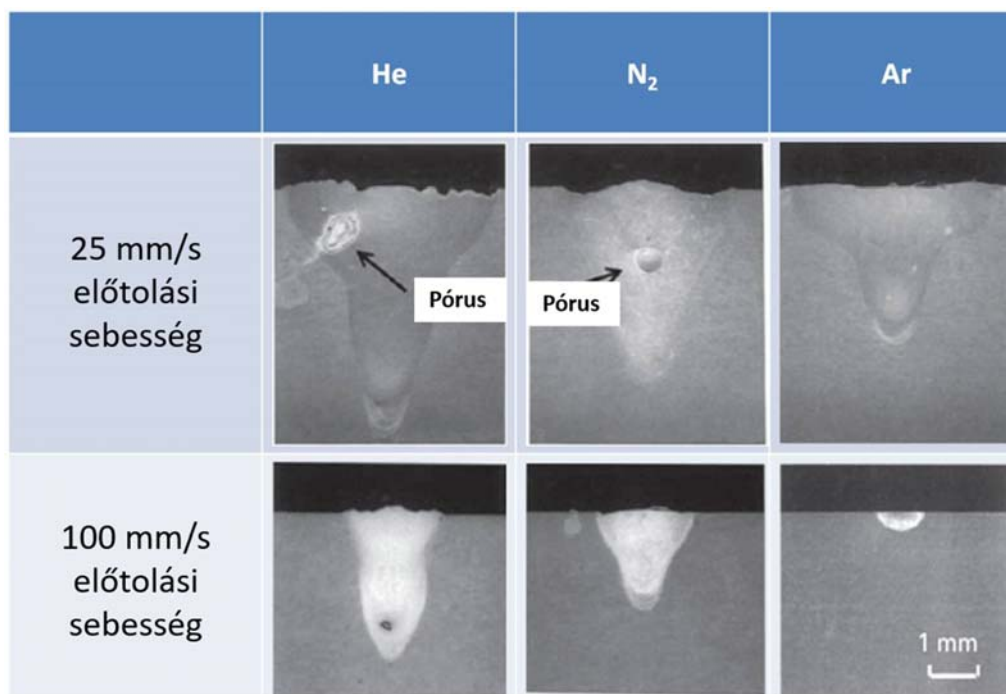
Egy harmadik, gyakran használt, különleges lézerhegesztési eljárás az úgynevezett lézerforrasztó hegesztés vagy hozaganyagos lézerhegesztés. Már a név is tükrözi, hogy ez a lézeres kötési technika a mélyvarratos lézerhegesztés és a lézerforrasztás kombinációja. Ennél a kötési módszernél a hegesztés során a hegesztési medencéhez további fémet vagy fémeket

(általában huzal formájában) adnak hozzá. Ez a fémadalék számos előnyt biztosít, például bizonyos hegesztési hibák (például alávágás) kiküszöbölését, vagy a többi fémmel való ötvözés révén jobb kémiai, mechanikai vagy elektromos tulajdonságokat eredményez. Bizonyos esetekben még a tökéletlenül illeszkedő alkatrészek hegesztését is lehetővé teszi speciális kötési geometriák esetén. A geometriák tekintetében a lézeres hozaganyagot hegesztés minden olyan esetben lehetséges, ahol a hagyományos lézerhegesztés alkalmazható, azonban a fémhuzal pontos beállítása és az előtolási sebesség pontos beállítása elengedhetetlen. Ha alacsony oldhatóságú és nagyon eltérő olvadáspontú fémkombinációkat kell hegeszteni/kötni (pl. alumínium és vas), akkor a kulcslyuk típusú hegesztés során elkerülhetetlen a töltőanyag használata, azaz ténylegesen hozaganyagot lézerhegesztés valósul meg [18,42].

1.5. A védőgázok szerepe a lézerhegesztésben

A lézeres kulcslyuk típusú hegesztéshez nagy energiasűrűsége van szükség. A szükséges energiasűrűség általában ionizálja a fémcélpont feletti gázt, és ott egy plazma felhő keletkezik, ami jelentős energiavesztést eredményez. A gázon történő energiavesztések csökkentése és az olvadt fémmedence nemkívánatos kémiai reakcióktól való védelme érdekében általában védőgáz atmoszférát kell alkalmazni. A gáznak vagy gázkeveréknek elég magas ionizációs energiával kell rendelkeznie ahhoz, hogy megakadályozza a plazmaképződést, és a gáz nem képezhet vegyületet az adott fémekkel, hogy megvédje azokat a szennyeződéstől és oxidációtól. Ezen okok miatt nemesgázokat (vagy azok inertgázos kombinációit) használnak erre a célra.

A különböző védőgázok jelenlétének hatását egy 6 mm vastagságú acéllemez 5 kW teljesítményű folyamatos üzemű CO₂-lézerrel előállított hegesztési varratára a 7. táblázat mutatja [18].



7. Táblázat: A védőgázok hatása a hegesztések minőségére [18]

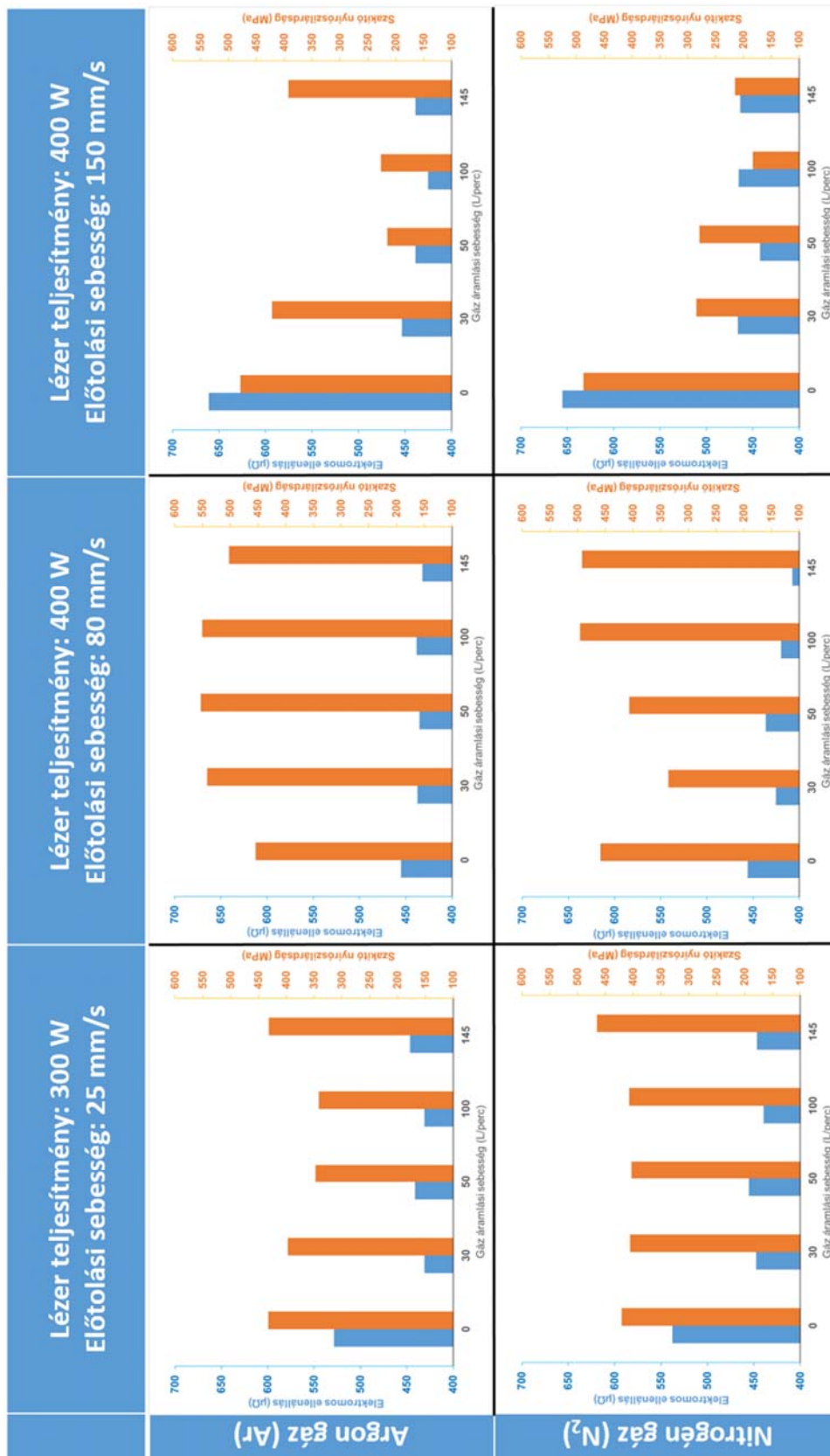
Látható, hogy a védőgáz atmoszféra jelenléte a hegesztési varrat mélységét és a porozitást is befolyásolhatja.

Elsősorban különböző alumíniumok, színesfémek és rozsdamentes acélok lézeres hegesztésénél szokásos különböző védőgázokat alkalmazni az olvadék medence „védelmének” érdekében. A megmunkálási folyamat ilyen jellegű kiegészítése az említett fémek esetében akár még az akkumulátor cellák hegesztésénél (ahol jellemzően nagyon csekély mértékű az olvadék mennyiség) is elengedhetetlen.

Kísérleteim során ugyan nem dolgoztam hasonló fémekkel viszont bizonyos mértékig szükségesnek tartottam, hogy jelenség szinten megvizsgáltam a védőgázok kötések tulajdonságaira gyakorolt hatását. A védőgáz elméletben közönséges szénacélok esetén is jelentős szerepet játszhat az intermetallikus vegyületek kialakulásának gátlásban, valamint az áramlásból adódóan jelentős hűtő szerepet tölthet be a folyamat során amely hatással van az olvadék visszadermedésének sebességére és ilyen módon a varrat kialakulására közvetlenül.

Ezen megfontolásból a hegesztési atmoszférák hatásának vizsgálatára: 0,5 mm vastagságú DC01 lemezek autogén lézeres hegesztése esetén meghatároztam milyen hatást gyakorol az elektromos és mechanikai viselkedésre, ha nem áramló levegő közeget különböző sebességgel áramló argon, vagy nitrogén gázra cseréltem.

Méréseim alapján a kétféle anyagi minőségű rendszer nagyon különböző módon viselkedik, de az elért hatás egyértelmű javulást eredményez minden esetben mind a két tulajdonság esetében. (8. ábra) Mindazonáltal a kísérleteim alapján az mondható el, hogy a védőgázok jelenléte vagy hiánya az általános tendenciákat nem változtatja meg ebből kifolyólag a további méréseim során nem alkalmaztam védőgáz atmoszférát.



8. ábra: Az elektromos ellenállás (kék) és szakító nyírószilárdság (narancssárga) értékek különböző gázminőség és áramlási sebességek esetén a munka ablak 3 különböző pontján

1.6. A lézeres kötéstechológiák akkumulátor technológiai alkalmazása

A korábban tárgyalt tulajdonságok, előnyök és hátrányok alapján egyértelmű, hogy a lézeres kulcslyukhegesztés és a lézeres forrasztás a két legjobb lézeres kötési eljárás az akkumulátorcsomagok összeszereléséhez. Különösen a lézeres kulcslyukhegesztés mutat nagy potenciált, ebből fakadóan egy széles körben vizsgált és kutatott módszer. Ebben a fejezetben bemutatom, hogyan alkalmazzák a lézeres kulcslyuk típusú hegesztést hengeres típusú lítium-ion akkumulátorcellák összekötésére, és bemutatok néhány speciális technikát és a hozzájuk kapcsolódó eredményt, amelyek tovább javíthatják a technika már alapvetően is jó tulajdonságait, hogy a folyamatot konzisztensebbé tegyék, ami javítja a reprodukálhatóságot (ami a közlekedésben való alkalmazás egyik legfontosabb előfeltétele).

1.6.1. Ponthegesztés és varrathegesztés

Az akkumulátorcellák lézeres hegesztése mind impulzus, mind folyamatos üzemi lézerekkel megvalósítható. A mérnöki gyakorlatban a hegesztésnek akkumulátor kötések szempontjából két módszere létezik: a ponthegesztés és a varrathegesztés, amelyeket a 8. táblázatban hasonlítok össze.

	Tulajdonságok	Illusztráció
Ponthegesztés	<ul style="list-style-type: none">• Kritikus a hegesztendő elemek pozicionálása, a fókuszpont helyzetének meghatározása• Kis kötési felület, gyengébb mechanikai tulajdonságok	
Varrathegesztés	<ul style="list-style-type: none">• Cw és impulzus üzemi rendszerben is megvalósítható• A reflexiós veszteség függ a nyaláb beesési szögétől és a felület durvaságától	

8. Táblázat: Pont és varrathegesztés [18]

A ponthegesztés a lézerhegesztés legegyszerűbb formája (vezetékes és mélyvarratos mód is lehetséges), és megvalósítása egyetlen, nagy energiájú lézerimpulzus (néha impulzusok sorozata) segítségével történik, amely a célterület egy meghatározott pontjában alakít ki kapcsolatot a két fém között. A ponthegesztés kevésbé kívánatos és viszonylag ritkán valósítják meg folyamatos üzemi lézerrel, mivel kis kötési területet biztosít, és így általában rendkívül gyenge mechanikai tulajdonságokkal rendelkező kötést eredményez [26,29].

Az akkumulátorok lézeres hegesztésének területén elterjedtebb séma az úgynevezett varrathegesztés. A lézeres varrathegesztésnél a hegesztendő alkatrészeket általában egy stabil lézerfej alatt forgatják vagy mozgatják, így egy folyamatos (vagy egymást átfedő pont-) hegesztési varrat alakul ki. Általában minden szempontból jobb kötést eredményez, és mind vezetékes, mind mélyvarratos típusú hegesztés megvalósítható impulzus és folytonos

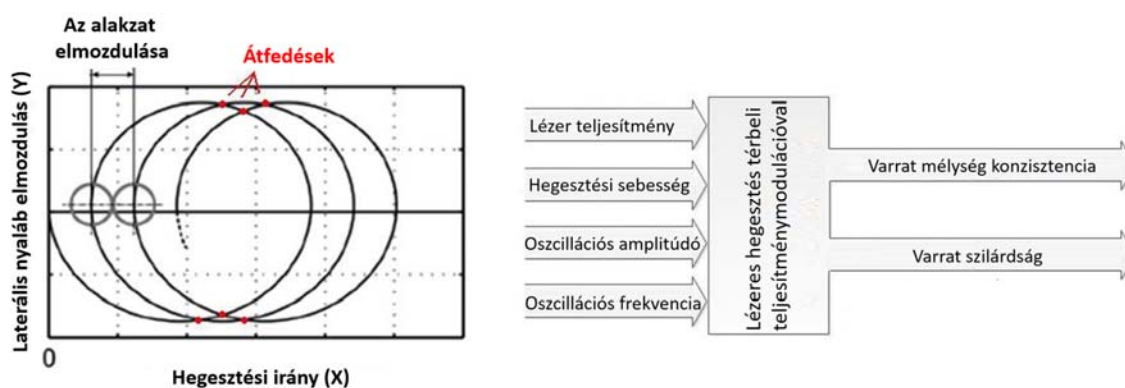
üzemmódú lézerrel egyaránt. A folyamatos üzemmódú lézerek használata magától értetődő, míg az impulzus üzemmód esetén a varratképzés nagy ismétlési frekvencia és nagy átfedési faktor esetén valósítható meg [19,29].

1.6.2. Az időbeli és térbeli moduláció hatása a varrathegesztésnél

Különböző kutatócsoportok szerint az akkumulátorcellák varrathegesztése stabilabbá tehető bizonyos speciális módosításokkal a hegesztési folyamat során [43-47].

Térbeli teljesítménymoduláció:

Az egyik ilyen speciális módosítást a lézersugár térbeli modulációja jelenti. A térbeli teljesítménymoduláció az a folyamat, amikor a folytonos üzemmódú hegesztő lézersugár és a hegesztendő fémcélpontok relatív helyzete megváltozik. Ez könnyen megvalósítható egy háromdimenziós galvanometrikus szkannerfejjel felszerelt lézerhegesztő berendezéssel. A lehetséges mintázatok száma, amelyek esetén ez a módszer megvalósítható, korlátlan, de a mérnöki gyakorlat azt mutatja, hogy a spirális minta messze az egyik leghatékonyabb eljárás, amelyet az iparban gyakran „wobbling” technikának is neveznek [43,44].



9. ábra: A térbeli teljesítménymoduláció és paraméterei [43]

Amint az 9. ábrán látható, a térbeli teljesítménymodulációnak négy alapvető folyamatparamétere van, amelyek befolyásolhatják a kialakított hegesztési varrat tulajdonságait. Ezek közül kettő, nevezetesen az oszcillációs frekvencia és az amplitúdó kizárólag erre a sajátos eljárásra jellemző. Ezen paraméterek a hegesztési sebességgel kiegészítve határozzák meg a hegesztési mintázat méretét, annak elmozdulási sebességét valamint az átfedések gyakoriságát is.

Az oszcillációs amplitúdó hatással van a folyamat reprodukálhatóságára, mivel befolyásolja a hegesztési mélység állandóságát. A hegesztési mélység konzisztenciáját a behatolási mélység maximális és minimális értékének hányadosaként határozzák meg [43,44].

A gyakorlati tapasztalat szerint, alacsonyabb lézerteljesítmény értékeknél a térbeli teljesítménymodulációs paraméterek hatása csekély. A lézerteljesítmény növelésével azonban a hatások mértéke jelentős lehet. Általában véve az eredmények azt mutatják, hogy a nagyobb frekvenciájú és nagyobb amplitúdójú oszcilláció a nagyobb térfogatú olvadákképződésből fakadóan erősebb kötést eredményez [45,46].

Összefoglalva, tehát a térbeli teljesítménymoduláció (optimálisan megválasztott paraméterekkel) megnövelt olvadt fémmennyiséget és hegesztési szélességet eredményez, ami nagyobb kötési területet biztosít (erősebb kötés), továbbá javítja a reprodukálhatóságot a hegesztési mélység stabilizálásával.

Időbeli teljesítménymoduláció:

A másik jelentős modulációs technika, amely egyre nagyobb teret nyer a lézerhegesztésben, az időbeli teljesítménymoduláció. Ebben az eljárásban a folyamatos üzemű lézer teljesítményét időben változtatják a megmunkálás során. A legelterjedtebb módszer a mélyvarratos hegesztés teljesítmény küszöbérték körüli szinuszos időbeli teljesítménymoduláció. Azonban más időbeli teljesítmény-hullámformák is segíthetik a hegesztési folyamatot. Például a folyamat elején alacsony plató teljesítmény alkalmazása az előmelegítésen keresztül növelheti az energiabecsatolás határfokát, míg a lézerteljesítmény lassú növelése a hegesztési folyamat elején csökkentheti a fémfröccsenés kialakulását, vagy a teljesítmény lassú csökkentése a hegesztési folyamat végén csökkentheti az alávágási hibákat [44,47].

Szinuszos időbeli teljesítménymodulációra vonatkozó kutatások tanúsága szerint a modulációs frekvenciának van egy optimális értéke, amely a legmélyebb behatolást és a legkisebb számú olvadékkilövellést eredményezi [47].

Az időbeli teljesítménymoduláció önmagában csökkentheti a hegesztés során fellépő olvadt fém kilökődését azáltal, hogy egy hidrodinamikai értelemben stabilabb olvadék medencét hoz létre, és így simább hegesztési varratot eredményez, ezen felül a mélyebb behatolás elősegítésével kiterjesztheti azt a sebességtartományt, amelyben kötést lehetséges kialakítani a két fém között. Fontos megjegyezni, hogy az időbeli moduláció nagyon pontos beállításokat és kalibrációt igényel az optimális folyamatparaméterek meghatározásához [44,47].

A térbeli és időbeli teljesítménymoduláció egyenként vagy egyszerre is alkalmazható bármely lézeres akkumulátorcella varrathegesztési alkalmazásban a hegesztési tulajdonságok javítása érdekében.

1.7. A lézeres hegesztés kutatására irányuló igények és motiváció

A hegesztéseket klasszikusan szerkezeti anyagok oldhatatlan, metallurgiai értelemben történő összekapcsolására használják, ahol elsősorban (vagy esetleg kizárólag) mechanikai megfontolások a mérvadók. Egy másik jelentős területe a hegesztések gyakorlati felhasználásának a vákuumtechnológiai alkalmazásokban van, ahol – a mechanikai szilárdság mellett – a varrat folytonossága és ezen keresztül a kötés lyukmentessége a lényeges szempont. Ezekből kifolyólag a gyakorlati alkalmazásoknak csak rendkívül kis hányadában fontos szempont az elektromos tulajdonságok vizsgálata. Ennek megfelelően akár még manapság is a hegesztések tanulmányozásának csak viszonylag kis hányada foglalkozik a kötések elektromos tulajdonságának vizsgálatával.

Ugyanakkor a modern akkumulátor hegesztési eljárások során kifejezetten az elektromos és a mechanikai tulajdonságok együttes optimalizálása a legfőbb kihívás.

Az 1.4. fejezetben részletezett tulajdonságok és speciális lehetőségek alapján látható,

hogy az akkumulátor cellák permanens összekapcsolásának egyik, ha nem a legkézenfekvőbb módja a lézeres hegesztés. Ez a technika ugyanis rendkívül sokoldalú és számos paraméter áll rendelkezésre a varrat kialakításának befolyásolására és ez által lehetőség nyílik akár az elektromos tulajdonságok igencsak széleskörű optimalizálásra is. A technika ugyanakkor a 1.4.2. fejezetben bemutatott tulajdonságok alapján rendelkezik bizonyos hátrányokkal is amelyek akár az akkumulátor technológiai alkalmazások során is jelentős szerepet játszhatnak. Ezek közül a legjelentősebb talán a kis kötési keresztmetszet, amely alapvetően kedvezőtlen mechanikai tulajdonságokat eredményezhet. Ugyanakkor ezek figyelembevétele és megfelelő kezelése gyakorlatilag minden esetben lehetséges.

Munkám célkitűzéseit a fentiek alapján fogalmaztam meg.

2. CÉLKITŰZÉSEK

Napjainkban az elektromos és hibrid járművek elektromos energiaforrásaiként szolgáló akkumulátorcsomagok lézeres hegesztése napjainkban egyaránt népszerű téma a műszaki és tudományos kutatások területén. Mivel nagyszámú egyedi elemet kell összekötni, a folyamat optimalizálása kulcsfontosságú feladat, mivel akár a legkisebb javulás a legalacsonyabb összekötési szinten összességében jelentős nettó nyereséget eredményezhet [1].

A hegesztést hagyományosan szerkezeti anyagok kötésére alkalmazzák, ebből fakadóan a kötés mechanikai tulajdonságainak optimalizálása egy jól definiált és széleskörben tanulmányozott terület [2,26,48-50]. Az elektromos járművek megjelenése ugyanakkor drasztikusan megváltoztatta ezt a helyzetet. Amennyiben az optimalizálás akkumulátor technológiai alkalmazásokra irányul, a kötés elektromos ellenállása ugyanolyan fontossá válik, mint annak mechanikai szilárdsága: hiszen a végső cél egy olyan hegesztési varrat elkészítése, amely egyidejűleg mutat nagy mechanikai szilárdságot és alacsony elektromos ellenállást. Ez ráirányította a figyelmet a hegesztések elektromos tulajdonságai vizsgálatának szükségességére [27,28,51,52].

Ebből az igényből fakadóan kutatásaim során a fő célom az volt, hogy *egyidejűleg* optimalizáljam a hegesztést a létrehozott kötések elektromos és mechanikai tulajdonságaira.

Lézeres hegesztéssel létrehozott varratok tulajdonságainak optimalizálására alapvetően kétféle lehetőség van. A leggyakrabban alkalmazott és egyszerűbb módszer a megmunkálási és egyéb kiegészítő paraméterek (szkenelési sebesség, hegesztési atmoszféra, hőmérséklet) közvetlen változtatásával történő optimalizálás. A másik módszer pedig a rögzített lézer paraméterek mellett történő varrat geometriai optimalizálás (varrat alakzat, és konfiguráció), ahol a lehetőségeknek praktikusán csak a képzelet szab határt.

A lézeres paraméterek közvetlen változásának hatására elsősorban az olvadékban bekövetkező áramlási változások miatt a megmunkálás után különféle varrat morfológiák alakulnak ki a lézer hegesztett minták felszínén. Kutatásaim egyik célja az volt, hogy feltárjam a kapcsolatot egyrészt a lézerparaméterek és a kialakuló morfológiai osztályok között, másrészt, hogy megvizsgáljam, hogy az egyes morfológiai osztályok milyen karakterisztikus elektromos és mechanikai tulajdonságot eredményeznek.

Kutatásaim második célját képezte a lézeres hegesztési varratok elektromos és mechanikai tulajdonságának optimalizálása a lézeres paraméterektől függetlenül. Azaz, hogy szabályszerűséget és korrelációt keressek és tárjak fel a varratok alakzatának és konfigurációjának szisztematikus változtatása függvényében.

A kitűzött fő céljaim alapján látható, hogy a munkám során minták elektromos és mechanikai szempontból történő jellemzése központi szerepet töltött be. Ezen tulajdonságok mérésére külső tápegységgel ellátott négyponos ellenállásmérő rendszert, egy digitális 3D mikroszkópot és egy a mechanikai tesztre szolgáló szakítógépet alkalmaztam. Mivel az akkumulátor cellák burkolatának és saruinak anyaga a legtöbb esetben egyszerű hidegen hengerelt acéllemezből készült így észszerűnek tűnt, hogy kísérletsorozataim során legnagyobb részében DC01 acélszalagokat használjak modellanyagként. Ugyanakkor fontosnak tartottam a megfigyeléseim univerzalitásának alátámasztása érdekében, hogy a lézeres hegesztési kísérleteimet egy más, fémtanilag bonyolultabb és technikai szempontból szélesebb körben elterjedten alkalmazott, nikkel bevonattal rendelkező rozsdamentes acél ötvözet szalagokon is

tanulmányozzam.

A lézeres hegesztéseim során mindig fém szalagok esetén alakítottam ki kötéseket, átlapolt kötési geometriában, autogén módon (azaz a két szalag anyaga megegyezett). A szalagokat egy egyedileg tervezett összeszorító készülékben munkáltam meg, amely alkalmas volt a mintákat vastagságtól függetlenül megfelelően rögzíteni és pozícióban tartani.

3. KÍSÉRLETI MÓDSZEREK

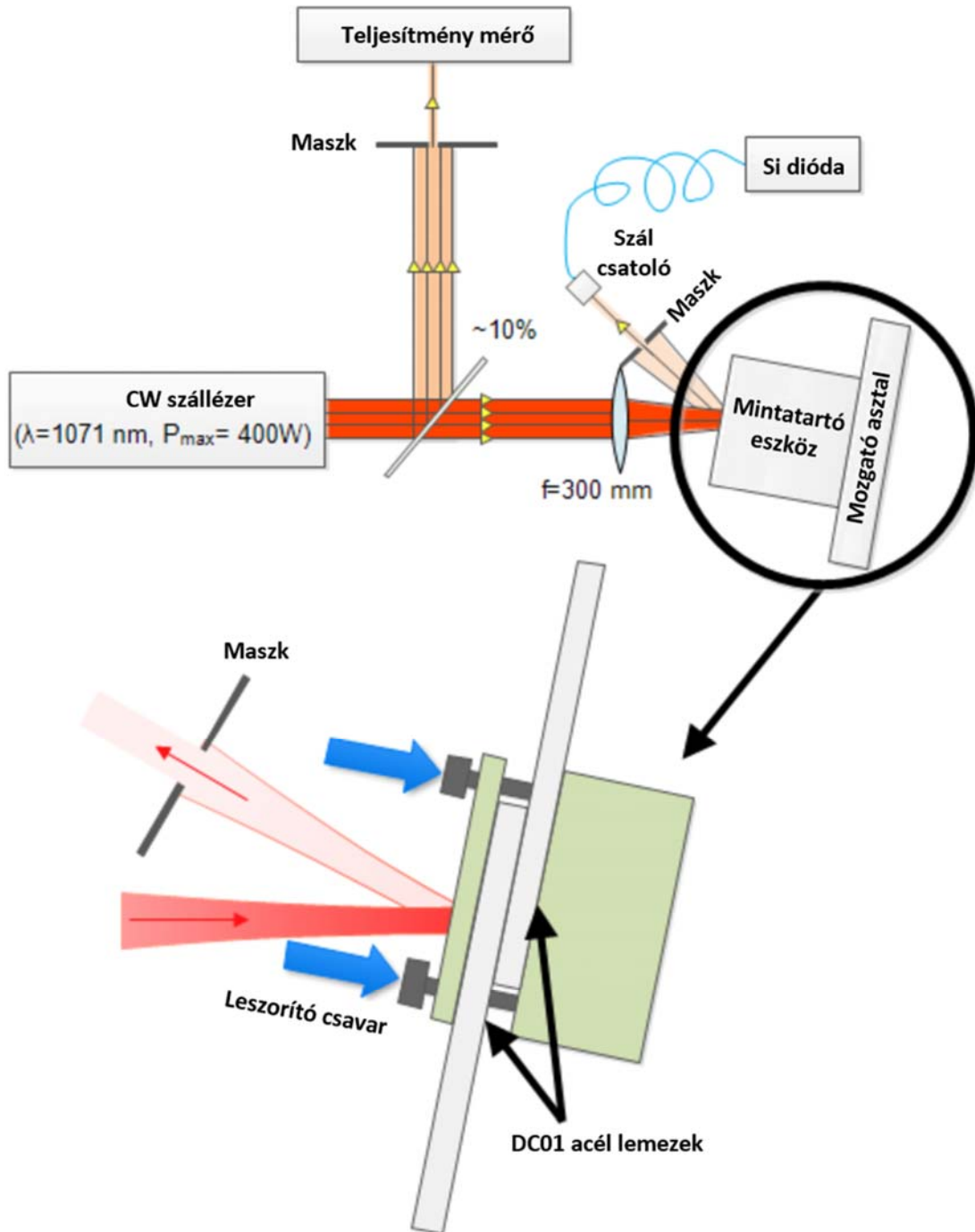
3.1. Lézeres hegesztőrendszer

Kísérleteimben acéllemezek mélyvarratos lézeres varrathegesztését tanulmányoztam átlapolt kötési geometriában, hőforrásként folyamatos üzemű, szállézereket használva. Annak érdekében, hogy ilyen irányú vizsgálataimat elvégezhessem a legkézenfekvőbb megoldás a folyamatos üzemű, úgynevezett szállézerekre alapuló lézerrendszerek használata volt. Kutatómunkám során két különböző lézeres megmunkáló rendszert alkalmaztam. Egy saját építésű, kisebb teljesítményű rendszert, amelyben egy egyenes mentén van lehetőség a megmunkálásra (1D rendszer), és egy professzionális, kompakt kialakítású, nagy teljesítményű ipari hegesztőállomást, amelyben a szkener optikának köszönhetően egy munkasíkon van lehetőség a varratok kialakítására (2D rendszer).

3.1.1. Az 1D hegesztő rendszer

A munka kezdeti szakaszában egy olyan optikai elrendezést alakítottam ki, amely egyidejűleg alkalmas egy dimenzióban mélyvarratos hegesztések kialakítására, esetlegesen védőgázok a megmunkálási területre történő vezetésére, a beérkező energia folyamatos in-situ megfigyelésére és rögzítésére, valamint a hegesztési sebesség nagy pontosságú szabályozására. A rendszer egy független lézerforrásból, egy hozzá épített optikai elrendezésből, és egy egyenes mentén mozgó asztalból áll, amely nagysebességű ($V_{\max}=0,5$ m/s), programozható és amelyen egy egyedi tervezésű mintatartó (angol terminológiában: jig) kapott helyet.

A berendezés vázolata az 10. ábrán látható.



10. ábra: Az 1D hegesztő rendszer

Az 1D rendszerben hőforrásként egy lézeres hegesztés szempontjából közepesnek számító teljesítményű, egymódusú, folyamatos üzemű, Yb-adalékolt szállézer (SP-400C-0005: 1071 nm hullámhossz, 400 W maximális teljesítmény, polarizálatlan, $M^2 = 1,08$) használtam. A lézernyalábot 10° -os beesési szögben, Thorlabs gyártmányú 300 mm fókusztávolságú gyűjtőlencsével (LE1929-B) egy egyedi mintaösszeszorító eszközben (továbbiakban: jig) rögzített, acéllemezpár (amely az akkumulátor és a gyűjtősín határterületét

reprezentálták) felső lapjának területére gyűjtöttem egy 0,6 mm átmérőjű foltba. A jig egy programozható nagysebességű asztalra (Allen Bradley Ultra 3000) volt rögzítve, amelynek sebessége a 0,1-500 mm/s tartományban 0,1mm/s lépésközzel változtatható. A lézerforrás kollimáló lencséje és a fókuszálást végző gyűjtőlencse közé egy plánpárhuzamos lemezt helyeztem el 45°-os beesési szögben annak érdekében, hogy a nyalábból kicsatolja az energia hozzávetőlegesen 10°-át, hogy a lézerforrásból kilépő nyalábenergia annak detektoraitól függetlenül is mindenkor mérhető legyen egy külső Thorlabs gyártmányú detektorral (S132C). Ezen felül egy második detektorral lehetőség volt a célterületről visszaverődött energia változásának nyomonkövetésére is. Ezzel az elrendezéssel mélyvarratos lézerhegesztett kötéseket lehetett előállítani átlapolt kötés konfigurációban.

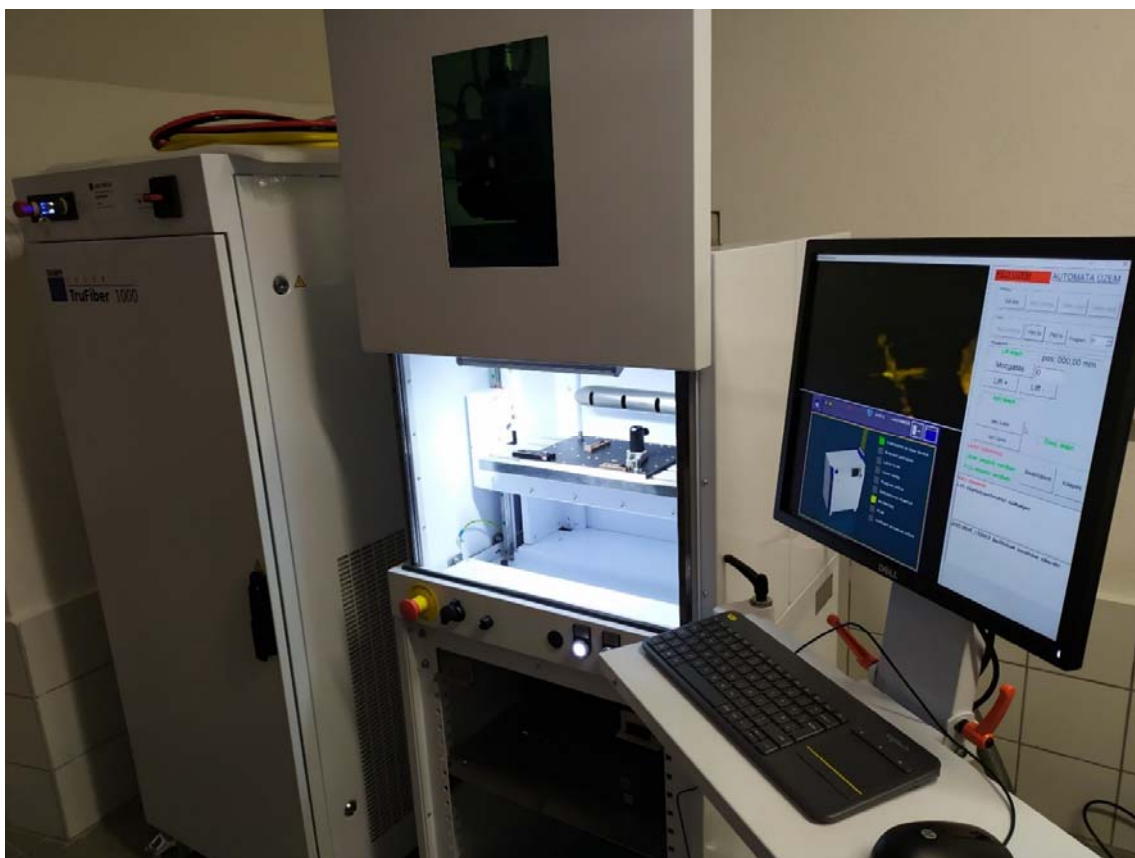
A kísérletekhez minta anyagnak DC01 típusú acéllemezeket választottam, abból a feltételezésből kiindulva, hogy a Li-ion cellák burkolatának gyártásához használt alapanyag kémiai összetételét és mechanikai tulajdonságát tekintve hasonló ehhez az alacsony széntartalmú, ötvözetlen, hidegen hengerelt acélokhoz. A gyakorlattal szemben a fő különbség az, hogy az akkumulátorházak burkolatát általában vékony nikkel- vagy krómréteggel vonják be a korrózióállóság növelése érdekében.

Az átlapolt geometria kulcsfontosságú volt a kísérleteinkben, hogy modellezzük mind az akkumulátorkupak és a gyűjtősín közötti közvetlen kötéseket, mind a fejlettebb szalag kötési eljárásokat, ahol a cellákat nem közvetlenül kötik egy gyűjtősínhez hanem egy átvezető drót vagy szalag segítségével. Ezek a megoldások tekinthetőek ugyanis a legjobb és leggyakrabban használt konfigurációnak az akkumulátorcsomag-összeállítás területén [29].

Az ezzel a rendszerrel végzett kísérleteim során az egyetlen szisztematikusan változtatott folyamatparaméter a előtolási sebesség volt, minden más folyamatparamétert (lézerteljesítmény, beesési szög, nyomás, hőmérséklet, gázatmoszféra) állandó értéken tartottam. A legnagyobb elérhető beeső lézerteljesítmény 360 W volt a célterületen. Az állandó hegesztési sebesség biztosítása érdekében egyedi vezérlőrendszert alkalmaztam, amely jelet generált, amikor a nagy sebességű programozható asztal befejezte a gyorsítást és elérte a beállított sebességet és pozíciót majd megszüntette a jelet amint a minta megtette a megfelelő távolságot konstans sebességgel. Ezt a jelet használtam vezérlésként a megvilágítás megkezdésére és egy adott távolság után történő befejezésére. Ennek a módszernek a használata jelentős volt annak biztosításához, hogy a hegesztési sebesség a hegesztési varrat teljes hosszában azonos maradjon. Az előtolási sebességet 5 és 250 mm/s között hangoltam, mivel ez volt az a tartomány, ahol a modellrendszeremben az említett folyamatparaméterek mellett megfelelő varratképződés volt megfigyelhető. A fent leírt eljárással 8 mm hosszú hegesztési varratokat hoztam létre a két összehegesztendő fémlemez leghosszabb méretére merőlegesen, különböző szkennelési sebességek mellett.

3.1.2. A 2D hegesztőállomás

Az átlapolt kötések szisztematikus morfológiai és geometriai vizsgálatára egy az InduPro Kft. által épített lézerhegesztő állomást használtam. A hegesztőállomásban egy Yb-adalékolt, egymódusú, folytonos üzemű szállézer (Trumpf TruFiber 1000: $\lambda=1075$ nm, $P_{\max}=1000$ W, $M^2=1,2$, polarizálatlan nyaláb) működött a hegesztés energiaforrásaként. A hegesztőállomásról készített fotó a 11. ábrán látható.



11. ábra: A 2D hegesztőállomás

A rendszerben egy 264 mm névleges fókusz távolságú, programozható fókuszáló optikai egység (Trumpf PFO20-2) fókuszálja a lézernyalábot egy (a hegesztőállomáshoz megadott adatok alapján végzett számítások alapján) 0,35 mm átmérőjű foltra ($1/e^2$ intenzitás érték). A fókuszáló optikai egység 180 mm x 136 mm-es méretű megmunkálási területtel rendelkezik, amelynek geometriai középpontjában volt elhelyezve az acéllemezpárt tartalmazó mintatartó. A sugárnyaláb nyaka (0,1mm-es pontossággal) egybeesett a hegesztendő minta (lemezpár) legfelső felületével. A hegesztőállomásban a pásztázó lézernyaláb alá egy szoftveresen függőlegesen állítható magasságú x-y asztalon kapott helyet a korábban az 1D rendszerben használt mintatartó.

A mintákat ebben a rendszerben is elsősorban 16 mm széles és 0,5 mm vastag hidegen hengerelt DC01 acéllemez-párok alkották, amelyek 16 mm-es átfedési hosszal előre beillesztve kerültek be az egyedi mintatartóba. A mintaösszeszorító „ablakos” felső felét 4 egyenletesen meghúzott csavarral rögzítettem. A pásztázási sebességet 1200 mm/s-ig lehetett változtatni, 0,1 mm/s pontossággal. Ezzel az állomással szintén lézerhegesztett kötések állítottam elő átlapolt kötés konfigurációban.

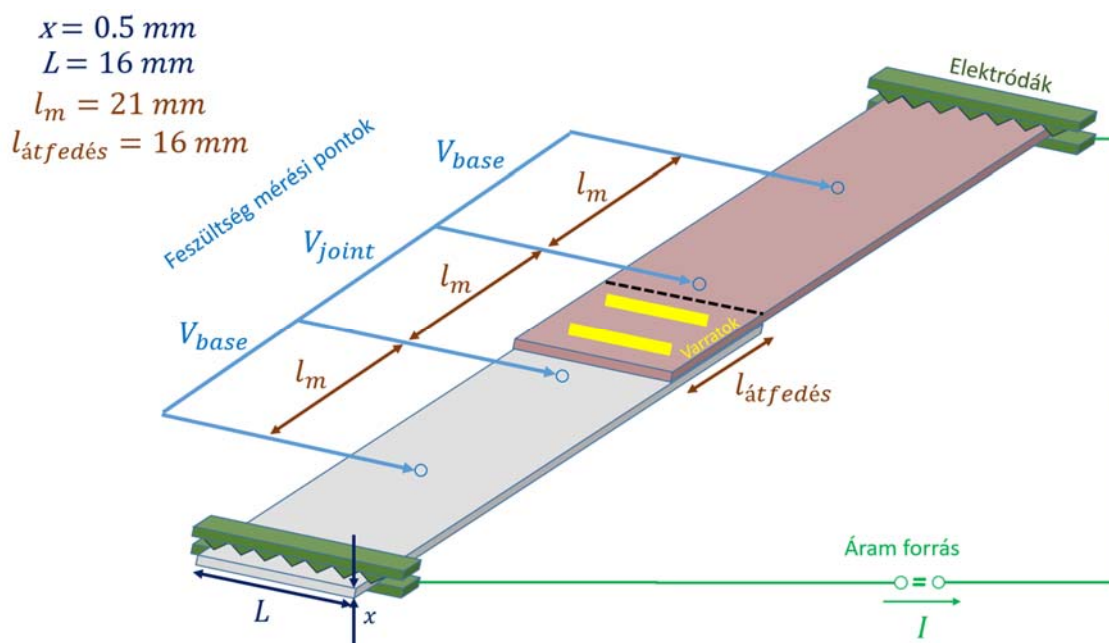
A tapasztalatok és megfogalmazott megfigyelések kiterjesztése és a megfigyelt tendenciák egyetemességének bizonyítása érdekében a kereskedelmi forgalomban Hilumin® márkanéven kapható, Tata Steel gyártmányú nikkel bevonatú acéllemezekben is megismételtem a DC01 acélon elvégzett kísérleteket.

Vizsgálataim során két elsődleges folyamatparamétert változtattam, nevezetesen a

mintára eső lézerteljesítményt és a pásztázási sebességet, míg minden más folyamatparamétert állandó értéken tartottam. Ezek a rögzített rendszerparaméterek a következők voltak: 0° -os lézer beesési szög, 23°C -os környezeti hőmérséklet és atmoszférikus nyomású, nem áramoltatott levegő környezet. A lézer pásztázási sebességét 1 mm/s és 1200 mm/s között, míg a lézerteljesítményt 150 W -tól 1000 W -ig változtattam, mivel ez volt az a tartomány, amelyben megfelelő varratképződés volt megfigyelhető a rendszerben, amikor a lézerteljesítményt és a pásztázási sebességet megfelelő párosításban választottam meg.

A fent leírt feltételek mellett 1 vagy több különböző hosszúságú hegesztési varratot hoztam létre, jellemzően a lemezpárok leghosszabb tengelyére merőleges irányban.

3.2. Elektromos tulajdonságok mérése



12. ábra: A lézerhegesztett minta és a 4 pontos ellenállásméréshez szükséges elektródák elhelyezkedése

Napjainkban a lézerhegesztett kötések elektromos tulajdonságainak körültekintő és szabványosítható jellemzésére nagy igény mutatkozik. Az akkumulátor cellahegesztéssel foglalkozó kutatócsoportok [16,53,54] általában a Schmidt és munkatársai által bevezetett mérési módszert alkalmazzák, és az egyenlő távolságokon mért feszültségesegek, a V_{joint} és a V_{base1} és V_{base2} figyelembevételével egy úgynevezett k -faktort vezetnek be [55], amely azt jelzi, hogy a kötés ellenállása mennyire áll közel a hegesztendő alkatrészek tömbi ellenállásaihoz. Ha a két összekötendő lemez azonos anyagú, a V_{base1} és a V_{base2} azonos lesz, és helyettesíthető V_{base} -vel (12. ábra), ezáltal egyszerűsítve a k faktor kiszámítását, ami az 1. egyenletet eredményezi:

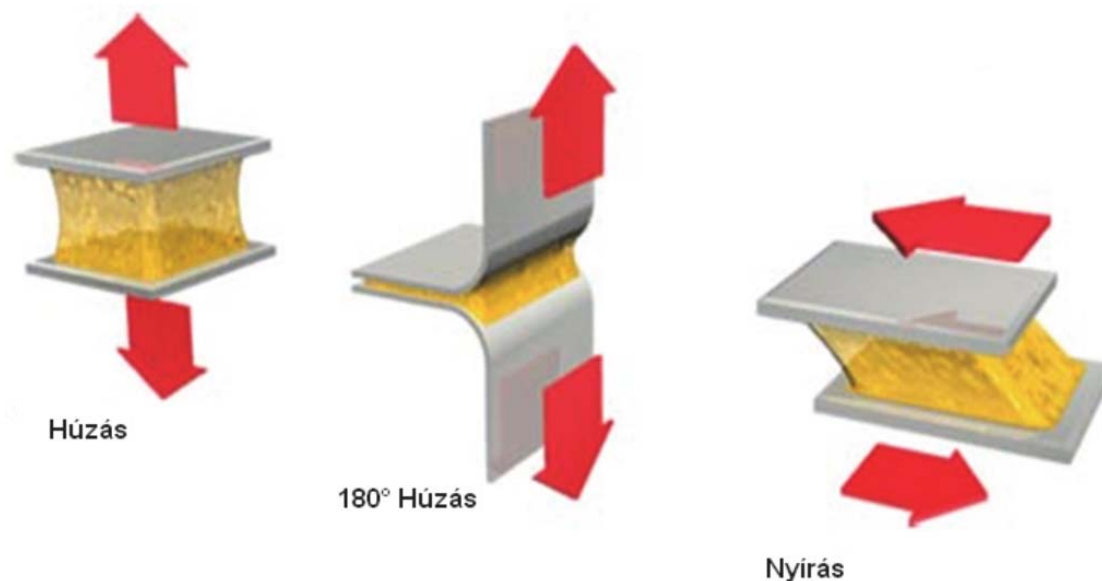
$$k = \frac{2 \cdot V_{\text{joint}}}{V_{\text{base1}} + V_{\text{base2}}} = \frac{V_{\text{joint}}}{V_{\text{base}}} = \frac{R_{\text{joint}}}{R_{\text{base}}}. \quad (1)$$

A mérési eljárást a továbbiakban úgy valósítottam meg, hogy az azokból származó

eredmények megfeleljenek ezen alapelvek igényeinek. Ilyen módon, a fém próbatetek hegesztett és nem hegesztett szakaszainak elektromos ellenállását egy rögzített, 21 mm hosszúságú szakaszon, 4 pontos ellenállásmérés módszerrel mért elektromos ellenállások segítségével határoztam meg. A minták mindkét lapja acetonos tisztítási eljáráson ment keresztül a felszínen esetlegesen megmaradt zsírok és egyéb szerves szennyeződések eltávolítása végett, mielőtt a szondákat az elektromos mérésekhez elhelyeztem rajtuk. A lézerhegesztési eljárás során törekedtem arra, hogy minden egyes minta átfedő területének geometriai középpontjában legyen az adott varrat elhelyezve, jellemzően a mérőáram irányára merőlegesen. A négyponos elektromos mérésekhez az áramot egy külső tápegység szolgáltatta (TTi CPX200, a mérési folyamat során használt maximális 10 A-os áram esetében 1,1%-os pontossággal). A mérőáram a lemezek rövidebb oldalai mentén került bevezetésre a lemez teljes szélességében. Eközben a feszültségeket egy nagy pontosságú asztali multiméterrel (Keithley 2401, a kísérleteinkhez használt feszültségtartományban 0,1%-os mérési pontossággal) mértem. A különböző áramerősség értékek mellett mért feszültség pontokra egyenest illesztettem és így határoztam meg az adott mintadarabok ellenállását. Végül ezekből az ellenállás értékekből k faktorokat számoltam az (1) egyenlet segítségével.

3.3. A mechanikai tulajdonság mérése

Az átlapolott kötési geometriákban létrehozott kötéseket a fémlemezek és a kötés egymáshoz viszonyított relatív pozíciója szerint többféle módon lehetséges mechanikai szilárdság szempontjából jellemezni. A három leggyakoribb terhelés típus az 13. ábrán látható.



13. ábra: 3 féle mechanikai terhelési geometria

Mivel a kutatásaim akkumulátor cellák kötéseinek modellezésére és vizsgálatára irányultak, így legcélszerűbb egy a nyírás terheléshez kapcsolódó hibrid terheléstípus az úgynevezett szakító nyírószilárdság meghatározása volt.

Ezen okok miatt a lézerhegesztett kötések mechanikai szilárdságát a lézerhegesztett

fémlemezek közötti maximális szakító nyírószilárdsággal jellemeztem, amelyhez a szükséges erőket egy Tinius Olsen H5KT mechanikai tesztelő berendezéssel mértem ki. A szakító műszer vezérlése egy QMat XT nevezetű szoftverrel történt.

A szoftver beállítása során lehetőség volt megadni a terhelési tartományt egy 0N-tól 5000N-ig terjedő tartományban, egy maximális megnyúlás értéket, a húzás sebességét, valamint egy előterhelési értéket is. Ezeket valamennyi mérés során azonos értéken tartottam:

Settings (mérési paraméterek beállításai):

Load Range N (terhelési tartomány):	5000
Extension Range mm (maximális megnyúlás):	80
Speed mm/min (húzás sebessége)	5
Preload N (előterhelés)	0

A szakító nyírószilárdsági értékek meghatározásához szükséges varrat keresztmetszet értéket az acéllemezek egymás felé néző, szomszédos területeiről a kötések eltörése után digitális 3D optikai mikroszkópos felvételek segítségével határoztam meg. Az Olympus DSX510 típusú mikroszkóppal készített digitális 2D és 3D mikroszkópos felvételeket egy képfeldolgozó szoftver (ImageJ) segítségével elemeztem [56]. Egy, az elemző szoftverben feldolgozott képet a 14. ábra szemléltet.



14. ábra: A kötési keresztmetszet meghatározása ImageJ program segítségével a minta elszakítása után. A sárga vonal jelöli a határt.

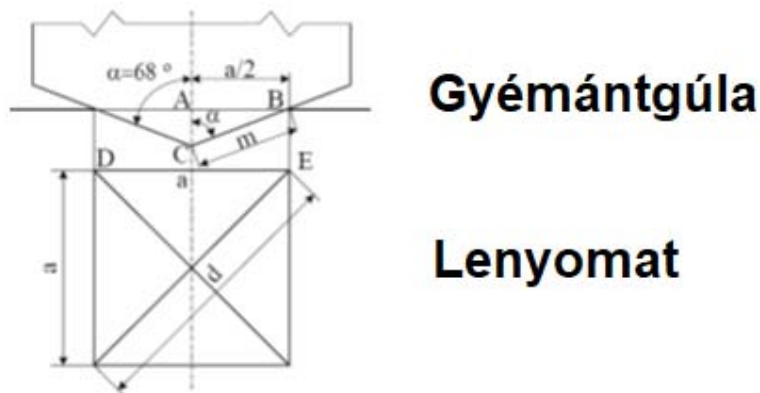
A kötési keresztmetszet értékeket egymástól függetlenül határoztam meg a fémlemezek mindkét, szemben lévő felületén (kötésenként 2 érték). Megállapítottam, hogy a lézerhegesztett varratok keresztmetszeti értékpárjai kevesebb mint 1%-kal különböztek a szemben lévő lemezekben. A szakító nyírószilárdság értékek kiszámításához a meghatározott maximális szakító nyíróerő értékét elosztottam a két keresztmetszet érték számtani átlagával.

3.4. A keménységmérés

A keménységvizsgálat a 20. század elején kifejlesztett módszer, amely sikeresen alkalmazható fémek képlékeny alakváltozásainak egyszerű, anyagtakarékos jellemzésére. Napjainkban a gyakorlatban legáltalánosabban az ún. szűrő keménységvizsgáló eljárásokat alkalmazzák. A Brinell-, Vickers- és Rockwell-féle keménységmérő eljárás során meghatározott alakú és méretű tárgyat meghatározott nagyságú, a mérendő területre merőleges erővel nyomnak a vizsgálandó anyagba. A keménységet a mérőfejre ható F terhelőerő és a mintában keletkezett lenyomat A területének hányadosaként definiáljuk [57,58].

Az említett keménység mérési eljárások közti eltérések alapvetően a szűrőszerszám geometriájából adódó különbségekben és az ebből fakadó terhelési különbségekben rejlik. Hegesztési varratok anyagvizsgálata esetén a legszélesebb körben a fent ismertetett három fő keménységmérési eljárás közül az úgynevezett Vickers keménységet szokás meghatározni.

A Vickers keménységmérés szűrőszerszáma egy olyan négyzet alapú egyenes gyémánt gúla, amelynek lapszöge $2\alpha=136^\circ$. A szűrőszerszám oldalnézetből és az általa hagyott lenyomat felülnézetből a 15. ábrán látható.



15. ábra: A Vickers féle keménységmérő szűrőszerszáma és a lenyomat

Az ábrán látható gyémánt gúla által hagyott lenyomat alapjának átlója d , oldaléle a hosszúságú. A gyémántgúla fél lapszöge $\alpha=68^\circ$, oldalának magassága pedig m amely egyszerű matematikai megfontolásokkal átszámítható az ABC háromszög segítségével a lenyomathoz tartozó geometriai adatokra.

A keménység általános definíciójából kiindulva, a Vickers-keménység kiszámítható az alábbiak szerint, a 15. ábra jelöléseinek felhasználásával:

$$(2) \quad HV = \frac{F}{A} = \frac{F}{4 \frac{am}{2}} = \frac{F}{4 \frac{a}{2} \frac{a}{2 \sin \alpha}} = \frac{F}{\frac{a^2}{\sin \alpha}} = 2 \sin \alpha \frac{F}{d^2} \approx 1,8544 \frac{F}{d^2}$$

A gyakorlatban azért nem a , hanem d értékével számolunk, mert a lenyomat oldalélek metszéspontja a határozottabban látszik, mint maga az oldal és így d pontosabban mérhető. Azért, hogy az anyag esetleges anizotrópiája a mérés eredményét nem befolyásolja, az egymásra merőleges d_1 és d_2 átlót mérjük és d -t ezek számtani közepeként számítjuk [59].

A vizsgálathoz a területet elő kell készíteni. A terület simaságának olyannak kell lennie, hogy a megmunkálási barázdák a leolvasás pontosságát ne rontsák.

A Vickers-féle keménységmérés sokkal vékonyabb anyagok esetén is használható, mint a Brinell keménységmérés. A vizsgált lemezvastagságot csupán az korlátozza, hogy a vizsgált réteg vastagságának nagyobbak kell lennie, mint a lenyomat átlójának másfélszerese. Az én méréseim esetében ez az arány 1:25-höz volt.

A Vickers-keménységmérés főbb előnyei:

- szűrőszerszáma gyémántból készül és így a legkeményebb anyagok vizsgálatára is alkalmas,
- a szerszám és az alkalmazott terhelés olyan kicsi, hogy alig észrevehető nyomot hagy, ezért segítségével akár kész tárgyak is vizsgálhatók, minimális károsodás mellett,
- a kis terhelés miatt nem töri át a vékonyabb rétegeket sem
- a lenyomat területe arányos az erővel és így az alkalmazott terhelés – bizonyos határok között – nem befolyásolhatja a mért keménységi értéket.

Ezen eljárás egyetlen hátránya a relatíve hosszú mérési idő, következésképpen tömeggyártásnál nem használható.

Vickers-féle mikrokeménység

Mikrokeménységmérési eljárásoknál az anyagokból erre a célra készített csiszolatokon vagy mintadarabokon, az anyag szövetszerkezetének, összetevőinek, vagy egyes fázisainak keménységértékeit határozhatjuk meg.

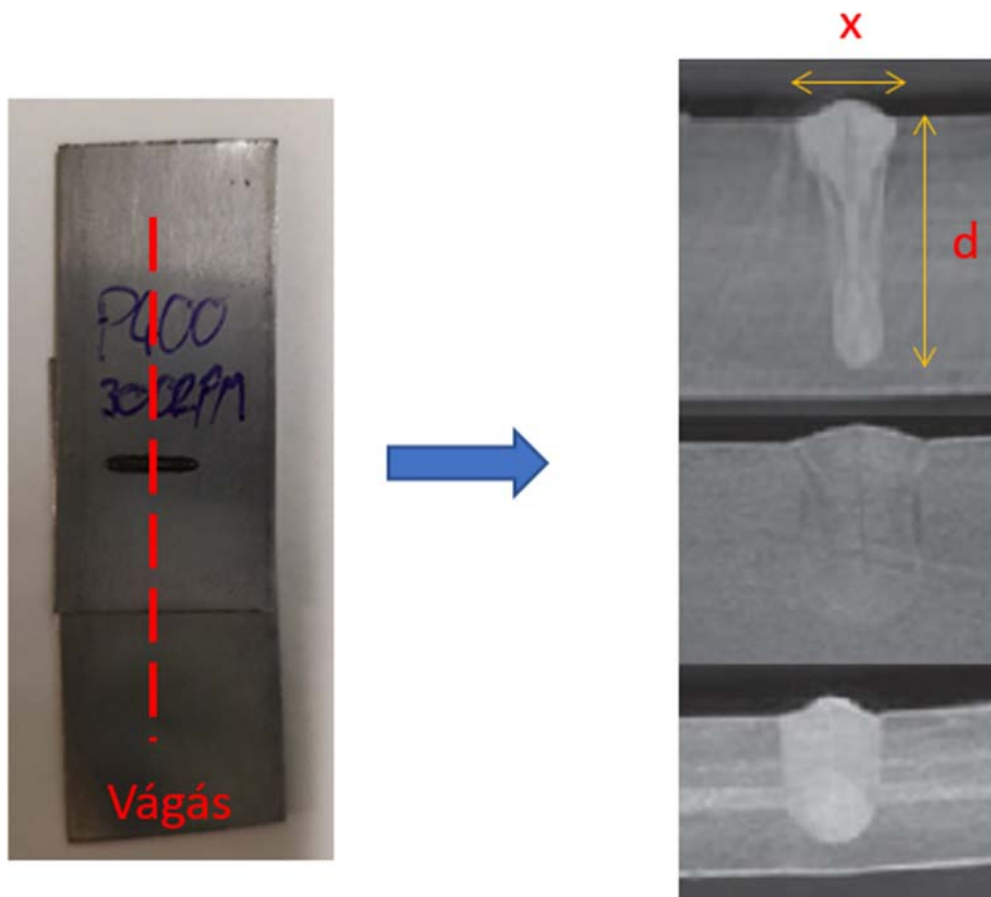
A mikrokeménységmérő műszer egy mérőmikroszkóp. A Vickers-gyémántot az objektív külső lencséjének közepére, vagy az objektív acél foglalatára rögzítik. A lenyomatátlókat az okulárba beépített mérőskála segítségével határozhatjuk meg. A mérés úgy történik, hogy a kiválasztott szemcsét a tárgyasztal mozgásával az objektív szál-keresztjébe állítják (szükség szerint átváltanak a gyémántra), majd az élesre állító csavart a választott terhelésnek megfelelő skálaosztásig csavarva, a gyémántcsúcsot belenyomják a szemcsébe. A lenyomat átlóit a terhelés megszüntetése után lemérik, majd kalibrálási görbe használatával meghatározzák a mért átlóhoz tartozó keménységértékeket.

A mikrokeménység rendszerint terhelésfüggő. A mikrokeménység mérés erőssége az összehasonlító keménységmérés, ezért sikerrel alkalmazzák olyan anyagi változás valamennyi folyamata esetén, ahol igen kis keménységváltozásokat kell igen kicsiny mérettartományokban kimutatni [60,61].

3.5. Csiszolatok készítése

Egy másik széleskörben alkalmazott anyagszerkezet vizsgálati eljárás a csiszolatok készítése a minta szövetszerkezetének vizsgálatára. Ennél a roncsolásos vizsgálatnál először a mintákat műgyantába ágyazzák, elvágják, az elmetszett területeket felpolírozzák majd az anyag minőségétől és a vizsgálat céljától függő savval megmarják. A maratás hatására mikroszkóp alatt láthatóvá válnak az egyek fázisok és a szemcsehatárok a felszínen.

Egy példát csiszolat mintára az 16. ábrán mutatok be. A hegesztett mintát gyantába ágyazás után a piros szaggatott vonal mentén elvágva, felpolírozva és a megfelelő módon megmaratva láthatóvá válik akár a varrat mélysége (d) és szélessége (x) is az anyag belsejében.

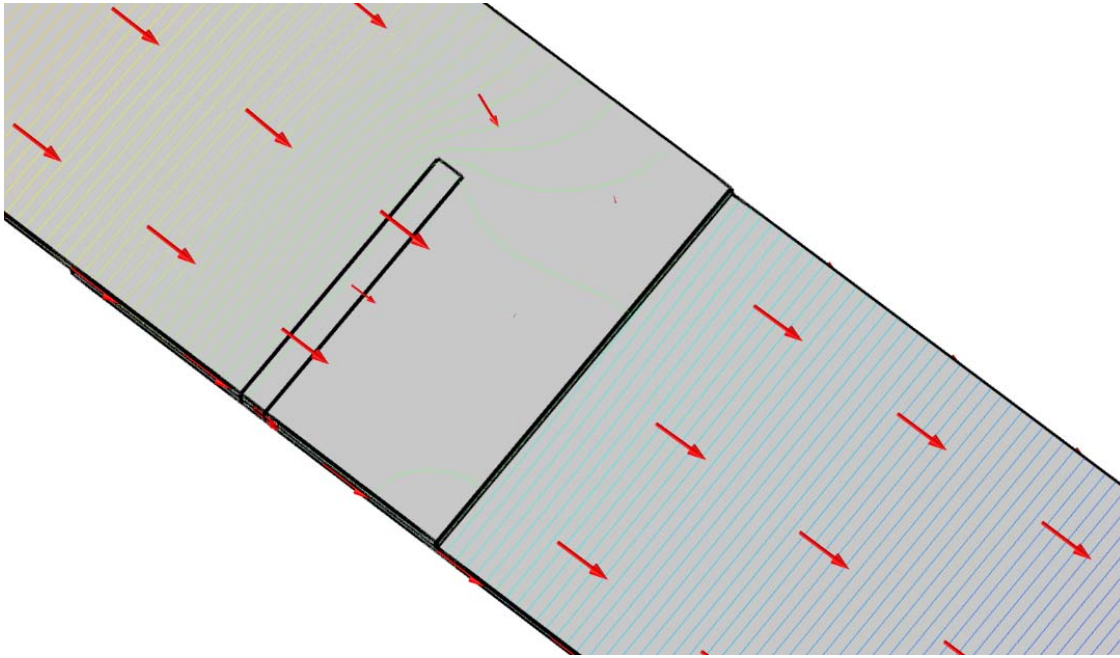


16. ábra: Csiszolat minta

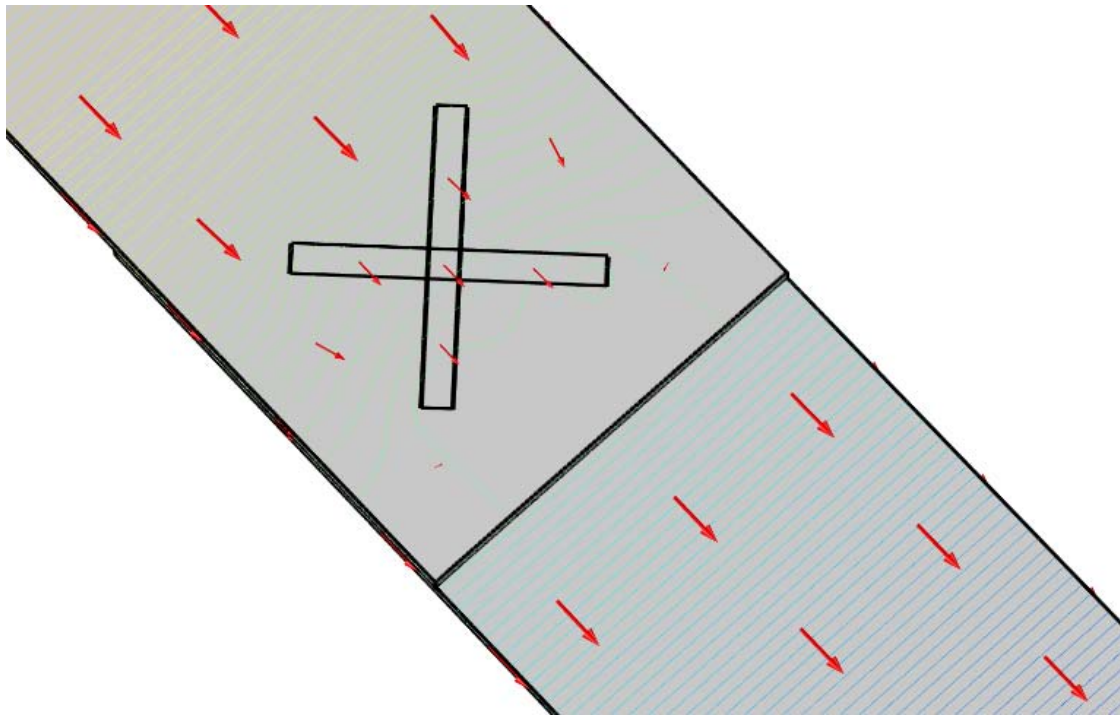
Ezen kísérleteim során elsősorban a behatolási mélység vizsgálatának érdekében több alkalommal támaszkodtam a Dunaújvárosi Egyetem, Természettudományi és Környezetvédelmi Intézete által készített csiszolatok eredményeire.

3.6. COMSOL modellezés

Kísérleteim során, elsősorban a lézeres hegesztések elektromos viselkedésének feltérképezése és megértése érdekében a különböző szimmetrikus/aszimmetrikus (17. ábra) és komplex geometriával (18. ábra) rendelkező hegesztések elektromos viselkedését szimuláltam COMSOL Multiphysics szoftver segítségével [62]. A modellezések során vizsgáltam az elektromos áramvonalak viselkedését, a kialakuló áramsűrűség eloszlásokat, illetve az ekvipotenciális felületek elhelyezkedését és alakját.



17. ábra: Egy aszimmetrikus varrat esetén modellezett ekvipotenciális vonalak

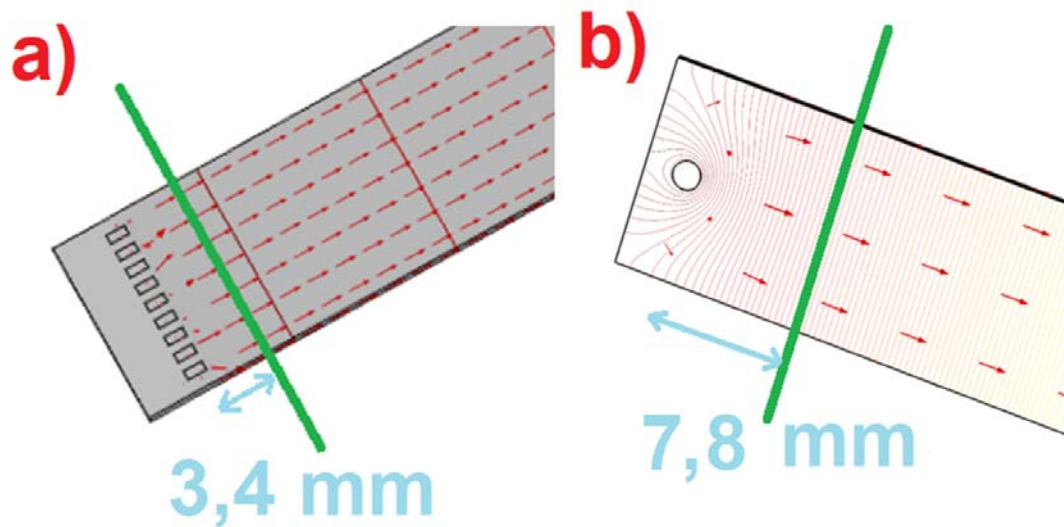


18. ábra: Egy X alakú varrat esetén modellezett ekvipotenciális vonalak

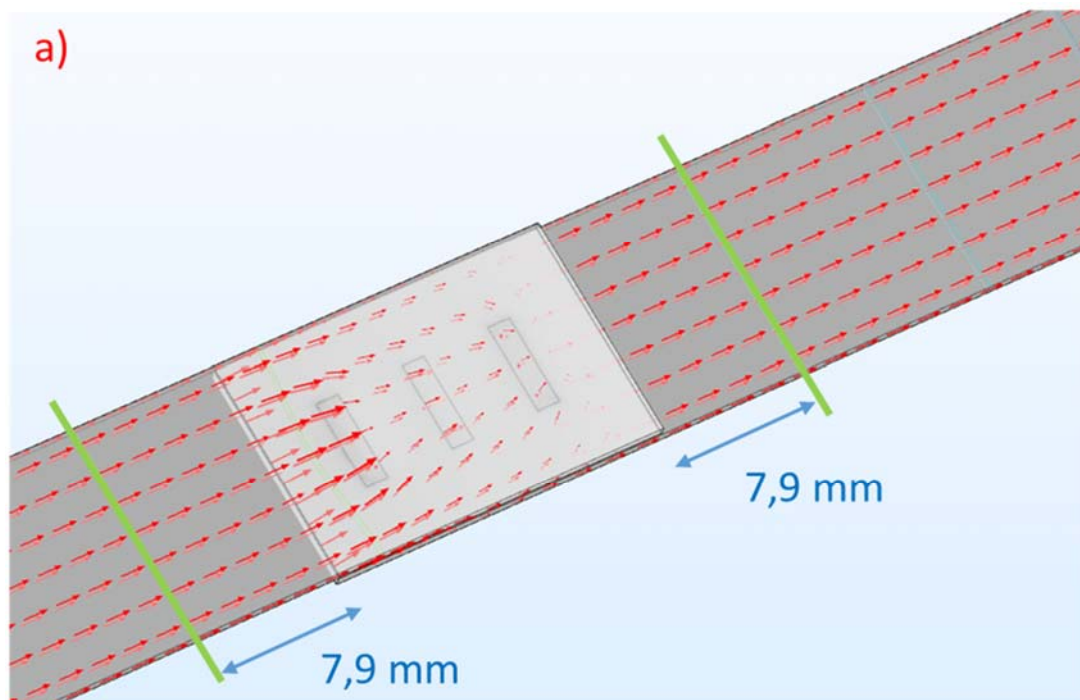
Az ekvipotenciális felületek elhelyezkedésének vizsgálata különösen fontos szerepet töltött be a négyponos ellenállás mérési eljárás során a mérőtűk pozíciójának megválasztásához. Ugyanis amennyiben azok egy inhomogén elektromos térben kerülnek elhelyezésre úgy azoknak az áram irányára merőleges irányú elmozdulása jelentős hatást gyakorol a mért feszültség értékekre, amely nem az általam keresett feszültség esés értéket fogja adni. Ebből adódóan szükséges volt meghatározni azt a minimális távolságot, amellyel el kell

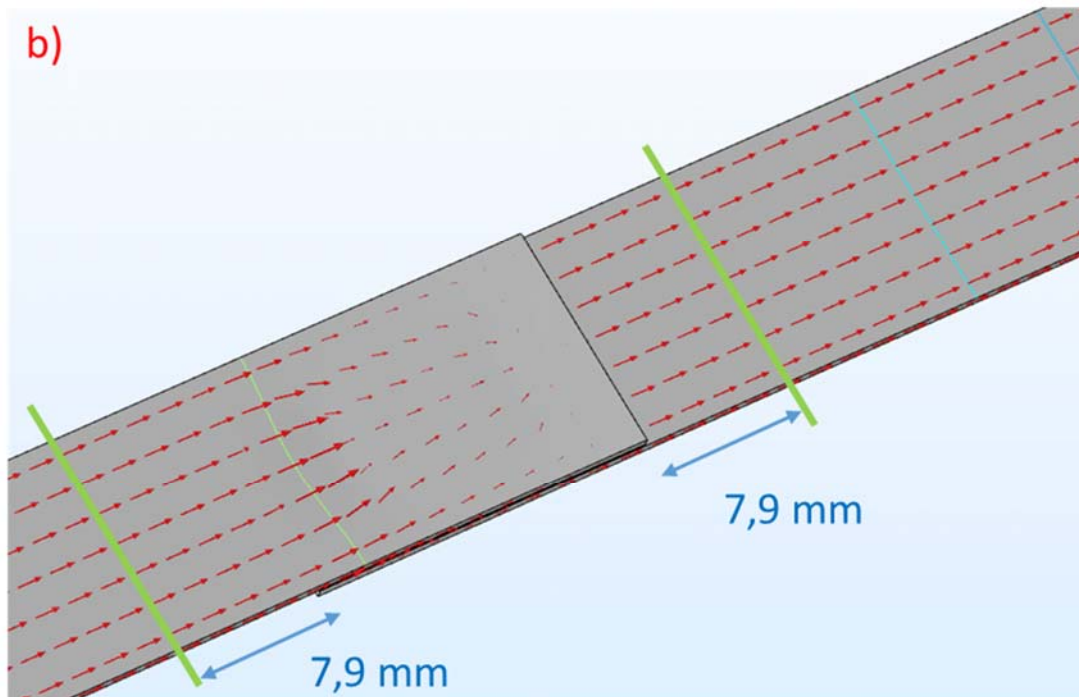
távolodni a kötési területtől, illetve az áram becsatolási pontoktól, hogy a mérési eredmény homogén térre vonatkozzon.

Ilyen módon a szimulációk segítségével vizsgálni tudtam a különböző árambecsatolási lehetőségek hatását a kialakuló elektromos térre, valamint ugyancsak lehetőségem volt meghatározni azt a minimális távolságot, amellyel eltávolodva az áram becsatolástól (illetve kötési területtől) az áramsűrűség eloszlás inhomogenitása az áram irányára merőleges síkban 1% alá került. A különböző becsatolások hatására kialakuló terek az 19. ábrán láthatóak.



19. ábra: A krokodil csipeszes becsatolás (a) és csavaros becsatolás (b) típusok modellezése





20. ábra: A kötések környezetében kialakuló inhomogenitások átlátszó kötési kerülettel (a) és nem átlátszó kötési területtel (b)

Látható, hogy a hosszanti irányú krokodilcsipesszel történő becsatolás esetében az a minimális távolság, amely után jó közelítéssel homogénnek tekinthető az elektromos tér számottevően (közel 5 mm-el) rövidebb, mint az egy pontban történő csavaros árambecsatolás esetén.

Ezen felül a 20. ábrán megfigyelhető, hogy az igen kiterjedt méretű kötések esetén az átfedő terület számottevő környezetében számolni kell a kialakuló elektromos tér inhomogenitásával is a mérések elvégzése során. Ennek megfelelően a négyponos ellenállásmérések során a mérőpontok pozícióját olyan módon választottam meg, hogy azok mindegyike homogén területre essen.

II. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

4. A LÉZERES HEGESZTÉSI VARRAT ÉS KÖRNYEZETÉNEK VIZSGÁLATA

4.1. A lézeres hegesztés szerkezeti vizsgálata

A hegesztési varratok osztályozását akkumulátortechnológiai szempontból elsősorban funkcionálisan szokás vizsgálni, jellemzően annak valamilyen mechanikai vagy elektromos paraméterein keresztül. Ugyanakkor gyakran lényeges szempont lehet a varrat szerkezeti (strukturális) vizsgálata is. Ezen szerkezeti tulajdonságok ugyanis közvetve vagy akár közvetlenül is befolyásolhatják a korábban említett makroszkopikus funkcionális tulajdonságokat.

A strukturális vizsgálatok csoportjába tartoznak a különböző anyag és szövetszerkezeti vizsgálatok, összetétel elemzések és az egyéb fém kristálytani vizsgálatok.

Vizsgálataim során ugyan széleskörűen nem alkalmaztam ilyen jellegű szerkezeti vizsgálati módszereket ugyanakkor esszenciálisnak tartottam ezen mérések tárgyalását legalább leíró szinten megtenni.

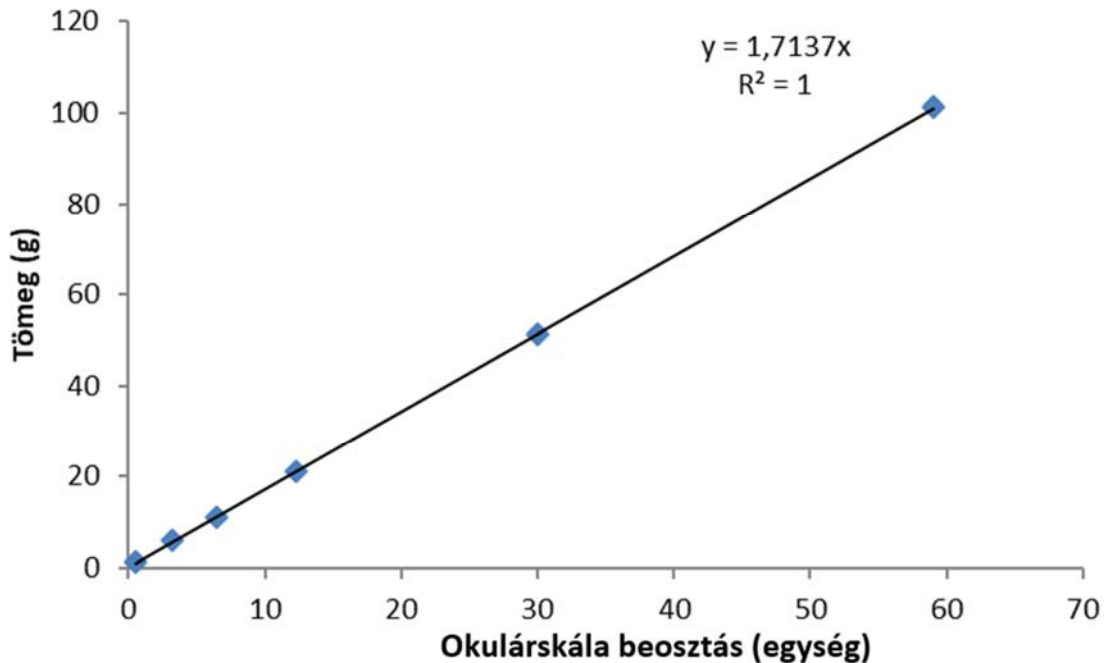
A következő fejezetekben bemutatom két, a gyakorlatban széleskörűen alkalmazott, szerkezeti vizsgálatai módszerrel elért eredményeimet és tapasztalataimat a vékony fémlemezekben átlapolt kötési geometriában lézerrel kialakított hegesztési varratokra vonatkozóan.

4.2. Vickers-féle mikrokeménységmérés

A mikrokeménységmérési vizsgálataim során egy Reichert mikrokeménységmérő mikroszkópot alkalmaztam bizonyos hegesztési varratok felszínének 1 dimenzióban történő keménység változásának meghatározására.

Az objektívvel egybe épített szűrőszerszám egy belső erőmérő skálával van ellátva. Annak érdekében, hogy pontosan meg tudjuk határozni azt a terhelő erőt, amellyel a szűrőszerszámot a minta felszínébe nyomjuk majd a tényleges mérések során, ennek a skálának a kalibrációja szükséges. A kalibrációt súlyszorozat alkalmazásával lehet kivitelezni, olyan módon, hogy a különböző ismert tömegű súlyokat a szűrőszerszám foglalatára helyezük és leolvassuk, hogy ez az ismert terhelő erő hány skálabeosztásnak felel meg. A mérést több terhelő erő esetén és többször elvégezve, majd a kapott pontokra origón átmenő egyenest illesztve kaphatjuk meg a kalibrációs görbét. Én a kalibrációs görbét 6 különböző súllyal 3 mérési sorozat alkalmazásával határoztam meg.

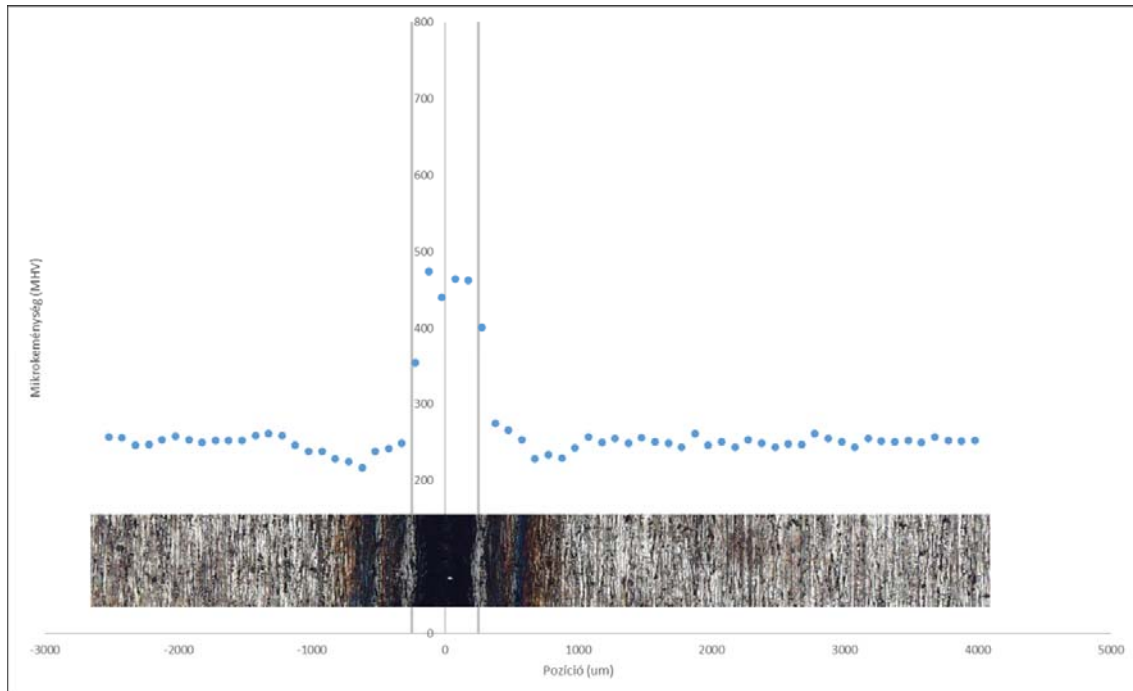
A szűrőszerszám általam meghatározott terhelés kalibrációját az 21. ábra mutatja.



21. ábra: Mikrokeménységmérő mikroszkóp okulárskála kalibráció

A kalibrációs görbe alapján meghatározott terhelő erővel készített lenyomatokat a minta felszínén a nagyobb pontosság és rövidebb mérési idő érdekében egy Olympus DSX510 típusú digitális 3D mikroszkóp segítségével analizáltam és határoztam meg a lenyomatok oldalhosszúságait. Majd ezekből az adatokból Vickers féle mikrokeménység értékeket számoltam.

A különböző hegesztési körülmények között készített varratokon, azok közvetlen környezetében (ott, ahol a lejátszódó kémiai folyamatok miatt a lemez felszíne elszíneződött) és az ettől távolabb eső lemezterületeken mikrokeménységeket mértem egy a varratra merőleges egyenes mentén (22. ábra). A mért mikrokeménységi adatok alapján meghatároztam az egyes hőterhelt zónák méretét, meghatároztam ezen méretek kapcsolatát az elszíneződött területek és a varratok szélességével.



22. ábra: Egy lézeres hegesztési varratra merőleges irányban különböző pozíciókban mért mikrokeménység értékek (a szürke függőleges vonalak jelölik a varrat szélességét).

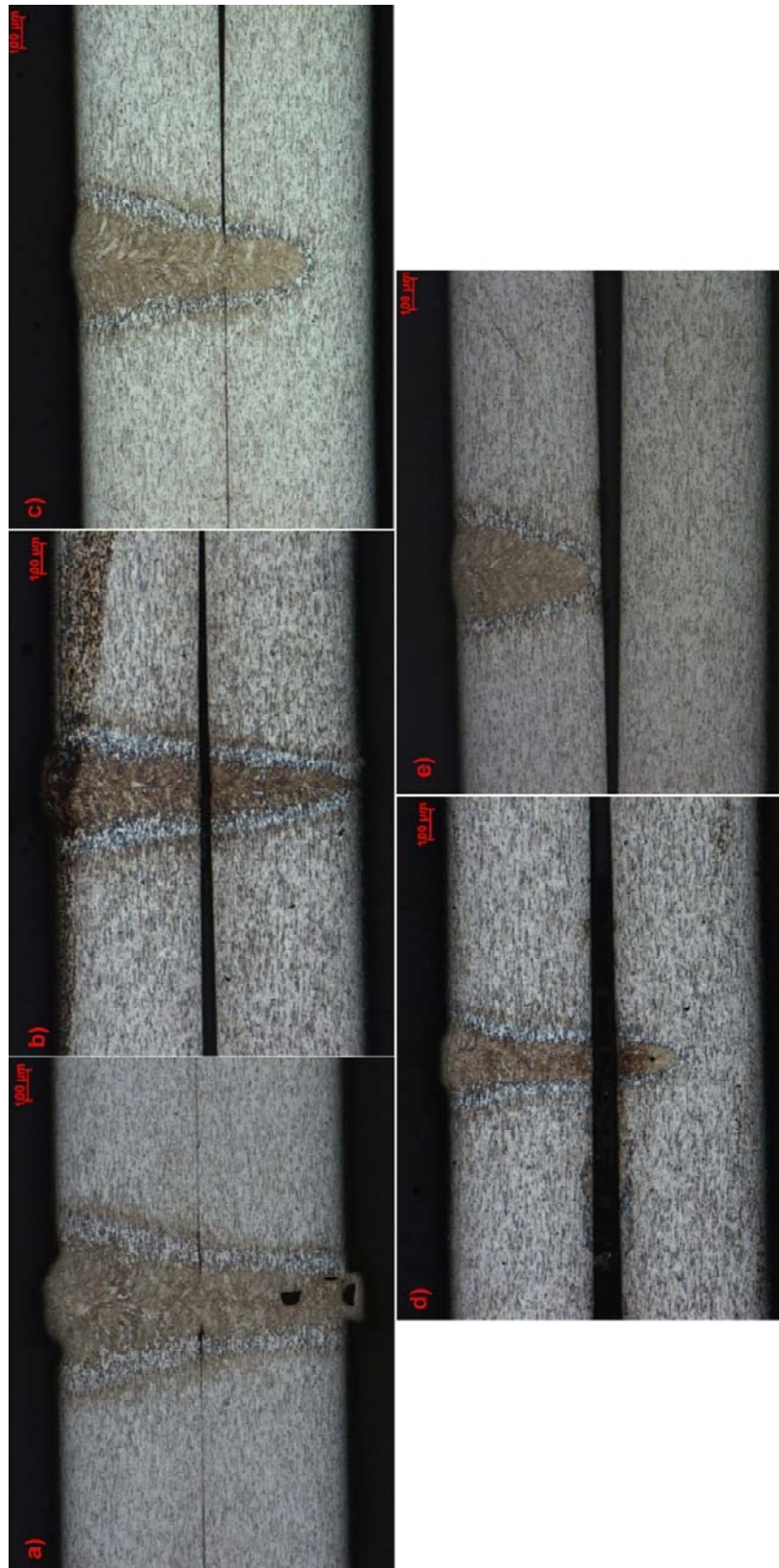
Az ábrán látható módon a varrat tényleges szélességénél, mint egy 4x nagyobb szélességben tapasztalható a varrat környezetének fellágyulása a hőkezelés hatására. Ez a fellágyulás az elszíneződött terület méretével jól korrelál.

A technika inherens tulajdonsága miatt, azaz mivel az egyes minták teljeskörű mérése rendkívül sok időt vett igénybe és közvetlenül nem járult hozzá az elektromos illetve mechanikai tulajdonság meghatározására így nem került alkalmazásra.

4.3. Csiszolatok

Az 23. ábrán bemutatok néhány csiszolatot, amelyek különböző folyamat paraméterekkel készített 0,5mm vastagságú hidegen hengerelt DC01 acélból készültek.

Az ábrákon látható csiszolatokhoz tartozó minták mind 360W beeső lézerteljesítmény mellett készültek különböző sebességeken.



23. ábra: 360W beeső lézerteljesítmény esetén készített csiszolatok (az előtolási sebességek a-tól e-ig rendre: 10, 40, 75, 200 és 300 mm/s)

A csiszolatok eredménye alapján egyértelműen látható a mélyvarratos hegesztésekre jellemző „kulcslyuk” alakú, az olvadás hatására bekövetkezett szövetszerkezeti változás. Ezen felül egyértelműen látható a hegesztési sebesség növekedésének függvényében a fokozatosan csökkenő behatolási mélység, amely a legutolsó minta esetében már olyan alacsony értékű, hogy nem haladja meg a lemeztvastagságot, és ami a lemezpár lézeres kötését is megghiúsítja

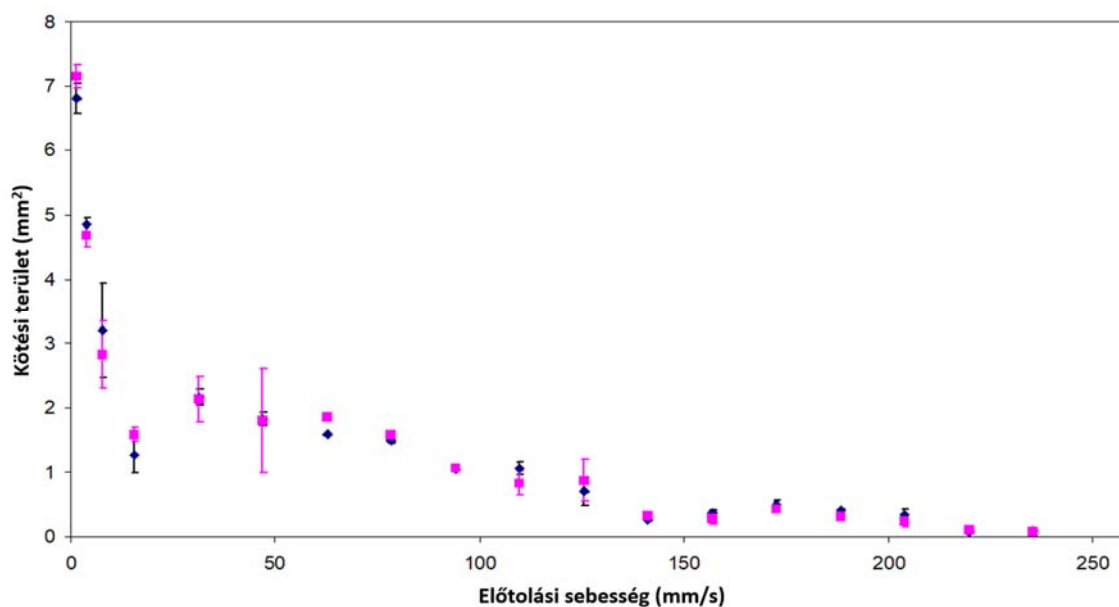
Hosszútávon mivel ez a technika rendkívül nagy szakértelmet és a csiszolatok elkészítése különösen sok időt igényelt, valamint közvetlenül nem járult hozzá az elektromos és mechanikai vizsgálatimhoz, (a mikrokeménységmérési eljáráshoz hasonlóan) széleskörűen nem alkalmaztam.

5. A VARRATMORFOLÓGIA ÉS ANNAK HATÁSA AZ ELEKTROMOS ÉS MECHANIKAI VISELKEDÉSRE

5.1. A lézerparaméterek hatása az elektromos és mechanikai viselkedésre

Kísérleteim során elsősorban a lézeres paraméterek változtatásán keresztül szabályozott kötési terület nagyságának a kötések elektromos és mechanikai jellemzőire gyakorolt hatását vizsgáltam. A lézeres hegesztések kötési területek méretének változtatásának egyik kézenfekvő módja, ha egy rögzített lézerteljesítmény esetén (360W) a hegesztési sebesség értékeit módosítjuk [63,64].

A két paraméter közötti összefüggés tárgyalásának elősegítése érdekében a 24. ábrán a kötések területét a hegesztési sebesség függvényében ábrázoltam.



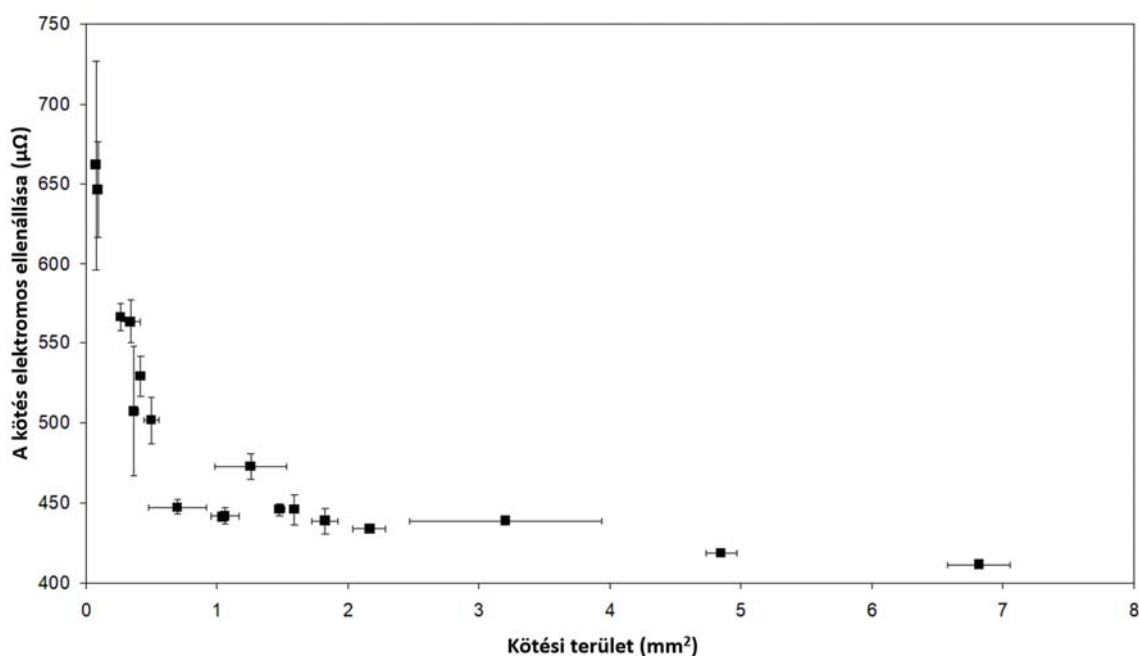
24. ábra: A kötési keresztmetszet az előtolási sebesség függvényében (1071 nm hullámhossz, 360 W teljesítmény, nem polarizált nyaláb, 0,6 mm foltméret, 0,5 mm vastag DC01 acéllemezek)

Az ábra három független mérési sorozat eredményeit mutatja. Az ábrán ábrázolt kötési területértékeket a két hegesztendő fémlemez egymással szemben lévő területén határoztam meg.

A rombusz szimbólumok a beeső lézersugárhoz közelebbi területen lévő területet, míg a négyzet alakú szimbólumok az alsó ellenoldalon lévő területeket jelölik. Megállapítható, hogy ez a két területérték csak kis mértékben (kevesebb mint 1%-kal) tér el egymástól, ami a felső és az alsó lemez közötti hatékony energiaátadást bizonyítja. Ezért a következő tárgyalás során és a későbbi szakító nyírószilárdsági számításoknál a kötési területeket e két érték átlagának tekintetem.

Körülbelül 25 mm/s sebességig a kötési terület mérete meredeken csökken a hegesztési sebesség növekedésével. E hegesztési sebességküszöbérték túllépésekor a korábban megfigyelt tendencia folytatódik, miközben a csökkenés mértéke jelentősen csökken. Körülbelül 140 mm/s előtolási sebességnél egy újabb töréspont figyelhető meg, amely után a kötési terület csak kis mértékben változik, és közelít a nullához.

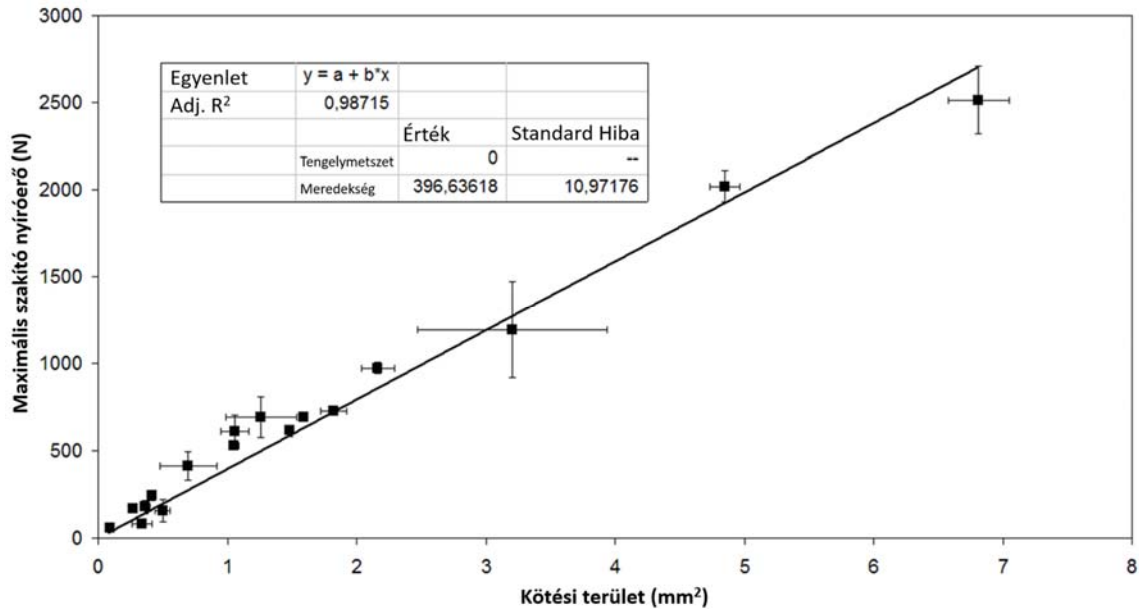
Az 25. ábrán az elektromos ellenállás függése látható a kötési terület függvényében. Mind az ellenállás, mind a kötési terület értéke három mérés átlaga.



25. ábra: Az elektromos ellenállás a kötési keresztmetszet függvényében (1071 nm hullámhossz, 360 W teljesítmény, nem polarizált nyaláb, 0,6 mm foltméret, 0,5 mm vastag DC01 acéllemezek)

Ha a kötési terület viszonylag kicsi, a lézerhegesztett minták elektromos ellenállása meglehetősen magas, és a reprodukálhatóság gyenge. Az elektromos ellenállás a kötési terület növekedésével a 0,07-0,50 mm²-es tartományban meredeken csökken, amíg körülbelül 0,5 mm² értéknél el nem éri a küszöbértéket. Ezt a küszöbértéket meghaladva az kötések elektromos ellenállása tovább csökken a kötési terület növekedésével, de jelentősen lassuló ütemben. A lézerhegesztett kötések ellenállása közelít a nem hegesztett anyag alapellenállásához (400,1±4,8) µΩ.

A mért maximális szakító nyíróerő értékeket a kötési terület függvényében megadó 26. ábráról leolvasható, hogy ebben az ábrázolásban a maximális szakító nyíróerő a kötési terület lineáris függvénye.



26. ábra: A maximális szakító nyíróerő a kötési keresztmetszet függvényében és a rá illesztett origón átmenő egyenes (1071 nm hullámhossz, 360 W teljesítmény, nem polarizált nyaláb, 0,6 mm foltméret, 0,5 mm vastag DC01 acéllemezek)

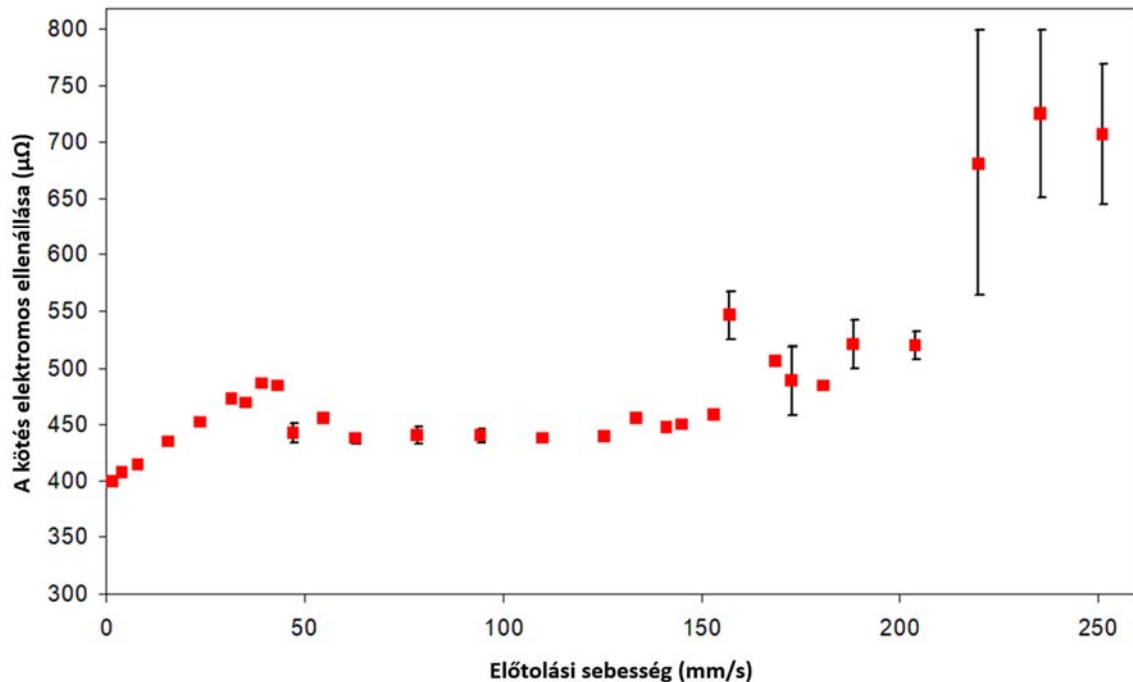
Ezen felül, az illesztett egyenes meredeksége $396,64 \pm 10,97$ MPa, ami jól megfelel a DC01 acél névleges szakítószilárdságának (a beszállító mérései szerint kb. 400 MPa).

A hegesztési varratok elektromos és mechanikai viselkedését a kötési terület függvényében megadó eredmények azt mutatják, hogy az elektromos tulajdonság megfelelő reprodukálhatóságának eléréséhez el kell érni egy küszöbértéket a kötési területre vonatkozóan. A kötési terület további növelése nem eredményezi sem a kötés ellenállásának jelentős csökkenését sem a reprodukálhatóság számottevő növekedését. Az eredmények továbbá azt is mutatják, hogy a lézerhegesztett próbatestek szakító nyírószilárdsága általában megfelelően jellemezhető a kötési terület méretén keresztül, mivel a kötés által elviselhető maximális nyíróerő a kötési terület lineáris függvénye, és a szilárdságot ezen méréseim alapján az alap fém mechanikai tulajdonsága korlátozza.

Az elektromos és mechanikai tulajdonságok együttes figyelembevételével az 1 mm^2 körüli kötési terület már elegendően jó az akkumulátorhegesztési alkalmazásokhoz, azzal a megszorítással, hogy bár a kötési terület további növelése javulást eredményez a varrat mechanikai és elektromos tulajdonságaiban, a nagyobb területű varrat létrehozásához szükséges alacsonyabb hegesztési sebesség és/vagy nagyobb lézer teljesítmény a hőterhelés növelésével a céltárgy károsodásához vezethet.

A folyamat optimalizálásának segítése, azaz annak az optimális hegesztési sebességintervallumnak a megtalálása érdekében, amelyben mind a hegesztés elektromos, mind a mechanikai viselkedése kellően stabil (az átlagos $\pm 10\%$ jónak tekinthető a műszaki alkalmazásokban), a mérési eredményeket az előtolási sebesség függvényében ábrázoltam újra.

A 27. ábrán a próbatestek elektromos ellenállását ábrázoltam az előtolási sebesség függvényében. Minden pont három független mérési sorozat átlagát jelenti. A függőleges fekete sávok az egyes pontok standard eltérésekből számított egyedi hibáit (97%-os megbízhatósági szint) jelölik.



27. ábra: A lézerhegesztett minták ellenállásának előtolási sebesség függése (1071 nm hullámhossz, 360 W teljesítmény, nem polarizált nyaláb, 0,6 mm foltméret, 0,5 mm vastag DC01 acéllemezek)

A nagyon alacsony előtolási sebességgel (25 mm/s alatt) végzett hegesztés nagy hőbehatás zónát (HAZ) eredményez a varrat körül, és a legtöbb esetben fellágyítja és károsítja azt: lyukak vagy vágások is kialakulhatnak, ezért az ilyen sebességek használata kerülendő akkumulátorhegesztési alkalmazásoknál. Az ilyen viszonylag alacsony sebességgel készült hegesztési varratok vizuális megjelenése nagyon szabálytalan, és számos olvadék fröccsenéses képződmény figyelhető meg a felszínén. Ugyanakkor az ebben a lassú előtolási sebességtartományban készült kötések elektromos ellenállása a legalacsonyabb, amely meglepően jó reprodukálhatósággal párosul.

Körülbelül 50 mm/s-tól egészen 150 mm/s hegesztési sebességig az elektromos ellenállás viszonylag alacsony, állandó szinten marad ($438,8 \pm 3,4$) $\mu\Omega$, kiváló reprodukálhatósággal (kevesebb mint 1%-os hiba). A hőbterhelt zóna területe ezeknél a sebességeknél lényegesen kisebb, mint az első (lassú sebességű) tartományban volt. A hegesztési varrat szabályosabbá és a varrat mentén homogénné válik, és a célterület nem mutatja látható hegesztési hibák vagy sérülések jeleit.

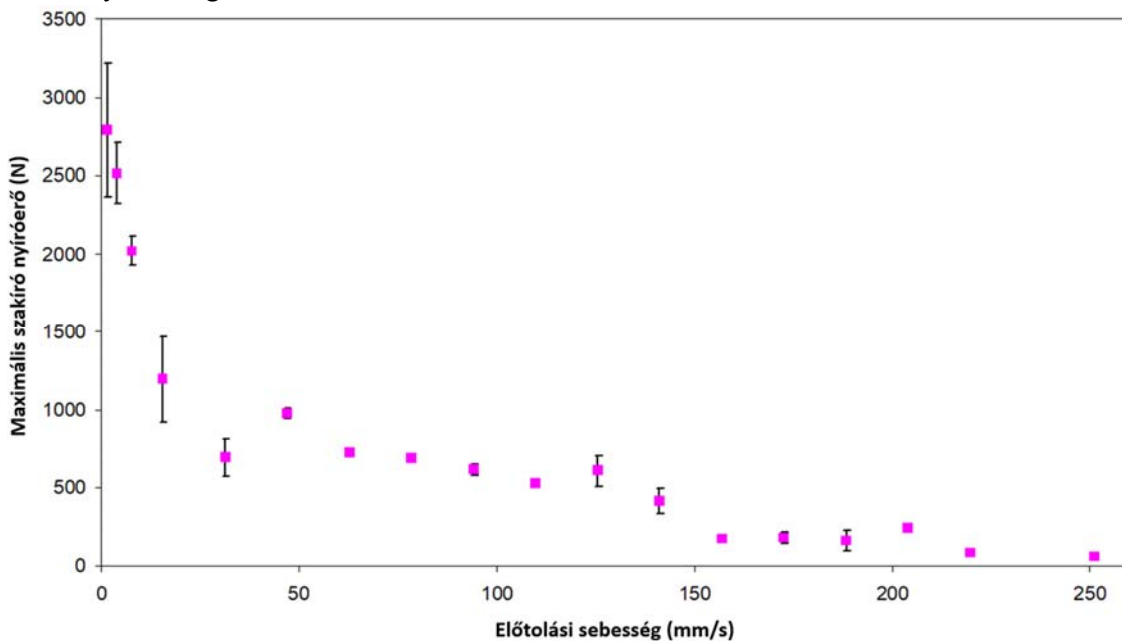
A legnagyobb általam vizsgált hegesztési sebességeknél, azaz 200 mm/s felett az elektromos ellenállás értékei jelentősen megnőnek, miközben a reprodukálhatóság drasztikusan csökken, ami ezt a régiót nem teszi alkalmassá az akkumulátoros kötési alkalmazásokhoz. A minél magasabb hegesztési sebességgel való megmunkálás a gyakorlatban ugyanakkor kulcsfontosságú és elengedhetetlen, mivel nagy sebességeknél a hegesztési folyamat termelékenysége jelentős mértékben nő, és a lehető legkevesebb hő jut a célterületbe, így a Li-ion akkumulátorcellában lévő alapfém és az esetleges vegyi anyagok minimális termikus károsodást szenvednek.

Ezen kísérleteim alapján kizárólag elektromos és hőterhelési szempontokat szemelöltő tartva a 140-150 mm/s előtolási sebesség tartomány bizonyult a legideálisabbnak

akkumulátorhegesztési szempontból.

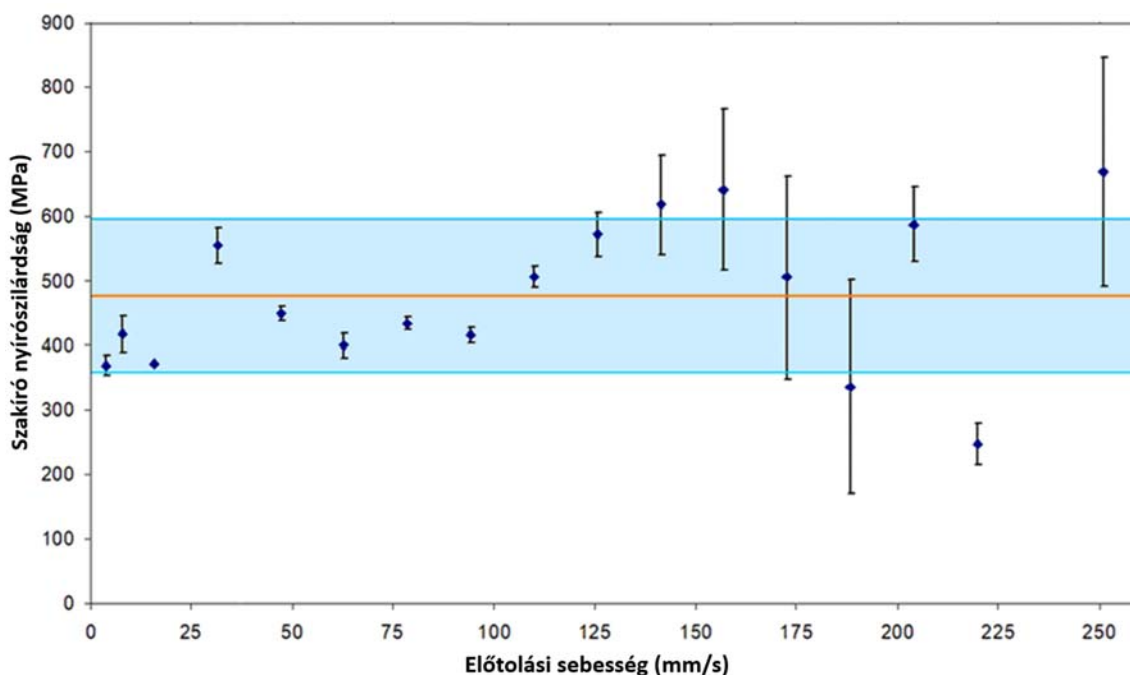
Annak érdekében, hogy a fenti eredményeket perspektívába helyezzem, a mért ellenállás eredményeket összehasonlítottam mind az azonos geometriájú, hegesztetlen DC01 fémlapok elektromos alap ellenállásával, mind pedig ugyanezen kiindulási mintákból hagyományos ipari ponthegesztőgéppel hegesztett minták ellenállásával. Az alap DC01 fémlapok (ezek a minták pontosan ugyanolyan geometriájúak és anyagjellemzőkkel rendelkeztek, mint a hegesztett minták) átlagos elektromos ellenállása $(400,1 \pm 4,8) \mu\Omega$, ami alig valamivel alacsonyabb, mint azon lézerhegesztett kötéseké, amelyek a legalacsonyabb ellenállással rendelkeznek. Ami a hagyományos ponthegesztési eljárást illeti, az előre meghatározott folyamatparaméterekkel (amelyeket a hegesztési szakértők optimálisnak tartottak erre a fémkombinációra, vastagságra és geometriára) készített ponthegesztett kötések meglehetősen alacsony reprodukálhatóságúaknak bizonyultak, összességében $(456,3 \pm 16,2) \mu\Omega$ ellenállást eredményeztek, ami azt mutatja, hogy az átlag körülbelül 7%-kal magasabb, mint az optimális lézerhegesztési sebesség paraméterekben elért ellenállásérték.

Az elektromos vizsgálatokkal analóg módon a hegesztés mechanikai tulajdonságát is ábrázoltam az előtolási sebességek függvényében. Az eredményeket a 28. és 29. ábra mutatja a szakító nyíró vizsgálatokra vonatkozóan.



28. ábra: A lézerhegesztett minták maximális szakító nyíróerejének előtolási sebesség függése (1071 nm hullámhossz, 360 W teljesítmény, nem polarizált nyaláb, 0,6 mm foltméret, 0,5 mm vastag DC01 acéllemezek)

A maximális szakító nyíróerő előtolási sebességtől való függése majdnem azonos az kötési terület sebességfüggésével (24. ábra). Ez összhangban van a kötési terület ábrázolásából kapott következtetésekkel, nevezetesen, hogy a maximális szakító nyíróerő a kötési terület lineáris függvénye.



29. ábra: A lézerhegesztett minták szakító nyírószilárdságának előtolási sebesség függése (1071 nm hullámhossz, 360 W teljesítmény, nem polarizált nyaláb, 0,6 mm foltméret, 0,5 mm vastag DC01 acéllemezek)

A szakító nyírószilárdság tekintetében a vizsgált hegesztési sebességtartományban nem lehetett egyértelmű, nagyobb sebességtartományokra kiterjedő tendenciákat megfigyelni. Amint azt a 29. ábra mutatja, a próbatetek mért szakító nyírószilárdsága egy viszonylag széles tartományban, 300 és 700 MPa között szór egy 480 MPa körüli átlagérték körül.

Megfigyelhető, hogy az 50 mm/s és 100 mm/s sebesség között változó hegesztési sebességgel készült minták mechanikai szilárdsága rendkívül kis eltérést mutat, kiváló reprodukálhatóság és mérsékelt átlagos mechanikai szilárdság mellett. Ennek az optimális hegesztési sebességintervallumnak a szélessége lényegesen kisebb, mint az elektromos ellenállás esetében, de még mindig bőven képes biztosítani a gyakorlatban jellemzően elvárt $\pm 10\%$ -os ingadozási tűréshatárt. A nagy sebességtartományhoz közeledve a szakító nyírószilárdság átlagértékének növekedését fokozatosan romló reprodukálhatóság kíséri. Az elektromos tulajdonság vizsgálata során megállapított megfontolásokhoz hasonlóan a nagy hegesztési sebességgel való munkavégzés gyakorlati szempontból kívánatos, de a reprodukálható mechanikai tulajdonság szempontjából ebben az esetben sem bizonyul célszerűnek az akkumulátorpakk-kötési alkalmazásokhoz.

Az itt kapott szakító nyírószilárdsági értékeket szintén a DC01 acél és hagyományos ponthegeztőgéppel hegesztett minták névleges szakító nyírószilárdságával hasonlítottam össze. Mivel a DC01 alapfém átlagos névleges szakítószilárdsága körülbelül 400 MPa, elmondható, hogy a legtöbb esetben a lézerhegesztett kötések mechanikai minőségükben igen jónak tekinthetők. A lézer- és a hagyományos ponthegeztett minták mechanikai tulajdonságának összehasonlítása alapján - az utóbbi $369,8 \pm 66,2$ MPa szakító nyírószilárdsággal rendelkezik - megállapítható, hogy a lézerrel hegesztett minták mintegy 20%-kal nagyobb szakító nyírószilárdságot és sokkal jobb reprodukálhatóságot mutatnak.

A lézerhegesztési eljárás sebességre optimalizálása azt jelenti, hogy meg kell határozni egy olyan hegesztési sebesség paraméterablakot, amelyben az elektromos és mechanikai tulajdonságnak együttesen, egyidejűleg kell megfelelniük az előre rögzített műszaki feltételeknek. Kísérleteim alapján 0,5mm vastagságú DC01 acélok esetén 360W konstans beeső lézerteljesítmény esetén az optimális lézer előtölési sebesség 50 mm/s és 100 mm/s között van. Ebben a viszonylag széles sebességablakban (a vizsgált rendszerben) kiemelkedően jó mechanikai és elektromos tulajdonsággal rendelkező lézeres hegesztések állíthatóak elő elfogadható szintű reprodukálhatóság mellett [T1].

Mindent egybe véve ezen kísérleteim eredményei azt mutatták, hogy a lézer nyaláb szkennelési sebesség vagy a beeső lézerteljesítmény megváltoztatása a minták elektromos ellenállásának és mechanikai szilárdságának változását eredményezi [T1].

A hegesztési varratok minőségét és tulajdonságait, a kialakulásuk során az olvadékmédecében és valamennyi hővel érintett zónában egyidejűleg lejátszódó számos folyamat együttesen befolyásolja. Praktikusán szinte mindegyik folyamat külön-külön nyomon követhető és felhasználható arra, hogy a lézerhegesztési folyamat után vagy bizonyos esetekben a lézerhegesztés során előrejelzést adjon a kötés minőségéről. Neves kutatócsoportok dolgoznak olyan lézeres hegesztési varrat minőségellenőrzési módszerek kifejlesztésén, amelyek e folyamatok elemzésén alapulnak. E minőségellenőrzési módszerek közé tartozik többek között a plazma megfigyelése [65-67], a fröccsenésképződés követése [67-69], a hegesztési varrat integritásának elemzése [70], a hegesztési varrat profiljának tanulmányozása [71-73], a hegesztési hibák nyomon követése [73], a lézersugár intenzitáseloszlás változásának mérése [74].

Ezen folyamatok együttes hatása nemcsak a hegesztési varrat belsejében, hanem a hegesztési varrat felületén is megdermedve visszamarad, és a folyamat paramétereitől függően vizuálisan eltérő varratmorfológiát eredményez. Fabbro az olvadék áramlási dinamikájának tanulmányozása alapján, amelyet az olvadékmedence acéltömbökön történő nagysebességű videóképfalkotásával elemzett, öt morfológiai típust azonosított, amelyeket Rosenthalnak, egyhullámnak, elnyújtott kulcslyuknak, elő-domborodásnak és domborodásnak nevezett el. Megfigyelései szerint ezek a különféle morfológiák a beeső lézer teljesítmény-szkennelési sebesség diagramnak egymástól egyértelműen elkülönülő régiókban jelennek meg [75,76].

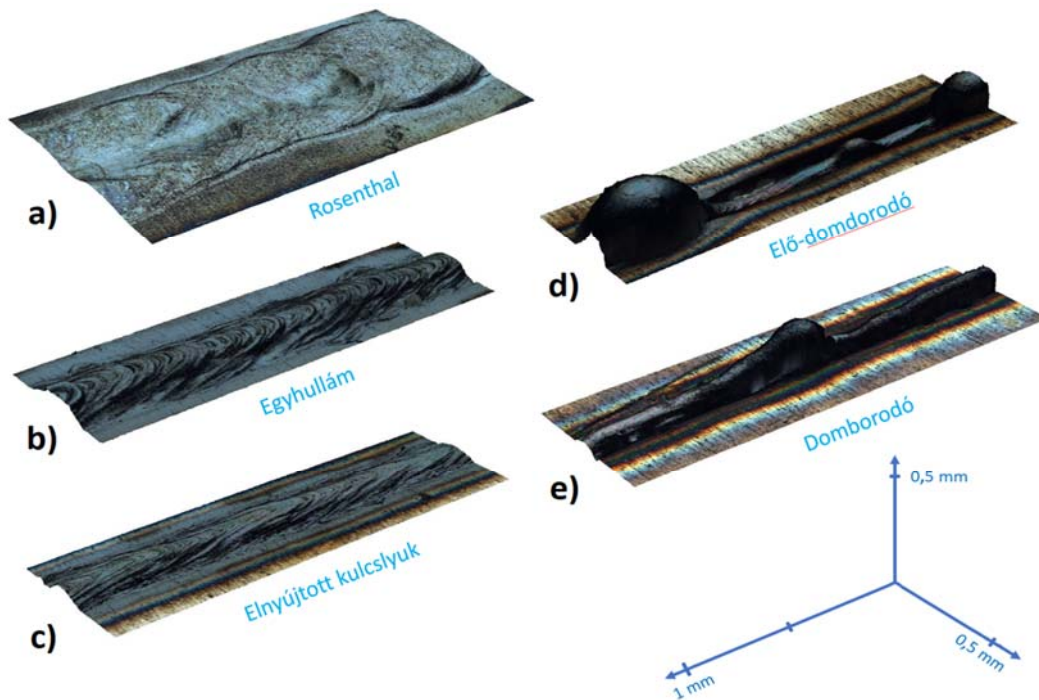
Fabbro szerint az öt varratmorfológiai típus, amelyek a pásztázási sebesség növekedésének sorrendjében jelennek meg (ha a lézerteljesítményt kellően nagy és állandó szinten tartják), megkülönböztető sajátosságokat mutatnak, amelyek vizuális megfigyeléssel felismerhetők. A Rosenthal-morfológiát (amely a legkisebb sebességnél jelenik meg) egy meglehetősen nagy olvadékmedence jellemzi, kaotikus felületi ingadozásokkal és nagy hullámokkal; ezen felül jellemzően az olvadékmedence peremén rendkívül sok olvadékfröccsenés szilárdul meg. A pásztázási sebesség növelésével megjelenik az egyhullám morfológia, amely meglehetősen szabályos, szimmetrikus, gyöngysorszerű mintázattal rendelkezik. A hullámok magassága sokkal kisebb lesz az elnyújtott kulcslyuk típusban, ami simább varratfelületeket eredményez, jellegzetes V alakú hullámfrontokkal. A pásztázási sebesség további növelésével a hegesztési varrat mindkét oldalán barázdák, ún. alávágások alakulnak ki, amelyek az elő-domborodási tartomány kezdetét jelzik. Itt az olvadékmedencéből már nem kerülnek ki fröccsenések vagy cseppek. Végül a legnagyobb sebességeknél figyelhető meg a domborodó morfológiai típus, amelyet a varrat mindkét oldalán megjelenő, nagyon mély

alávágások jellemeznék. Itt a varrat - tengelye mentén - nagy, megszilárdult, ellipszis alakú duzzanatokból áll, amelyeket kisebb völgyek választanak el [75,76].

Kutatásaim ezen szekcióban bemutatott eredményeiben Fabbro inspiráló közelítését azzal emeltem új, magasabb szintre, hogy a varratok morfológiáját korreláltam azok elektromos és mechanikai viselkedésével egy széles lézerteljesítmény-pásztázási sebesség tartományban.

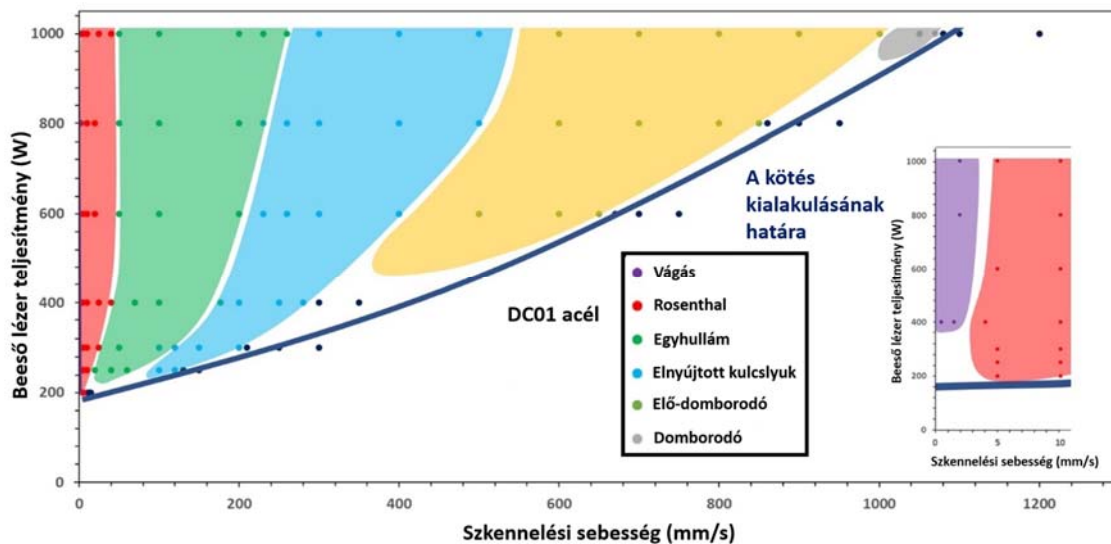
5.2. A morfológia térkép

A morfológiai változások vizsgálata érdekében számos olyan mérési sorozatot végeztem DC01 illetve nikkel bevonatú rozsdamentes acéllemez párokon, amelyekben a lézer nyaláb pásztázási sebessége és a beeső lézerteljesítmény közül az egyiket állandó értéken tartottam, míg a másikat szisztematikusan változtattam. Azokat a mérési sorozatokat, amelyekben a sebességet állandó értéken tartottam, sebességsorozatoknak, míg az állandó lézerteljesítmény mellett készített sorozatokat teljesítménysorozatoknak neveztem el. Valamennyi mintasorozat minden egyes hegesztési varrata esetén azonosítható volt az öt morfológiai típus valamelyike, amint azt a 30. ábra mutatja (a-e). Nagyon alacsony sebesség és nagy beeső lézerteljesítmény alkalmazásakor átmenő lyukakat és vágásokat tartalmazó mintákat kaptam. Ezeket az eseteket figyelmen kívül hagytam, mivel a megmunkálás eredménye vágás és nem kötés volt. A hegesztési sebesség növelése a teljesítménysorozatnál szabálytalan körvonalú és kaotikus hullámminták megjelenését eredményezte, amelyeket nagy mennyiségű fröccsenés képződése kísért a hőhatás zónában, amit az instabil olvadámedencéből való olvadt fém kilökődése okozott. Ezt a morfológiai típust a 30a. ábra példázza. A sebesség további növelésével előállított kötések (30b. ábra) meglehetősen szimmetrikus, egyenes kontúrúak voltak, kerek, szabályos hullámfrontokkal és mérsékelt mennyiségű fröccsenésképződéssel a varrat mentén. A következő típusú kötéseknel jellegzetes V alakú hullámok és szintén rendkívül szabályos varratkontúr volt azonosítható, szinte nulla fröccsenésképződéssel, amint az a 30c. ábrán látható. Ettől a tartománytól távolodva a korábban említettektől meglehetősen eltérő formájú hegesztési varratokat figyeltem meg. Ezekben az esetekben a szabályos hullámfrontok már nem voltak jelen, ehelyett meglehetősen kaotikus megjelenés volt tapasztalható, a hegesztési varrat mentén mindkét oldalon barázdák jelentek meg, amelyek a 3D területi felvételeken egyértelműen azonosíthatók voltak (30d. ábra). A legnagyobb hegesztési sebességeknél egy olyan morfológiatípust figyeltem meg, amelyet egyetlen egységes, gerincszerű képződmény jellemez a hegesztési varrat közepe mentén, mindkét oldalán mély barázdákkal szegélyezve (30e. ábra). Ez a vékony fémlemezekon végzett kísérleteim során azonosított öt típus pontosan megfelel a Fabbro által megnevezett típusoknak, azaz a Rosenthal-, az egyhullám, az elnyújtott kulcslyuk, az elő-domborodó és a domborodó morfológiáknak [72,73].



30. ábra: A DC01 acélon megfigyelt 5 féle morfológia típus 3D optikai mikroszkópos képe 15, 100, 350, 700 and 1050 mm/s szkennelési sebesség és 1000W állandó lézerteljesítmény esetén. Minden kép esetén azonos a nagyítás mértéke.

Az egyes kötések morfológiáját a P-v síkban ábrázolva morfológiai térképet alkottam. A pontok színe jelzi a megfelelő folyamatparaméterekkel előállított tényleges minta morfológiájának típusát. A hasonló morfológiai megjelenést produkáló pontthalmazok diszjunkt területekkel történő lefedése az 31. ábrán bemutatott morfológiai térképet eredményezi.



31. ábra: DC01 acéllemezek varratainak morfológia térképe. A betét ábra kinagyítja azt az igen kis sebességű tartományt ahol a vágás és hegesztés határvonal látható.

Azonnal megállapítható, hogy az egyes morfológiai típusokhoz rendelt területek meglehetősen szabályos sorrendben fedik le a P-v síkot. Minden terület jól jellemezhető egy

monoton függvényekkel jellemzett morfológiai határral.

Látható, hogy amikor a pásztázási sebességet használjuk vezérparaméterként (teljesítménysorozat), az alkalmazott fix teljesítmény nagyságától függően akár 4 átmenet is megfigyelhető volt a morfológiai típusok között. A sebességsorozatok alkalmazásakor azonban a dinamikai tartomány korlátozottá válik: a 200-1000 W-os teljesítmény tartományban maximum egy átmenetet lehetett előállítani a morfológiai típusok között. Egy másik fontos megjegyzés, hogy nagyobb lézerteljesítmény értékek használatakor nagyobb számú morfológiai típusok hajlamos megjelenni, így változatosabb megjelenésű és tulajdonságú varratok hozhatók létre.

A felületi sérüléssel vagy integritási hibával rendelkező, "vágott" jelzéssel ellátott minták az 31. ábra betét ábráján láthatók, mivel nehezen felismerhetők a fő térképen. Általánosságban elmondható, hogy a morfológiai típus régiók legyezőszerű struktúrát mutatnak, és meglehetősen szabályos viselkedést követnek. A lézerteljesítmény növekedésével a szomszédos régiók közötti határvonalak fokozatosan meredekebbé válnak, azaz a határterületi vonal meredeksége növekszik. E jelenség miatt nagy lézerteljesítményeknél a lézer nyaláb szkennelési sebesség, mint elsődleges folyamatparaméter változtatása jó módszer a morfológiaváltozások viszonylag széles ablakban történő szabályozására.

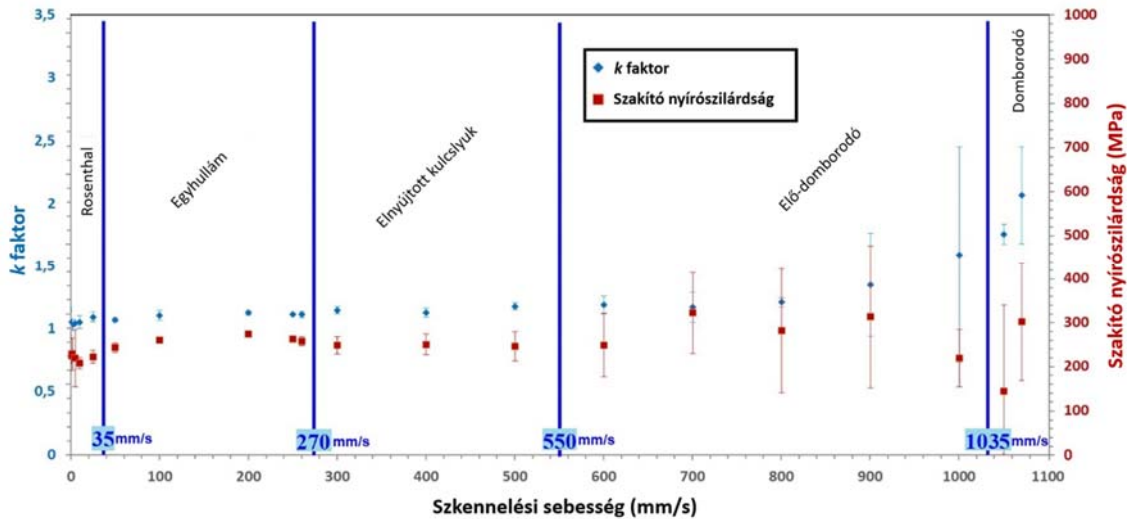
A 31. ábrából az is látható, hogy az összekötendő acéllemezek vastagsága a csökkenő behatolási mélység miatt alsó határt szab a kötés kialakításához alkalmas hegesztési küszöbsebességnek. Ahogy a behatolási mélység megközelíti a lemezvastagságot (felülről), a kötés instabillá válik, majd megszűnik. Ez megmagyarázza, hogy miért csak 3 vagy annál kevesebb morfológia jelenik meg 400 W alatt a vizsgálatomban, mivel a többi morfológiához tartozó sekély mélység ezekben az esetekben nem elegendő a két lemez közötti kötés kialakításához. A kék határvonal választja el azokat a mintákat, ahol nem alakult ki kötés, azaz sem fizikai kapcsolat, sem elektromos vezetés nem volt megfigyelhető a két fémlemez között.

A morfológiai térkép elkészítése kulcsfontosságú volt a további vizsgálataim szempontjából, mivel pontosan meghatározta azokat a teljesítmény-sebesség tartományokat, ahol várhatóan nem következnek be morfológiai változások. A következőkben a lézerhegesztett minták elektromos és mechanikai viselkedéséről számolok be, és azokat összefüggésbe hozom az itt leírt hegesztési varratok morfológiájával [T2].

5.3. Az elektromos és mechanikai tulajdonságok függése a morfológiától

Annak feltárása érdekében, hogy a morfológiában bekövetkezett változások milyen összefüggésben vannak a minták elektromos és mechanikai viselkedésével, megmértem az egyes lézerhegesztett minták k -faktor értékeit és szakító nyírószilárdságát. A 31. ábrán látható minden egyes teljesítmény- és sebességsorozat egyesével történő bemutatása és diszkutálása nem túl kézenfekvő. Ezért a következőkben részletesen tárgyalok egy-egy reprezentatív sorozatot, hogy az általános viselkedést és tendenciákat pontosan bemutassam. Erre a célra a teljesítménysorozatok alkalmasabbak, mivel a sebességsorozatokhoz képest ezekben jelenik meg a több morfológiai átmenet. A 32. ábrán a mért k -faktorokat és szakító nyírószilárdságokat az 1000 W-os teljesítménysorozatra ábrázoltam. Ezen teljesítménysorozat esetében ugyanis a kapcsolódó lézer nyaláb szkennelési sebességtartomány a legszélesebb mind közül, így ebben a sorozatban a lehető legtöbb morfológia van jelen. Az ábrán az öt morfológiai típus kék

függőleges vonalakkal elválasztva jelenik meg.

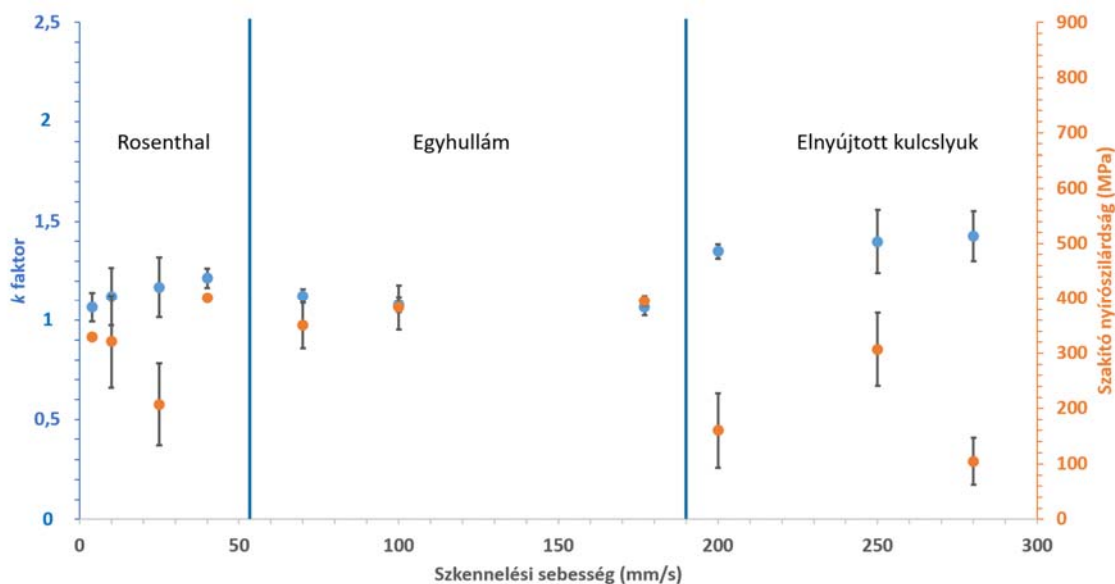


32. ábra: Az 1000 W-os teljesítmény sorozat a morfológiai határvonalakkal. A hibásávok a 3 független mérési sorozatból számított 95%-os konfidencia intervallumhoz tartozó hibát reprezentálják.

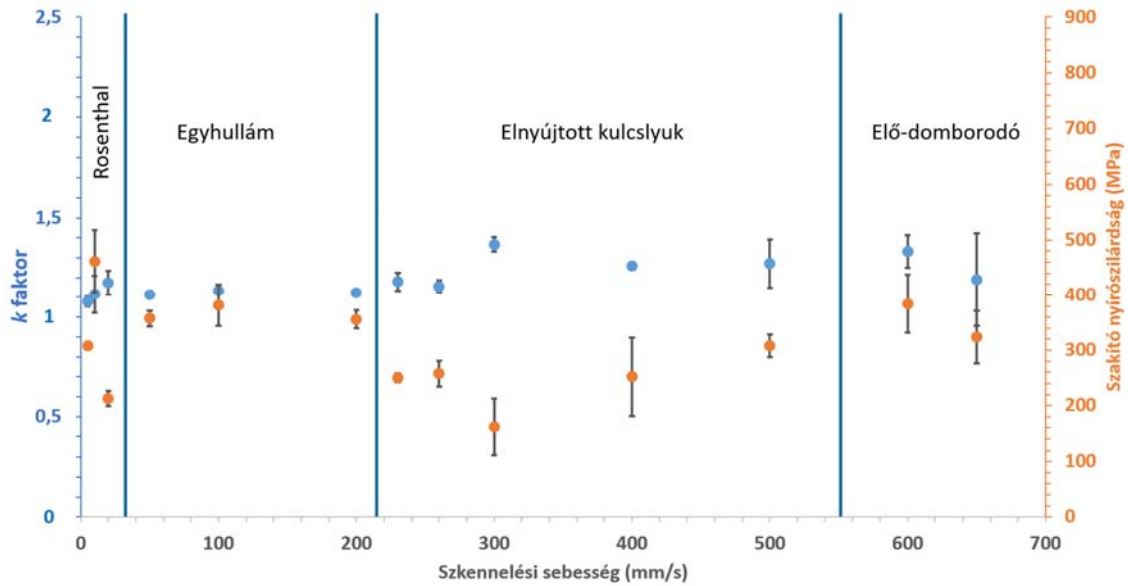
A Rosenthal-tartományban a minták k -faktora nagyon alacsony sebességeknél 1,03-as minimumot mutat, és folyamatosan 1,09-re emelkedik, ahogy a pásztázási sebesség megközelíti a Rosenthal-egyhullámú morfológiai küszöbsebességet, körülbelül 35 mm/s-nál. A kötések mechanikai szilárdsága ebben a tartományban 220 MPa körül szóródik. Mind az elektromos, mind a mechanikai tulajdonság hibája ebben a tartományban viszonylag nagy, egyes esetekben meghaladja a 10%-os kritikus relatív hibát, ebből adódóan az ilyen típusú minták tulajdonságainak reprodukálhatósága a hegesztési varratképződés kaotikus jellege miatt mérsékelt. A 35 mm/s és 270 mm/s pásztázási sebesség tartományban egyhullám morfológiájú hegesztési varratokat kaptam. Az ilyen morfológiájú lézerhegesztett minták átlagosan stabil $1,09 \pm 0,02$ k -faktort és $255 \text{ MPa} \pm 6 \text{ MPa}$ szakító nyírószilárdságot mutatnak. A kiemelkedő reprodukálhatóság ebben a morfológiai régióban feltehetőleg elsősorban a kötés kialakulása során jelen lévő olvadékmedence stabilitásából fakad. A pásztázási sebesség 270 mm/s és 550 mm/s közötti tartományban történő változtatása elnyújtott hullám morfológiájú hegesztési varratokat eredményez. Az ebben a pásztázási sebességtartományban hegesztett minták is rendkívül stabil elektromos tulajdonsággal rendelkeznek. Megjegyzendő azonban, hogy a k -faktor kissé magasabb, körülbelül $1,14 \pm 0,03$ átlagértékkel, és a mechanikai szilárdság kissé alacsonyabb $245 \text{ MPa} \pm 25 \text{ MPa}$ ebben a régióban, az egyhullám tartományban megfigyelttel szemben. Ezen felül a hibák is jelentősen nagyobbak, ami különösen a mechanikai tulajdonság esetében szembetűnő. 550 mm/s pásztázási sebességnél és felette elő-domborodó morfológiai típusú varratokat kaptam. Körülbelül 800 mm/s sebességig a k -faktor stabilan $1,18 \pm 0,08$ -as átlagon marad, ezen a ponton túl meredeken emelkedik, és végül $1,59 \pm 0,86$ -os csúcscértéket ér el. A mechanikai szilárdság ennek megfelelően viselkedik, a tartomány első felében 280 $\text{MPa} \pm 102 \text{ MPa}$ körül szór, és a legnagyobb sebességeknél $217,9 \text{ MPa} \pm 65 \text{ MPa}$ körül állapodik meg. A hiba mind az elektromos, mind a mechanikai tulajdonság esetében igen jelentős. 1 m/s pásztázási sebesség felett domborodó típusú morfológia jelenik meg. Vizsgálatomban csak kevés olyan mintát sikerült megfigyelnem, amelyek ilyen típusú morfológiát mutatnak, azonban

egyértelmű, hogy az összes morfológia típus közül ezek rendelkeznek a legrosszabb elektromos és mechanikai tulajdonságokkal. A k -faktor és a mechanikai szilárdság értékei ezekben az esetekben végül elérik a $2,07 \pm 0,39$, illetve a $300,7 \text{ MPa} \pm 134 \text{ MPa}$ értéket. A hibasávok tükrözik az ilyen folyamatparaméter-kombinációknál megvalósított hegesztési folyamat nagyon rossz reprodukálhatóságát. A lézerhegesztett kötések elő-domborodó és különösen domborodó típusú morfológiával rendkívül alacsony kötésterületi értékekkel rendelkeznek (8 mm-es varrathossz esetén $0,1 \text{ mm}^2$ alatt). Az elő-domborodó és a domborodó típusok között azonosított morfológiai különbségek ellenére az elektromos és mechanikai tulajdonságok tendenciáiban nem észlelhető jelentős változás a területek határán.

Az 1000 W-os teljesítménysorozat esetében bemutatott viselkedés általános, és a többi teljesítmény sorozat esetében is megfigyelhető, ami azt bizonyítja, hogy a különböző morfológiai típusokhoz tartozó minták eltérő elektromos és mechanikai jellemzőket mutatnak. Ennek az eredménynek a további alátámasztására a 33. és 34. ábrákon bemutatom a 400, illetve 600W-os teljesítmény sorozatokhoz tartozó mérési eredményeket is. Ezekben az esetekben is hasonló következtetéseket tudtam levonni, függetlenül attól, hogy a korábban említett okok miatt a hasznos sebesség tartomány jóval korlátozottabb volt. [T1]

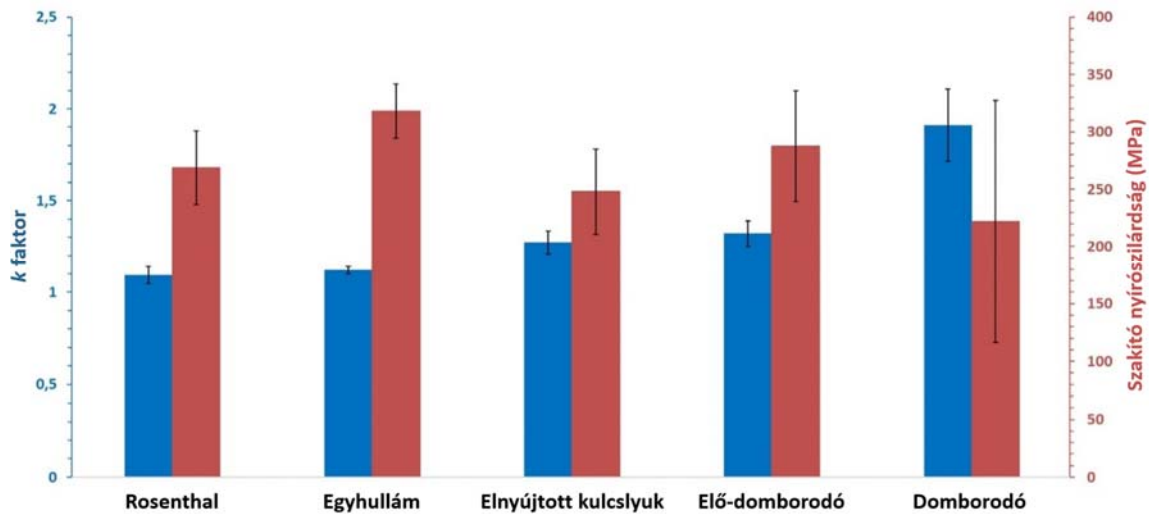


33. ábra: A 400 W-os teljesítmény sorozat a morfológiai határvonalakkal. A hibasávok a 3 független mérési sorozatból számított 95%-os konfidencia intervallumhoz tartozó hibát reprezentálják.



34. ábra: A 600 W-os teljesítmény sorozat a morfológiai határvonalakkal. A hibásávok a 3 független mérési sorozatból számított 95%-os konfidencia intervallumhoz tartozó hibát reprezentálják.

Egy másik megközelítésként a következőkben az elektromos és mechanikai jellemzők morfológiai típusonkénti változásait tárgyalom. Az azonos morfológiai típusú minták együttes kezelése érdekében, függetlenül az azok létrehozásához használt tényleges folyamatparaméterektől, az egyforma morfológiai típusokba tartozó mintákhoz átlagos k -faktor értékeket és mechanikai szilárdságokat rendeltem hozzá azok hibáival együtt, jelezve a reprodukálhatóságát is. Az eredményeket a 35. ábra mutatja be.



35. ábra: A különböző morfológia típusokhoz tartozó átlagos k faktorok és a mechanikai szilárdság értékei.

Ebben az ábrázolásmódban a Rosenthal-típusú minták átlagos k -faktora volt a legalacsonyabb, amihez mérsékelt hibák társultak ($1,09 \pm 0,05$). Az egyhullám morfológia kissé magasabb k -faktort mutatott ($1,12 \pm 0,02$), de stabilabb volt, amit az alacsony hiba jelez. Az elnyújtott hullám morfológiájú lézerhegesztett minták jelentősen magasabb k -faktort mutattak,

nevezetesen ($1,27\pm 0,06$), és relatív hibájuk is magasabb volt, megközelítette az 5%-ot. A k -faktor az elő-domborodó és a domborodó tartományban volt a legmagasabb, ($1,32\pm 0,07$), illetve ($1,91\pm 0,20$). Az is megállapítható, hogy az ilyen domborodó típusú hegesztési morfológiát mutató minták relatív hibái 10% körüliek. Összességében monoton növekvő tendencia figyelhető meg a k faktorok átlagos értékeiben a különböző morfológiák megjelenési sorrendjében.

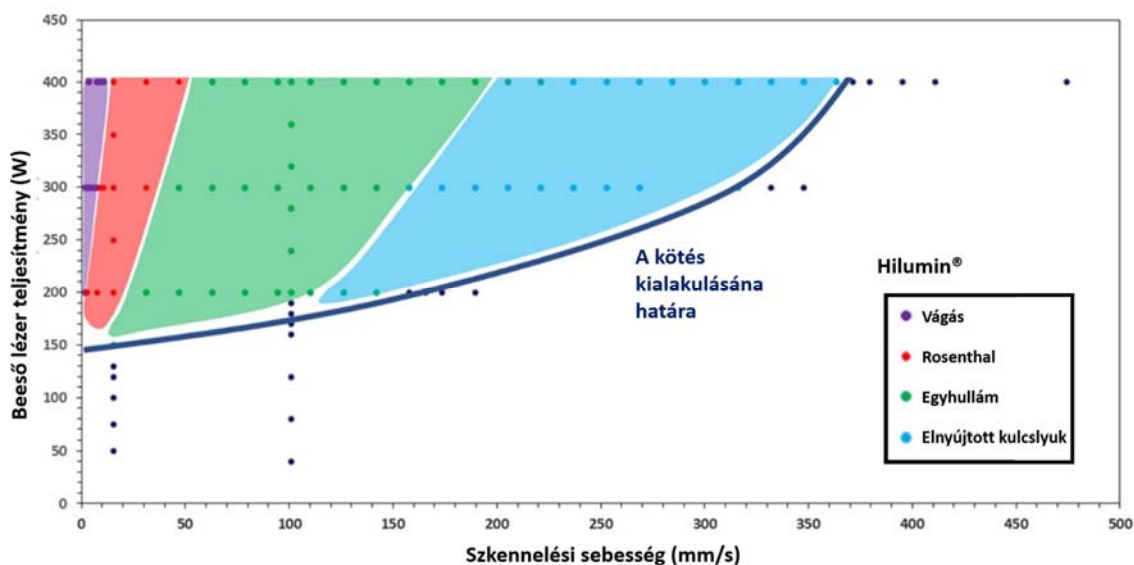
A szakító nyírószilárdságok szórása lényegesen nagyobb, mint az elektromos tulajdonságé. A k faktorokkal ellentétben nem figyelhető meg egyértelmű monoton tendencia. Az egyhullám minták mutatják a legnagyobb mechanikai szilárdságot 317,9 MPa értékkel és a legkisebb hibát 23,6 MPa értékkel. Az összes többi morfológia nem mutat különbséget a hibahatáron belül. Megjegyzendő azonban, hogy a nagy pásztázási sebességnél megjelenő morfológiák esetében a szakító nyírószilárdság relatív hibája rendkívül nagy, meghaladja a 20%-ot.

Egy energiátárolási célú kötés technológiai alkalmazhatóságának vizsgálatokor figyelembe kell venni az adott kötési folyamat során keletkező hőmennyiséget is, mivel az elektromos energiát egy akkumulátorcsomagban kémiai úton tárolják, ami általában nagyon érzékeny erre a hőre. A lézerhegesztésnél nagy pásztázási sebesség és/vagy alacsony kötési területre beeső lézerteljesítmény szükséges az alacsony hőbevitel eléréséhez. Ipari alkalmazásoknál egy másik fontos szempont a folyamat termelékenysége is. Ebből a szempontból értelemszerűen a nagy pásztázási sebességek számítanak kedvezőek. Ezek a megfontolások a Rosenthal típusú régiót meglehetősen kevésbé teszik vonzóvá, és célszerűnek tűnik a minél nagyobb hegesztési sebességhez tartozó morfológiát előnyben részesíteni. Ugyanakkor a morfológiai megfontolásokon túl általánosságban is figyelembe kell venni, hogy ahogyan a hegesztési sebesség növekszik a hegesztési mélység fokozatosan egyre sekélyebbé válik és a lemezvastagsághoz közeledve a kötés megbízhatatlanná válik, és ennek következtében annak tulajdonságai és azok reprodukálhatósága meredeken csökken, míg végül eléri azt a pontot, ahol nem alakul ki kötés. Ezeknek a szempontoknak a figyelembe vételével méréseim alapján az egyhullám morfológiát ítélem a legvonzóbbnak az ipari alkalmazások számára, amely kiváló elektromos tulajdonságot mutat a legnagyobb reprodukálhatóság mellett a felső sebesség határ közelében, ami 1000 W-nál 270, 800-nál 250, 600-nál 200 és 400-nál 190 mm/s-ot jelent. Bár a Rosenthal-morfológia átlagos k -faktora kissé alacsonyabb, mint az egyhullám típusé, ezt az előnyt a nagyobb hegesztési sebesség és a k -faktor kisebb szórása túlkompenzálja. Azokban az esetekben, amikor az alacsony hőbevitel döntő fontosságú, az elnyújtott hullámú típusú hegesztési varratmorfológia is jó kompromisszumot jelenthet [T1, T2].

5.4. Kísérletek Hilumin anyagon

Ezen eredmények általánosságának megállapítása érdekében megismételtem kísérleteimet egy fémtanilag összetettebb és a gyakorlatban szélesebb körben alkalmazható mintaanyaggal: Hilumin®, amely egy rozsdamentes acél, mindkét oldalán 10 µm-es nikkelbevonattal az alacsony kötési ellenállás és a magas korrózióállóság érdekében. A következőkben 0,25 mm vastag, 8 mm széles Hilumin® szalag párok lézerhegesztésénél kapott eredményeket mutatok be.

Az előző fejezetben bemutatott mérési sorozathoz képesti fő különbség a hegesztési varrathossz 8 mm-ről (DC01 lemezeknél) 4 mm-re (Hilumin® lemezeknél) való csökkentése, amely változtatás az acélszalagok geometriájának különbsége miatt volt szükséges (a Hilumin® lemezek ugyanis 0,5 mm helyett csupán 0,25mm vastagságúak és szélességük is 16 mm helyett 8 mm volt). A Hilumin® esetében is szkennelési sebesség és lézerteljesítmény sorozatokat készítettem. A vizsgált lézerteljesítmény-ablakot a Hilumin® anyag kisebb vastagsága miatt a 100 W és 400 W közötti beeső teljesítménytartományra csökkentettem. Ebben a paraméterablakban csak 3 hegesztési varratmorfológiát kaptam. Jól láthatóak voltak a Rosenthal, az egyhullám és az elnyújtott hullám típusok jellegzetes tulajdonságai. A morfológiákat amérési sorozatok pontjaihoz kapcsolva a 36. ábrán látható morfológiai térképet hoztam létre.

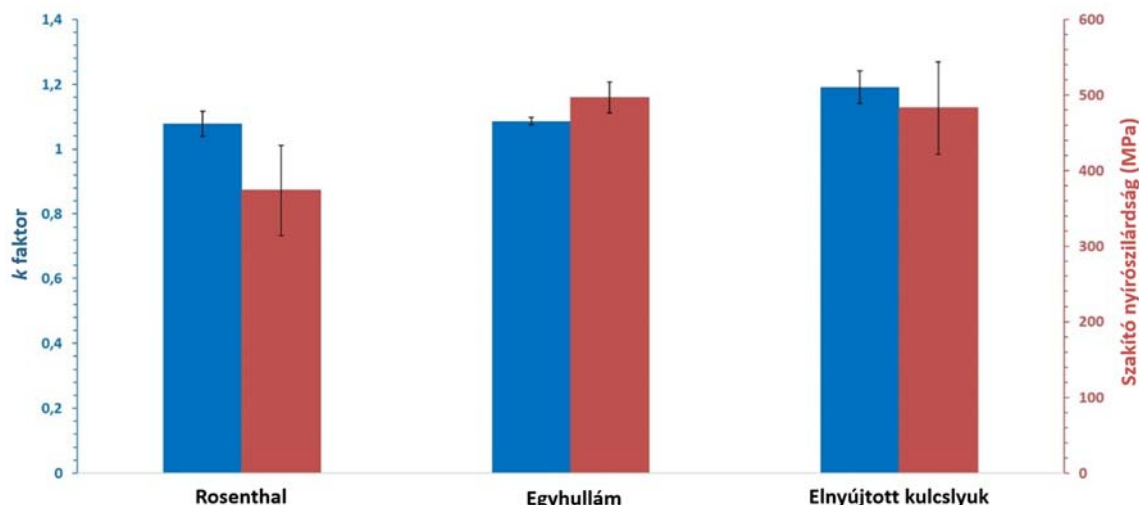


36. ábra: 0,25 mm vastag Hilumin® szalagok hegesztési varratainak morfológia térképe.

A különböző morfológiájú régiók ennél az anyagnál is világosan elkülönülnek, és az általános tendenciák hasonlóak a DC01 kísérletekből levezetettekhez: ugyanaz a 3 morfológia jelenik meg a lézerpásztázási sebesség növelésével, pontosan ugyanabban a sorrendben, ugyanazt a "legezőszerű" struktúrát mutatva. Az egyes morfológiatípusok határai növekvő lézerteljesítmény esetén a magasabb pásztázási sebességek felé tolódnak. Az a határ sebesség, amellyel a kötés 400 W beeső lézerteljesítmény mellett még megvalósítható, a DC01-es lemezek esetében tapasztalt 300 mm/s-ról 360 mm/s-ra nő. Az egyhullám – elnyújtott hullám határ 177 mm/s-ról 220 mm/s sebességre, a Rosenthal – egyhullám határ pedig 40-ről 50 mm/s értékre tolódik 400W beeső teljesítmény esetén. A kötésképzés teljesítményhatára 200 W-ról 150 W-ra csökken. Röviden: ugyanazok a viselkedések és általános tendenciák voltak jelen, eltérő abszolút értékek kíséretében. Mivel nem tudtam releváns optikai vagy termikus különbségeket azonosítani a két minta anyag között, a DC01 vs. Hilumin® viselkedése közötti különbségeket a vastagságok eltérésének tulajdonítottam [77-80]. Az optimális morfológiának ebben az esetben is az tekinthető, ahol az olvadékmedence dinamikája elég szabályos ahhoz, hogy jól reprodukálható kötést eredményezzen, és a mélység a felső fémlemez vastagságának megfelelő tartományban változik.

A különböző morfológiájú Hilumin® hegesztési varratokon kapott elektromos és

mechanikai tulajdonságokra vonatkozó mérési eredményeket a 37. ábra foglalja össze. A DC01 hegesztési eredményekkel összehangban az egyhullám morfológiájú típus tartománya a legjobb, mivel annak k faktora a legalacsonyabb ($1,08 \pm 0,04$), a mechanikai szilárdsága a legmagasabb ($496,7 \text{ MPa} \pm 20,4 \text{ MPa}$) és a szórás ebben a régióban a legkisebb ($<5\%$).



37. ábra: A Hilumin® mintákon kialakított különböző morfológiai típusok k faktor és mechanikai szilárdság értékei.

Abból a megfigyelésből kiindulva, hogy a hegesztési varratok morfológiai típusai ugyanabban a sorrendben jelennek meg, és az egyes régiók általános tendenciái ugyanazok egy másik, metallurgiai sokkal összetettebb rendszerben (bevonatos ötvözet), feltételezhető, hogy a bemutatott morfológiai térkép egy adott folyamatparaméter-ablakban az acélokra általánosságban univerzális és mindig előállítható [T2].

5.5. Az eredmények tézisszerű megfogalmazása

Mindent egybevetve tehát kizárólag a hegesztési varrat és környezetének vizuális megfigyelése alapján ötféle hegesztési morfológia azonosítottam be. A legfontosabb folyamatparaméterek, nevezetesen a lézerteljesítmény és a hegesztési sebesség együttesen határozzák meg a hegesztési varratok morfológiáját. Ez a P-v síkon ábrázolt jellegzetes morfológiai térképben materializálódik.

Ezen túlmenően a Rosenthal-, az egyhullám, a elnyújtott kulcslyuk, az elődomborodó és a domborodó morfológiák karakterisztikus elektromos és mechanikai viselkedéssel rendelkeznek. Mindkét fém, nevezetesen a Hilumin® és a DC01 esetében az egyhullám morfológia bizonyult a legalkalmasabbnak akkumulátorhegesztési alkalmazásokhoz, mivel az ilyen típusú hegesztési varratmorfológiájú minták mutatták a legalacsonyabb k -faktort - a hibahatáron belül - a legnagyobb mechanikai szilárdság mellett. Ezen kívül, az egyhullám minták mutatták a legkisebb változékonyságot mind a k -faktor, mind a mechanikai szilárdság tekintetében [T2].

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]

6. A HEGESZTÉSI ZÓNA KONFIGURÁCIÓJA ÉS ANNAK AZ ELEKTROMOS ÉS MECHANIKAI VISELKEDEÉSRE GYAKOROLT HATÁSA

A mechanikai és elektromos paramétereket a legtöbb esetben, a lézeres folyamat paramétereinek - mint például a beeső lézerteljesítmény, pásztázási sebesség, sugárátmérő, beesési szög stb. – változtatásával optimalizálják, mivel ezek a paraméterek technikailag egyszerűen megvalósítható módon, nagy hatással vannak a kötések viselkedésére [63]. Ezt a közelítést alkalmaztam magam is az előző fejezetben bemutatott eredményeim eléréséhez [T1, T2]. A lemezpárok átfedő területe azonban számos egyéb paramétert kínál (amelyek akár egymást is befolyásolhatják), amelyek hozzájárulnak a kötésvégső ellenállásához vagy szilárdságához, így további lehetőséget biztosítanak az optimalizálásra [16,55,81].

A korábban leírtakkal összhangban az akkumulátorok lézerverhegtésénél széles körben alkalmazzák az átlapolt kötési konfigurációt mind az akkumulátor és a gyűjtő sín közötti közvetlen, mind a vezeték/szalag kötési konfigurációkban [19,29,46]. A legtöbb ilyen átlapolt kötést olyan lézerverhegtő berendezéssel készítik, amely szkenneroptikával van felszerelve, amely programozható és nagymértékben automatizálható, és ezáltal alkalmas a geometriai paraméterek szempontjából történő optimalizálásra is.

Ezen irányvonalak mentén több munkacsoport is tett már kísérletet a lézerverhegtett

kötések viselkedésének tanulmányozására, modellezésére és tulajdonságainak optimalizálására a fent említett, geometriai paraméterek változtatásával (a hegesztési varrat alakzat és elhelyezkedése az átlapoló felületen). T. Solenbach egyszerű ellenálláshálózati módszerekkel elektromos modellszámításokat végzett különböző hegesztési varratelrendezésekre, és arra a következtetésre jutott, hogy a hegesztési varratelrendezés megfelelő megválasztásával a kötések ellenállása jelentősen csökkenthető [16]. P. A. Schmidt munkacsoportja megfigyelte, hogy az egyenes hegesztési varratok helyett ívelt hegesztési varratok alkalmazása jelentősen megnövelte a repedések és egyéb hegesztési hibák megjelenését a hegesztés során. Ez a kutatócsoport arra is rámutatott, hogy a 2 vagy 3 vonalból álló hegesztési alakzatok jelentősen nagyobb elektromos vezetőképességgel rendelkeztek, magyarázatuk szerint az „egyenletesebb árameloszlásból” eredően. Méréseik szerint a többszörös hegesztések különösen ígéretesnek tűnnek az optimalizálás szempontjából. Solenbach csoportjával egyetértve ők is arra a következtetésre jutottak, hogy a különböző hegesztési varratelrendezések alkalmazása nagymértékben befolyásolja a hegesztések vezetőképességét, de további vizsgálatokra van szükség a folyamatok és szabályszerűségek mélyebb megértéséhez [55].

Végül S. Hollatz kutatócsoportja nemrégiben egy átfogó tanulmányt is készített ebben a témában, habár kevésbé rendszerezetten (nem törekedtek a kötési keresztmetszetet állandó értéken tartani, sem az egyes aspektusokat szisztematikus módon, rendszerben vizsgálni). T. Solenbach csoportjához hasonlóan ők is egyszerű ellenálláshálózati közelítéseket végeztek, amelyeket numerikus áramsűrűség-szimulációk követtek mind az egyszeres, mind a többszörös hegesztési varratok esetében. Kísérleteik során néhány alapeset vizsgálata alapján arra a következtetésre jutottak, hogy az áramsűrűség az átfedés szélei mentén jelentősen nagyobb volt, mint a belső területeken, ezt a megfigyelést peremáram jelenségnek nevezték [81].

Mindezekből nyilvánvaló, hogy a hegesztési varratok geometriai optimalizálása jelentős potenciállal bír az akkumulátorhegesztési alkalmazásokban. Mivel az átlapoló kötési geometria számos olyan eredendő, tulajdonsággal rendelkezik, amelyek a folyamat során beállíthatók, különleges kihívást jelent ezek egymástól történő elkülönítése és független hatásuk feltárása.

Ennek eredményeképpen, szisztematikus kísérleti vizsgálatok keretében, a következőkben számos, a hegesztési varrat geometriájával kapcsolatos kötőoptimalizálási lehetőséget tárgyalok, elektromos és mechanikai szempontból egyaránt. A tárgyalt aspektusok egyenként és egyszerre is optimalizálhatók. Végző célom olyan feltételek meghatározása, amelyek minimális elektromos ellenállást és maximális mechanikai szilárdságot eredményeznek.

Minden vizsgálathoz 0,5 mm vastag és 16 mm széles DC01 hidegen hengerelt acélszalagokat használtam. A tárgyalt kísérletek során a lézerteljesítményt állandó 400 W-on tartottam, a hegesztési sebességet 50 mm/s-ban, a lézerteljesítményét 0,35 mm-es ($1/e^2$) értéken rögzítettem. Ezeket a paramétereket korábbi mérési eredményeim figyelembe vételével választottam ki, ez a műszaki paraméter készlet ugyanis konzisztens, egyhullám típusú, egyenes hegesztési varratokat eredményezett, rendkívül jól reprodukálható tulajdonságokkal és stabil kötési keresztmetszet méretekkel, amelyek kulcsfontosságúak voltak a jelen vizsgálat szempontjából.

Széles körben ismert, hogy az elektromos ellenállás nagysága és a maximális erő, amelyet egy kötés törés nélkül elviselhet, nagymértékben függ mind a kötés területének méretétől, mind annak kialakítási geometriájától. Következésképpen két közvetlen lehetőség

adódik a fent említett tulajdonságok optimalizálására:

- A varrat kialakítás/alakzat optimalizálása egy rögzített méretű kötési területhez.
- A kötési terület méretének a növelése

A kötési terület a hegesztési varrat területéből és a nem hegesztett, egymást átfedő részek területéből áll, ami az elektromos vezetésben szintén részt vesz. A hegesztési varrat területének növelésér két lehetőség kínálkozik: ez a meglévő kötés meghosszabbításával, vagy többszörös kötések készítésével egyaránt megvalósítható.

Kísérleteim során tehát a hegesztési varrat alakzat, a hegesztési varrat szegmens hossz, a hegesztési varrat szegmensek szám és végül a nem hegesztett átfedő területek mérete megváltozásának hatását vizsgáltam.

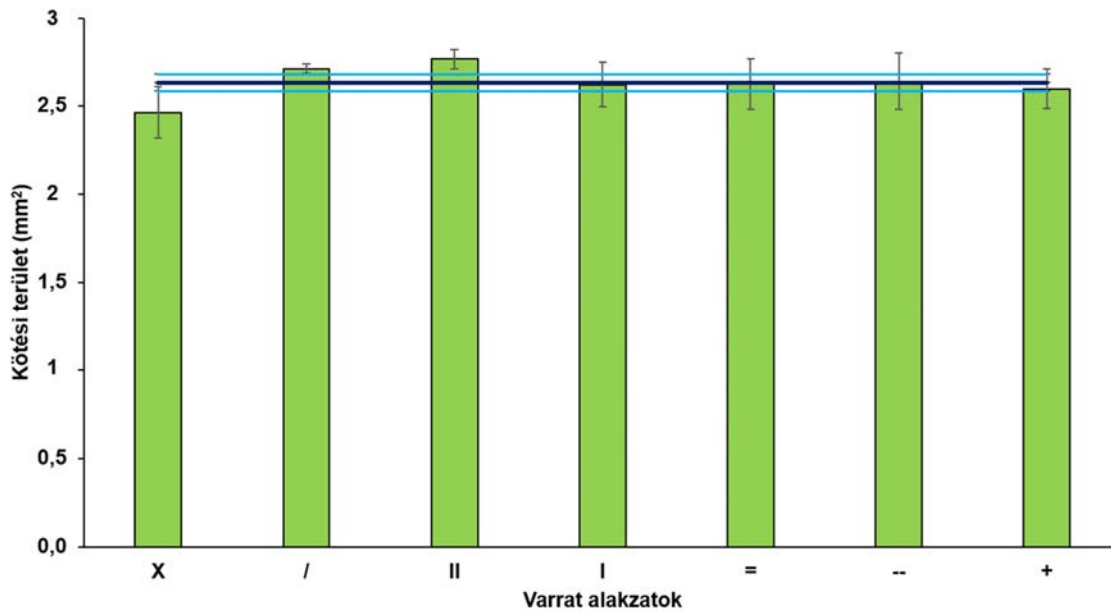
A következő alfejezetekben külön-külön tárgyalom az elektromos és mechanikai tulajdonságok viselkedését a különböző varrat geometriai paraméterekben bekövetkezett változásokkal összefüggésben.

6.1. A kötési keresztmetszet kialakításának optimalizálása

A fémlemezek lézerhegesztése átlapolt geometriai konfigurációban általában egyetlen, folyamatos egyenes vagy kör alakú vonalból áll, amely szimmetrikusan az átfedési terület közepén helyezkedik el. Egy adott varrathosszúság azonban számtalan mintázatban és szegmensre bontva megvalósítható. Mivel minden egyes lehetséges mintázat és konfiguráció mérése lehetetlen, úgy döntöttem, hogy kiválasztok néhány alap alakzatot, és ezekkel végzek kísérleteket. A vizsgálat kezelhetőségének érdekében csak központosan szimmetrikus és egyenes vonalakkól felépülő struktúrákat választottam, vagyis a varrat vagy varratok mindig középpontosan szimmetrikusak voltak, és a kötési terület geometriai középpontjában, a minták hosszabbik szélével párhuzamosan helyezkedtek el. A két összehegesztendő acél lemez közötti átfedést ennél a kísérletsorozatnál 16 mm-ben rögzítettem.

6.1.1. A varrat alakzat hatása

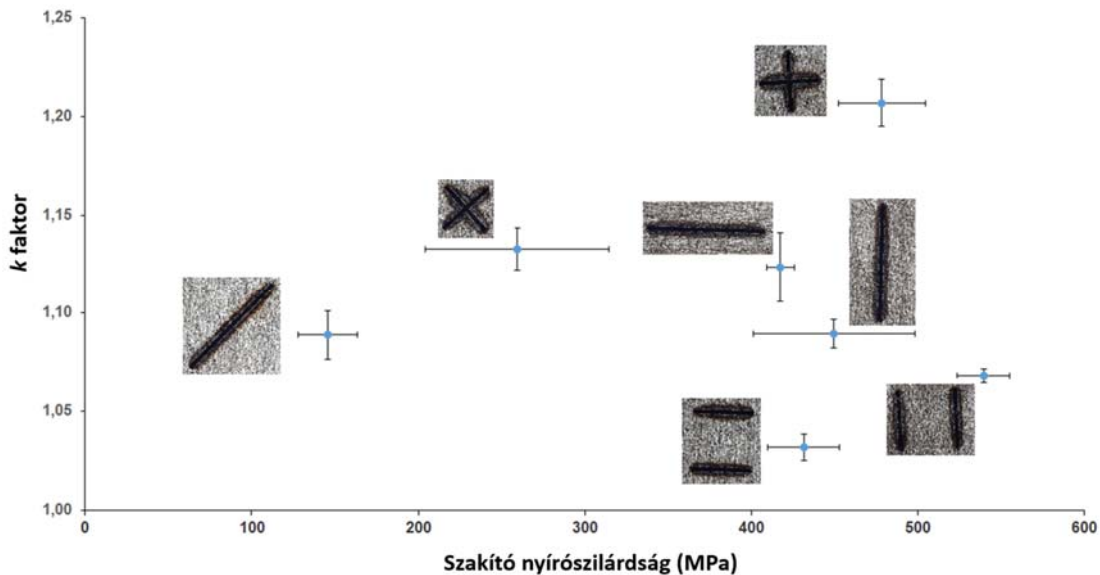
A hegesztési varrat alakzat hatásainak vizsgálatakor nagy jelentőséggel bírt, hogy a kötési területet állandó értéken tartsam. Ez az érték $(2,62 \pm 0,05) \text{ mm}^2$ volt. Az egyes alakzatokon mért értékek a 38. ábrán láthatók, az átlagot a vízszintes sötétkék vonal jelzi, amelyet kiegészítenek a 95%-os konfidenciaintervallumot jelző világoskék vonalak. Az egyes értékek 3 független mérési sorozat eredményeiből származnak.



38. ábra: A különböző varrat alakzatok kötési terület értékei

A kötési terület rögzítése után 7 különböző alap hegesztési varrat alakzatot készítettem, és megmértem azok elektromos és mechanikai viselkedését. Az eredmények a 39. ábrán láthatók. A szimbólumok a varratalakzatnak a mérő elektromos áramhoz viszonyított helyzetét jelzik. Példaként az "I" szimbólum a mérőárammal párhuzamos egyszeres varratot, a "=" szimbólum pedig az arra merőleges kettős varratot jelenti.

Az egyes varrat alakzatok k -faktorát ábrázoltam a mechanikai szilárdságuk függvényében annak érdekében, hogy a műszakilag előnyös tulajdonságok vizuálisan könnyebben azonosíthatók legyenek. Ebben az ábrázolásmódban az elektromos és mechanikai tulajdonságok szempontjából legjobb kötések a 39. ábra jobb alsó kvadránsában találhatóak.



39. ábra: A különböző alakzatú varratok k faktor értéke a szakító nyírószilárdság függvényében (Független mérések száma =3)

Megállapítható, hogy azok az alakzatok, amelyek több, a mérőáramáram irányával párhuzamos elemet tartalmaznak, nagyobb mechanikai szilárdsággal rendelkeznek. Például, ha az egyetlen merőleges varratot 90 fokkal elforgatjuk, az átlagos mechanikai szilárdság (419,1±10,1) MPa-ról (452,0±56,2) MPa-ra emelkedik. Ez összhangban van a várakozásokkal, mivel egy a mérőárammal párhuzamos varrat szegmensre nagyobb forgató nyomaték hat a mechanikai vizsgálatok során. A dupla párhuzamos varrat mintáknak volt a legnagyobb mechanikai szilárdsága, számszerűen (540,3±19,1) MPa.

Az elektromos tulajdonság szempontjából a dupla merőleges konfiguráció használata tűnik a legjobbnak, ez a konfiguráció (1,031±0,010)-es k -faktossal rendelkezik. Általánosságban elmondható, hogy a két, egymást nem fedő szegmensből előálló alakzatok használata jobb elektromos és bizonyos esetekben jobb mechanikai tulajdonságot eredményez. Például, ha kettős kötést használunk egyszeres helyett, a k faktor a párhuzamos esetben (1,089±0,011)-ről (1,067±0,002)-re, a merőleges esetben pedig (1,123±0,022)-ről (1,031±0,010)-re csökken.

A méréseim szerint a 45 fokos szögben elhelyezkedő varratok a többihez képest rosszabb elektromos és mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek. Ennek a változatnak a kvázi kettős konfigurációját használva az "x" alakzat javítja a mechanikai tulajdonságot, de csökkenti a vezetőképességet. Ha ezt az "x" alakzatot elforgatjuk, és egy "+"-ot alkotunk, a mechanikai szilárdság még nagyobb mértékben megnő, de az elektromos vezetőképesség tovább esik.

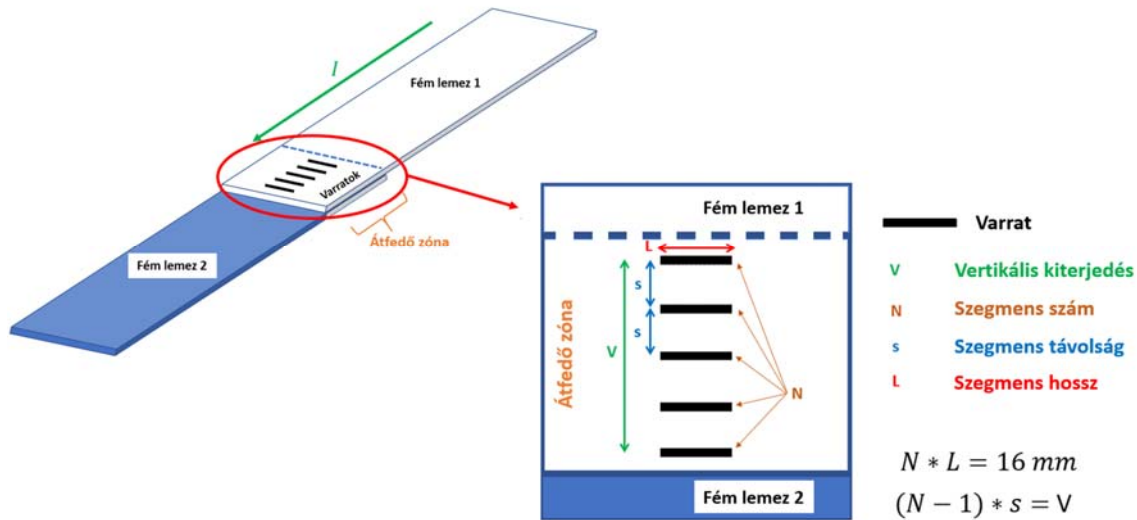
Azt is megfigyeltem, hogy ennél a (2,62±0,05) mm²-es kötési területnél az alapfém elektromos tulajdonságát nem lehetett felülmúlni, függetlenül a hegesztési varrat alakzatától. Azaz egyik alakzat sem tud 1-es k faktor érték alá jutni. [T3]

6.1.2. Többszörös kötések

Az előző szakasz eredményei alapján különös figyelmet fordítottam a többszörös kötésekre (azaz a több, nem átfedő, egymással párhuzamos szegmensből álló varratokra), és tovább vizsgáltam azokat.

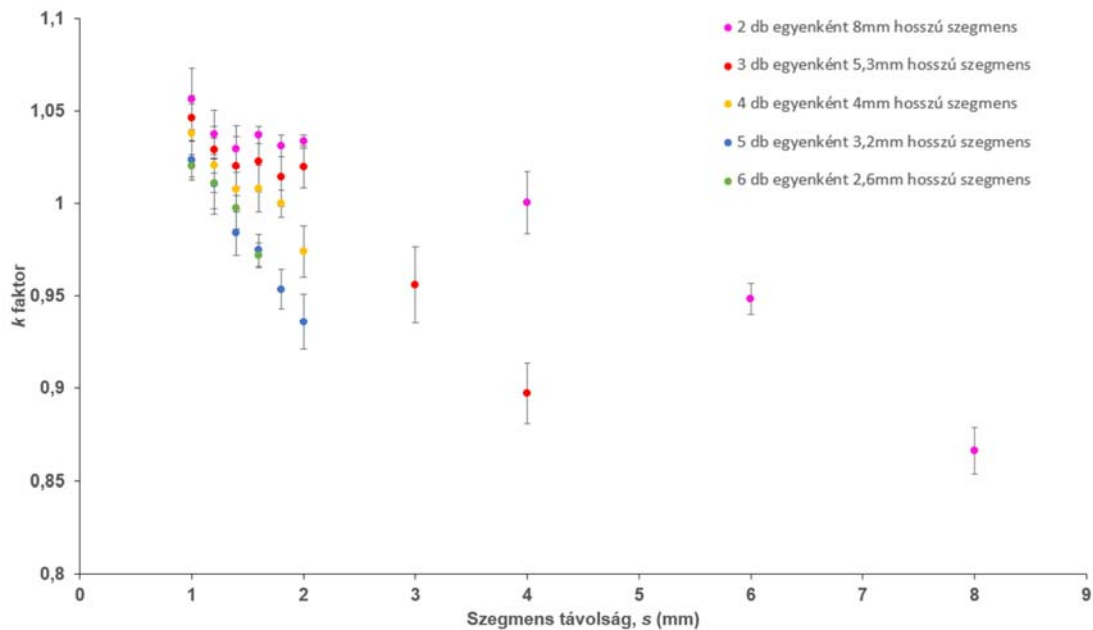
E vizsgálatok során elsősorban az elektromos tulajdonságra összpontosítottam, mivel az a mechanikai tulajdonsághoz képest sokkal látványosabb viselkedést mutatott. Következésképpen az elektromosan legjobban viselkedő alakzatot választottam ki kísérleti alanyként. Ez a mérőáram irányára merőleges alakzat típus volt, és ezen végeztem további vizsgálatokat és módosításokat.

Ezeknél a kísérleteknél is lényeges volt, hogy a teljes kötési területet továbbra is állandó értéken tartsam. További megfigyelésként azt is megállapítottam, hogy az egyes hegesztési varratszegmensek közötti távolság is befolyásolja a k faktort. Ennek mentén egy összesen 16 mm hosszúságú varratot 2-6 darab egyenlő hosszúságú szegmensre osztottam fel és azokat egymástól 1-8 mm azonos távolságokra helyeztem el, és vizsgáltam elektromos viselkedésüket. A varratszerkezet terminológiáját egy sematikus rajz segítségével az alábbi 40. ábrán mutatom be.



40. ábra: A többszörös varratok nevezéktana és az egyes aspektusok közti összefüggések

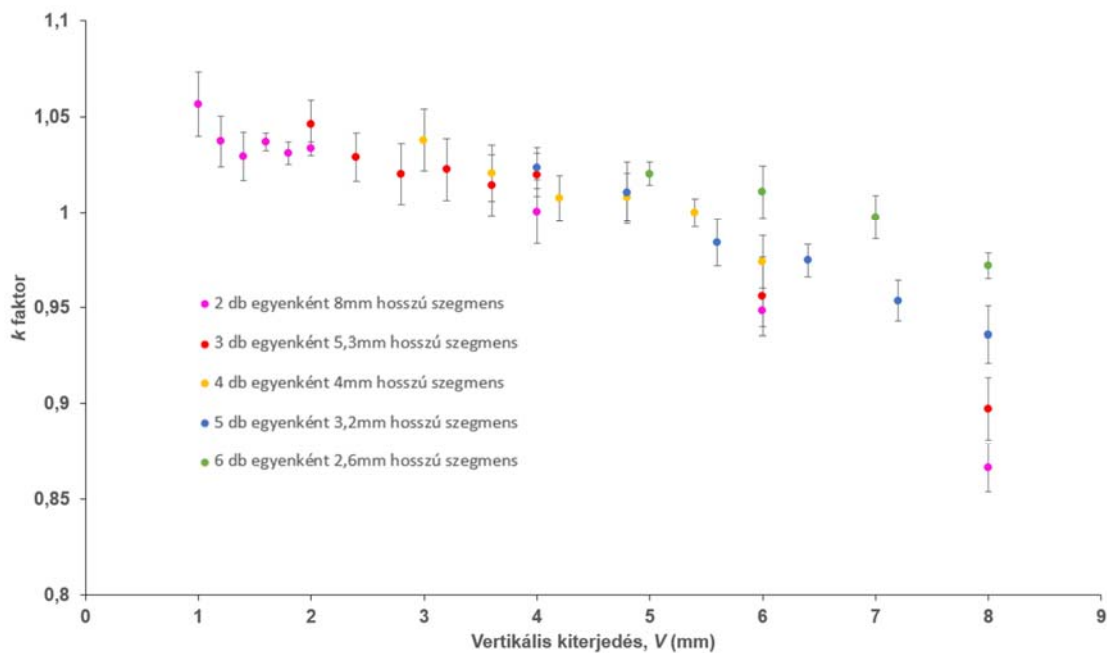
A 41. Ábra mutatja az elektromos mérések eredményeit többféle illesztési konfiguráció esetén.



41. ábra: Többszörös varratok k faktor értéke különböző varrat szegmensek közti távolságok esetén (Független mérések száma =3)

Azonnal megállapítható, hogy minden egyes szegmens szám esetén az egyes szegmensek közötti távolság növekedése a k faktor csökkenését eredményezte. A csökkenés mértéke az egyes esetekben jelentősen különböző, amely elsősorban az eltérő vertikális kiterjedés (V) értékeknek köszönhető. Például, ha egy 2 db 8 mm hosszú varratból álló varrat struktúrát használunk, és a 2 szegmens közötti távolságot 1 mm-ről 8 mm-re növeljük, a k faktor ($1,056 \pm 0,018$)-ról ($0,866 \pm 0,012$)-ra csökken, ami több mint 20%-os változást jelent!

A 41. ábrán bemutatott eredmények magyarázata az, hogy amint azt Hollatz és munkatársai elektromos szimulációi mutatják [81], az elektromos áram nagy része főként a hegesztési zóna szélein keresztül folyik. Ez ebben a konkrét esetben azt jelenti, hogy a két legkülső varrat szegmens dominál az elektromos vezetési folyamatban, és az esetleges belső szegmensek csak csekély mértékben járulnak hozzá a vezetéshez. Következésképpen, ezen reprezentáció helyett célszerű a grafikont alakítani olyan módon, hogy az elsődleges paramétert a legkülső szegmensek közötti távolságra, avagy a hegesztési varratstruktúra "függőleges kiterjedésére", azaz V -re cseréljük. Ez a grafikon a 42. ábrán látható.

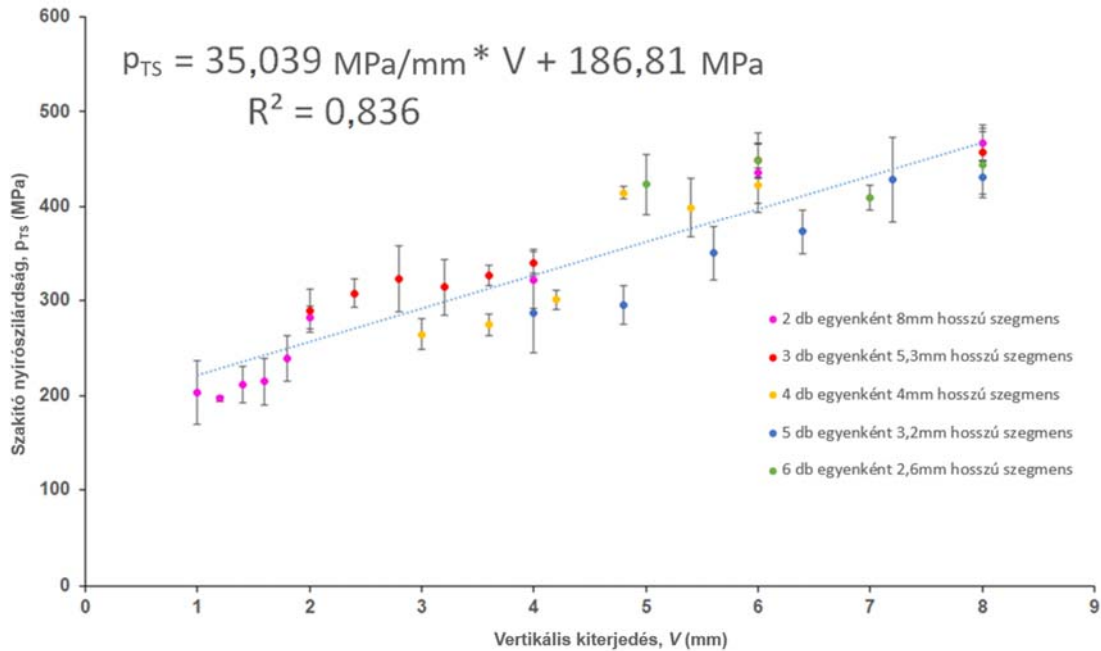


42. ábra: Többszörös varratok k faktor értéke különböző vertikális kiterjedés esetén (Független mérések száma =3)

Természetesen ez az ábrázolásmód is azt mutatja, hogy bármely adott hegesztési szegmenshossz esetén a legkülső szegmensek közötti távolság növelése az elektromos vezetőképesség jelentős növekedését eredményezi. A 42. ábrán azonban az is világosan látszik, hogy a varrat szegmensek hossza is jelentős faktor, nevezetesen minél hosszabb a szegmens annál alacsonyabb az elérhető minimális k faktor. Például, ha a függőleges kiterjedés 8 mm, és a varrat szegmensek hossza 8 mm-ről 2,6 mm-re rövidül le akkor a k faktor értéke fokozatosan $(0,866 \pm 0,012)$ -ről $(0,971 \pm 0,008)$ -re nő, ami több mint 10%-os növekedést jelent. Ugyanez a jelenség kisebb függőleges kiterjedésű értékeknél is megfigyelhető, bár az elektromos tulajdonság változása ilyenkor kevésbé jelentős.

Fontos megfigyelés, hogy ezen vizsgálatok során jellemzően 1,00-nál kisebb k faktor értékekkel jellemezhető kötések tudtam kialakítani, amely azt jelenti, hogy a kötött lemezpár ellenállása kisebb mint az alapfém ellenállása. Ez az akkumulátortechnológiai alkalmazások szempontjából rendkívüli fontossággal bír, ugyanis ez a cella-vezetősín kötések nagymértékű ellenálláscsökkenéséhez vezet amely által az akkumulátor pakk elektromos hatásfoka nagymértékben javítható.

Megjegyzem, hogy a mechanikai nyírószilárdság tekintetében az eredmények csak akkor mutattak egyértelmű, szignifikáns tendenciát, ha a kötések függőleges kiterjedésének függvényében ábrázoltam az adatokat, ahogyan az a 43. ábrán látható.



43. ábra: Többszörös varratok szakító nyírószilárdság értéke különböző vertikális kiterjedés esetén (Független mérések száma =3)

Ezek az eredmények összhangban vannak a hegesztési varrat alakzatának vizsgálatokor megfigyelt viselkedéssel, nevezetesen, hogy minél nagyobb a hegesztési varrat kiterjedése a tesztelő szakítóerő irányában, annál nagyobb a mért szilárdság. Ez a jelenség a vizsgálati módszerből ered, mivel a hosszabb függőleges kiterjedésű varratok ellenállóbbak a vizsgálat során fellépő nyomatékkkal szemben.

Érdekes az illesztett egyenes y tengellyel alkotott metszéspontját is elemezni. A nulla függőleges kiterjedés szélsőséges esete úgy értelmezhető, mintha a két varrat szegmens átfedésbe kerülne egymással, így középen egyetlen hegesztési varratot alkotna. Ilyen esetben a két kötési terület is átfedésben van, és ennek eredményeként a hegesztési varratok teljes kötési területe az eredeti érték felévé válik, ami $2 \times 186,81 \text{ MPa} = 373,6 \text{ MPa}$ szilárdságot eredményez, ami jó közelítéssel megegyezik, a minta geometriai középvonalában elhelyezett egyetlen merőleges hegesztési varratokra meghatározott értékkel ($419,1 \pm 10,1 \text{ MPa}$). [T3]

6.2. A kötési terület növelésének hatása

A kötési terület alakzatának optimalizálása mellett egy másik triviális módszer a kötési tulajdonságok javítására a két fémlemez közötti kötési terület méretének növelése.

Az kötési területet az egyéb paraméterek állandóan tartása mellett, két módon lehet növelni:

- A kötés hosszának növelésével
- A kötések számának növelésével

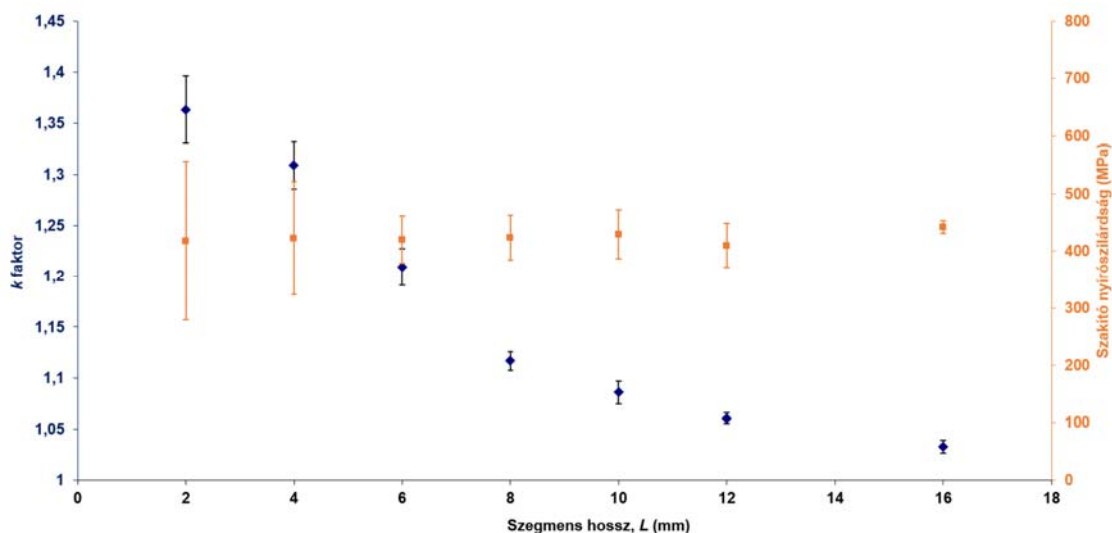
Természetesen a hossz növelése sokkal korlátozottabb lehetőség a hegesztendő fémlemezek véges szélessége miatt. A hegesztési varratok számának növelése ezzel szemben sokkal szélesebb paraméter tartományt biztosít, feltéve, hogy a lemezek között elegendő átfedés van. A két módszer természetesen egyszerre is alkalmazható.

A két módszer kötési tulajdonságokra gyakorolt hatását a következő alfejezetekben tárgyalom. [T3]

6.2.1. A varrathosszúság hatása

E kísérletekhez egyetlen, az acéllemezpár szimmetria középvonalában, szimmetrikusan elhelyezett hegesztési varratot készítettem különböző hosszúságban, L .

Az elektromos és mechanikai mérésekből származó eredmények a 44. ábrán láthatók. A varrat hosszát 2 mm-től 16 mm-ig változtattam, az utóbbi esetben a mintát a teljes mintaszélesség mentén hegesztettem meg.



44. ábra: A k faktor és a szakító nyírószilárdság függése a varrat szegmensek hosszúságától egyszeres varratok esetén (Független mérések száma =3)

Ezen eredmények szerint a k -faktor a kötési hossz növekedésével 1,03 körüli értékhez tart. Az is érdekes, hogy miután a varrathossz eléri a 8 mm-t (a minta szélességének a felét), a k faktor csökkenésének üteme lelassul. A viszonylag magas szórás a 6 mm-nél rövidebb kötéshosszúságoknál abból ered, hogy rövidebb lézer besugárzási időnél a hegesztési folyamat reprodukálhatósága kissé romlik a lézer indításának instabilitása miatt.

A mechanikai tulajdonság tekintetében elmondható, hogy a minták szilárdságát nem befolyásolta a hegesztési varrathossz, az átlagosan $(427 \pm 58,8)$ MPa körül maradt. Itt is megjegyzem, hogy a rövidebb kötések magasabb hibasávjai magából a lézerhegesztési eljárás

tulajdonságából, illetve a kisebb kötési keresztmetszetek bizonytalanabb mikroszkópos képfeldolgozási meghatározásából származnak. [T3]

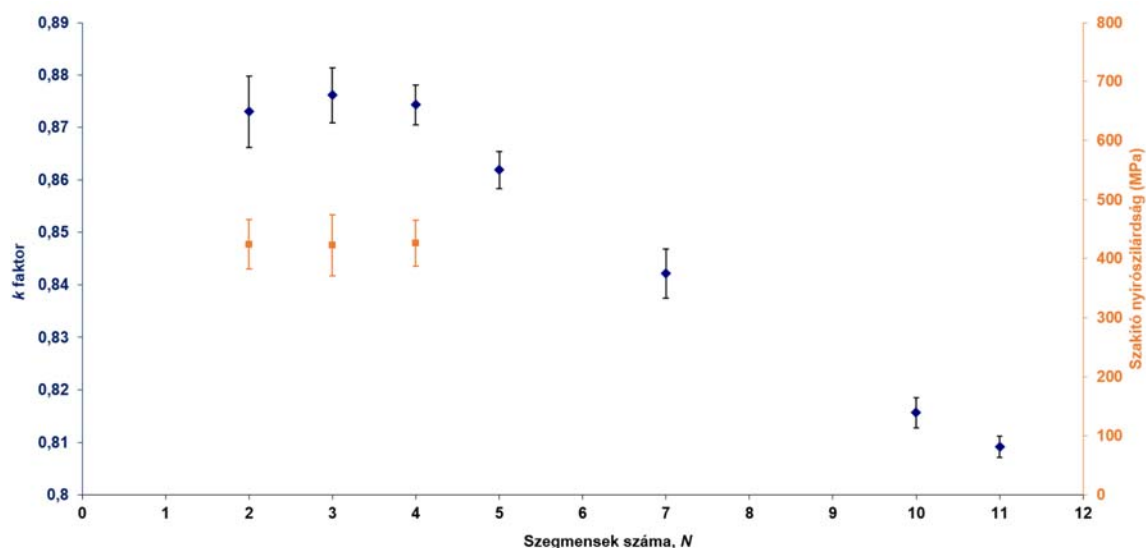
6.2.2. A varratszámosság hatása

A másik módszer a kötési terület növelésére a hegesztési varratok hosszának növelésén kívül a szegmensek számának növelése. Ehhez a kísérletsorozathoz 8 mm hosszú, egymással párhuzamos varrat szegmensekből álló struktúrákat állítottam elő minden egyes minta esetében annak középvonalára szimmetrikusan, azonos távolsággal az egyes szegmensek között.

Kísérleteim során ügyeltem arra, hogy a kötési terület jó közelítéssel lineárisan függjön a szegmensek számától, vagyis a 4 szegmenst tartalmazó minták kötési területe négyszer akkora legyen, mint az egy szegmenst tartalmazó mintáké. Másként, törekedtem az identikus szegmensek minél tökéletesebb létrehozására.

Fontos volt továbbá az is, hogy a korábbi megfigyelésekkel összhangban a hegesztési varratok vertikális kiterjedését (V) 10 mm -es értéken tartsam, hogy kiküszöböljem az ennek megváltozásából eredő esetleges hatásokat. Ez a praktikus azt jelentette, hogy a legszélső két varrat egymástól mért távolsága állandó 10 mm volt és az ezen felül létrehozott varratok a fennmaradó térrészt egyenközű felosztás mellett töltötték ki.

Az elektromos és mechanikai mérések eredményei a 45. ábrán láthatók.



45. ábra: A k faktor és a szakító nyírószilárdság függése a varrat szegmensek számosságának függvényében azonos varrathossz esetén (Független mérések száma =3)

Érdekes megfigyelés, hogy a szegmensek számosságának növelése (4-es szegmens számig) hibahatáron belül nem eredményezi a k faktor csökkenését. Ezt a korábban már említett peremáram effektus okozza [81]. S. Hollantz és munkatársai numerikus egyenértékű áramköri modellezési számításai szerint egy vagy két varrat szegmens esetén az elektromos áram nagy része továbbra is a hegesztett terület szélein (gyakorlatilag az első és az utolsó szegmensen) folyik át. Ez magyarázza, hogy a viszonylag kis szegmens számú varratok (2,3,4 és 5 szegmens) k faktorai miért hasonlítanak egymáshoz. A kísérleti eredmények azonban azt is mutatják, hogy a szegmensek számának egy nagyságrenddel történő növelésekor (1->10 db) a k faktor akár

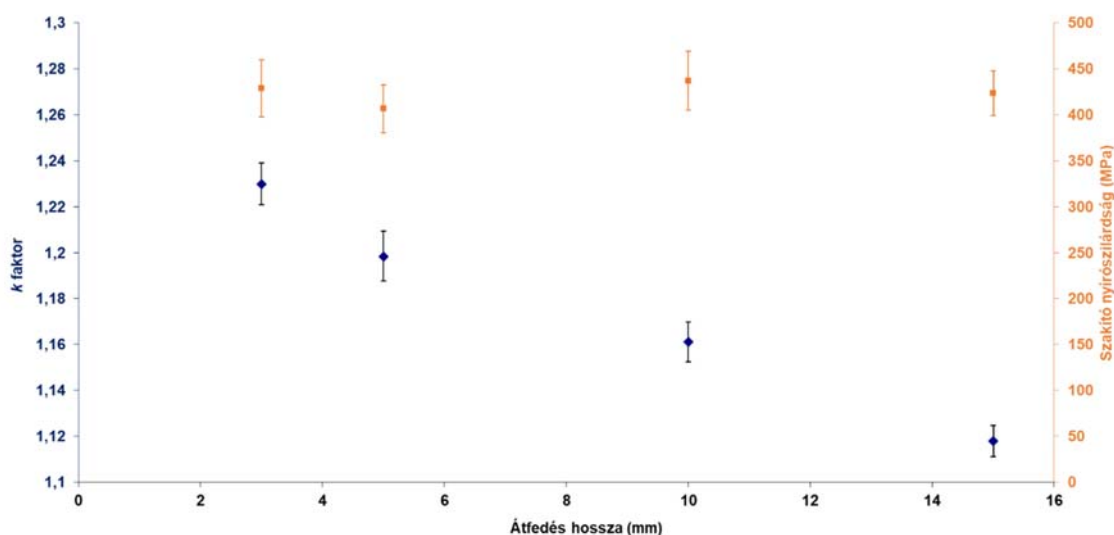
számottevő mértékben is csökkenhet. Ez azt jelzi, hogy az élektől távolabb eső, belsőbb szegmenseken is érzékelhető áram kezd folyni, és ezek is részt vesznek az elektromos vezetésben. Ennek a k faktorban bekövetkező $(0,875 \pm 0,009)$ -ről $(0,811 \pm 0,003)$ -re történő csökkenésnek a mértéke azonban azt jelzi, hogy ez a hatás marginális, a vizsgált tartományban hozzávetőlegesen 10%, és ez a nyereség nem biztos, hogy elegendő, az ehhez szükséges extra gyártási folyamatok indokaként.

Ezeknek a mintáknak a mechanikai vizsgálata korlátozott volt, mivel azok a hegesztések, amelyek kötési területe meghaladott egy kritikus értéket, nagyobb erőt tudtak elviselni, mint az alapfém, ami az alapfémen belüli töréshez vezetett. Ilyen esetekben a lemezpár szétszakítása nem a kötést hanem a lemezpár anyagát jellemző szilárdságértéket adott. Ezért csak azokat a mintákat lehetett mechanikai szempontból megvizsgálni, amelyeknek legfeljebb 4 szegmensből álltak. Ettől a körülménytől függetlenül a grafikon alapján megfigyelhető, hogy a kötések szakító nyírószilárdsága nem függött azok szegmensszámától, mivel az eredmények minden esetben (424 ± 21) MPa szilárdság körül szórtak. [T3]

6.3. Az átfedő, de nem hegesztett lemezterületek méretének hatása

Ebben az alfejezetben a kötési terület növelésének egy alternatív módját tárgyalom, amely nem magához a hegesztési folyamathoz, hanem a hegesztendő darabok kezdeti beállításához kapcsolódik. Ez a paraméter a fémlemezok közötti hegesztéssel nem érintett átfedő terület mérete. Bár a nem hegesztett átfedő fémlemezok praktikusán külön álló egységek, az összeérintkezésükből fakadó közvetlen fémes kontaktus révén mégis hozzájárulhatnak az elektromos vezetéshez.

Az ezen faktor által kiváltott hatások könnyen megvizsgálhatóak a lemezek átfedési hosszának megváltoztatásával. A hegesztett mintákat minden esetben szimmetrikusan készítettem el a korábban leírtak szerint, 8 mm hosszúságú a mérőáram irányára merőleges orientációjú kötéssel. A mechanikai és elektromos vizsgálatok eredményeit a 46. ábra mutatja be.



46. ábra: A k faktor és a szakító nyírószilárdság különböző lemezátfedések esetén (Független mérések száma =3)

A várakozásoknak megfelelően a hegesztetlen részek mérete nem befolyásolja érdemben a mechanikai tulajdonságot, azonban észrevehető hatással van az elektromos tulajdonságra. Ha ezt az átfedő területet 32 mm^2 -ről 240 mm^2 -re növeljük, a teljes kötés k -faktora 9%-kal csökken. Ebben a tekintetben a még mindig elektromos kontaktusban lévő hegesztetlen részek területének maximalizálása előnyös lehet az alacsonyabb k -faktorú kötések elérése érdekében.

Egy további megjegyzés, hogy az átfedési terület méretének növelése a hegesztési varrat struktúrák területének növelése szempontjából is kedvező, sőt, igen nagy kiterjedéssel rendelkező alakzatok megvalósítása is lehetségessé válhat ilyen módon.

6.4. A geometriai optimalizálási lehetőségek összevetése

A varrat tulajdonságainak optimalizálását a legtöbb esetben a hegesztési folyamatparamétereinek - mint például a beeső lézerteljesítmény, a pásztázási sebesség, a nyaláb átmérője, a beesési szög stb. - függvényében végzik. Ennek oka, hogy ezek a paraméterek közvetlen és jelentős hatással vannak a hegesztési varratok kialakulására. A hegesztési terület és maga a hegesztési varrat azonban számos olyan paraméterrel rendelkezik, amelyek bizonyos mértékig szintén hozzájárulnak a hegesztett kötés végső ellenállásához vagy szilárdságához, így alternatív módot biztosítanak az optimalizálás elvégzésére.

A lemezek átlapolts geometriában történő lézeres hegesztésének egyik sajátossága, hogy rendkívül változatos geometriájú varratok hozhatók létre az átfedő terület felszínén. Ebből triviálisan adódik a lehetőség a lézeres hegesztési varratok geometriai optimalizálására.

Ebből fakadóan számos olyan kötés optimalizálási lehetőséget vizsgáltam meg, amelyek a hegesztési zóna konfigurációjához és egyéb tulajdonságaihoz (úgy mint például a varrat szegmens számosság, hosszúság, orientáció, stb.) kapcsolódnak. A különböző körülményeket független mérési sorozatokban vizsgáltam, és tárgyaltam az elektromos, illetve mechanikai tulajdonságra gyakorolt hatásukat.

A 9. táblázatban összefoglaltam a különböző optimalizálási megközelítések által eredményezett javulások mértékét mind az elektromos, mind pedig a mechanikai tulajdonság tekintetében. A táblázatban megadott javulást/nyereséget a következőképpen definiáltam:

$$Javulás = \frac{Legjobb\ érték - Legrosszabb\ érték}{Legrosszabb\ érték} \quad (3)$$

Fontos megjegyezni, hogy a k faktorok esetében az alacsonyabb érték kedvezőbb állapotot, ebből fakadóan a táblázatban szereplő negatív nyereség ilyen tekintetben javuló tendenciát jelent. Ezzel szemben a szakító nyírószilárdság esetén a magasabb érték jelzi a jobb mechanikai tulajdonságot így ott a pozitív nyereség indikálja a javuló tendenciát.

		Varratok alakja				Varratok területe			
		Általános alakzatok		A dupla varrat konfiguráció optimalizálása		Szegmens hossz		Szegmens szám	
k faktor	Legjobb	1,031±0,006	0,866±0,012	V(mm) 8	1,032±0,006	V(mm) -	0,809±0,002	V(mm) 10	
				N 2		N 1		N 11	
				s (mm) 8		s (mm) -		s (mm) 1	
				L (mm) 8		L (mm) 16		L (mm) 8	
	Legrosszabb	1,207±0,012	1,056±0,016	V(mm) 1	1,363±0,033	V(mm) -	0,876±0,005	V(mm) 10	
				N 2		N 1		N 3	
s (mm) 1				s (mm) -		s (mm) 5			
L (mm) 8				L (mm) 2		L (mm) 8			
Nyeresség		-15%	-18%	-24%	-8%				
Szakító nyírószilárdság (MPa)	Legjobb	539,6±15,6	466,9±19,1	V(mm) 8	442±11,15	V(mm) -	426±41,5	V(mm) 10	
				N 2		N 1		N 4	
				s (mm) 8		s (mm) -		s (mm) 3,3	
				L (mm) 8		L (mm) 16		L (mm) 8	
	Legrosszabb	145,7±17,5	197,1±1,7	V(mm) 1,2	410±38,5	V(mm) -	422±51,9	V(mm) 10	
				N 2		N 1		N 3	
s (mm) 1,2				s (mm) -		s (mm) 5			
L (mm) 8				L (mm) 12		L (mm) 8			
Nyeresség		+270%	+136%	+8%	NA				

9. Táblázat: A k faktor és a szakító nyírószilárdság nyereségek a tárgyalt optimalizációs aspektusok szerint. A vertikális kiterjedés (V), szegmens szám (N), szegmens távolság (s) és szegmens hossz (L) értékek feltüntetésével (ahol értelmezhető)

Eredményeim alapján a hegesztési varrat alakzat nagy hatással van a hegesztett minták mechanikai szilárdságára. Ezt bizonyítják azok az eredmények, amelyek szerint a legjobb és a legrosszabb minták összehasonlításakor a szakító nyírószilárdság közel háromszorosára nő. Ezenkívül az alakzatnak jelentős szerepe van az elektromos viselkedésre is. Megfigyelhető, hogy a vizsgált alakzatok közül a több egyenes szegmensből álló hegesztési alakzatok jelentős javulást eredményeznek mind az elektromos, mind pedig a mechanikai tulajdonság tekintetében. A vizsgált paramétertartományon belül a legjobb és legrosszabb dupla hegesztési konfigurációk +136%-os, illetve -18%-os relatív javulást mutattak a mechanikai és elektromos tulajdonság esetében. A hegesztési varratok területének a fent említett tulajdonságokra gyakorolt hatását tekintve a szakító nyírószilárdsági értékekre alig, míg az elektromos tulajdonságra jelentős hatással van. Például a legrövidebb és a leghosszabb vizsgált egyszeres hegesztési varratok k faktorai több mint 20%-kal különböznek, miközben mechanikai értelemben a változás a 10%-ot sem éri el [T3].

6.5. Az eredmények tézisszerű összefoglalása

Eredményeim alapján, a DC01 acélszalagokon lézerrel kialakított varratok geometriai szempontból történő vizsgálata során a következő megállapításokat tettem:

4. Kísérletileg igazoltam, hogy a 0,5mm vastagságú DC01 acéllemezek átlapoltszerű 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±0,010 k faktor) és legmagasabb szakító nyírószilárdsága (540,3±19,1 MPa) azon alap alakzatoknak van, amelyek rögzített kötésikeresztmetszet 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]

7. ÖSSZEFOGLALÁS

7.1. 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 testeszabhatósága, automatizálhatósága és gyártástechnológiákba 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 lézerhegesztési eljárás ugyanakkor számottevő javulást tud eredményezni az akkumulátor pakkok összeállításának legalacsonyabb szintjein, amelyek a nagy cella számosság miatt összességében igen jelentős javulást eredményezhetnek [18,26,27].

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 [55,63,64].

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 olvadékmédecében és valamennyi hőterhelt zónában egyidejűleg lejátszódó folyamat együttesen befolyásolja. Praktikusan szinte mindegyik folyamat külön-külön nyomkövethető 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.

7.2. 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 figyelhetők meg a lézerhegesztett minták felszínén a megmunkálás után elsősorban az olvadék áramlástani 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.

7.3. 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 nikkell 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.

7.4. 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 kuleslyuk, 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 kötésikeresztmetszet 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 számasságának növelése a kötés szakító nyírószilárdságát tekintve nem hoz számottevő javulást. [T3]

7.5. Kitekintés

Az akkumulátorcsomagokban a kötések ohmos ellenállása okozta veszteségek minimalizálása érdekében a gyűjtősínek anyaga valamilyen alacsony fajlagos ellenállású fém, tipikusan réz vagy alumínium. A cellák burkolatának anyaga, elsősorban költséghatékonysági szempontok miatt, valamilyen acélból vagy rozsdamentes ötvözetből készül. Az értekezésben részletezett eredményeim egyik újdonság eleme az, hogy azokat a paraméterablakokat és varrat alakzatokat kerestem, amelyekben, illetve amelyek megvalósításával acélok autogén hegesztésével készített varratok nagy mechanikai szilárdság mellett a legalacsonyabb ellenállást mutatják. Ugyanakkor megtettem a kezdő lépéseket annak demonstrálására is, hogy az általam alkalmazott közelítés a kötések elektromos és mechanikai viselkedésének együttes optimalizációjára eltérő vastagságú és/vagy eltérő anyagi minőségű lemezek egymáshoz kötése esetére is célravezető lehet.

Első közelítésként megmutattam, hogy az általam alkalmazott lézeres megmunkáló rendszer(ek) lehetővé tesznek olyan lézer teljesítmény és szkennelési sebesség tartományokat, amelyeken belül sárgaréz, alumínium, valamint acél lemezek akár különböző vastagságban is hegeszthetők, mind autogén, mind pedig heterogén módon. Kezdeti eredményeimből néhányat a 47. ábrán mutatok be.

Lemez 1	0,25 mm vastag Hilumin®	0,25 mm vastag Hilumin®	1 mm vastag szénacél	0,25 mm vastag Hilumin®	0,25 mm vastag Hilumin®
Lemez 2	0,5 mm vastag rozsdamentes acél	1 mm vastag sárgaréz	0,25 mm vastag Hilumin®	0,25 mm vastag Hilumin®	1 mm vastag alumínium
Lézerteljesítmény és előtolási sebesség	250 W, 50 mm/s	250 W, 16 mm/s	400 W, 50 mm/s	200 W, 50 mm/s	250 W, 50 mm/s
Fotó					

47. ábra: Néhány eltérő tulajdonságú lemez hegesztése és a hozzájuk tartozó hegesztési paraméterek. A lézer megvilágítás minden esetben a „Lemez 1” sorban látható anyag felől történt.

Ezen kötések elektromos és mechanikai viselkedésének optimalizálása, ami nyilván logikus kiterjesztése lenne eddigi munkámnak, kifejezetten alkalmazás-orientált projektek részét képezhetné. Ilyen irányú vizsgálataim első körben rendkívül ígéretesnek bizonyultak, amennyiben rávilágítottak arra, hogy a DC01 illetve Hilumin® lemezeken megszerzett tapasztalatokra támaszkodó közelítés ezekben az esetekben is működőképes, a létrehozott kötések mechanikai és elektromos viselkedése kontrollálhatóan hangolható.

8. SUMMARY

8.1. Introduction

In the assembly of battery packs for modern vehicles with hybrid or pure electric drive systems, permanent bonding technologies are gaining exceptional attention for various economic and practical reasons. Among these, the various welding processes, including laser welding, are also attracting particular attention. First of all, because of their wide range of customisation, automation and integration into production technologies [1-3].

However, laser welding technology is a relatively complex process with an exceptionally large number of degrees of freedom and parameters, and optimising and perfecting it for a given problem is a highly problematic and complex task. A properly optimised laser welding process can, however, achieve significant improvements at the lowest levels of battery cell assembly, which, due to the large cell number, can result in very significant overall improvements [18,26,27].

The optimisation of laser welding for battery technology applications is complicated by the fact that the concomitant electrical and mechanical behaviours of the welding processes is a rather new and rarely investigated field of research and development. Accordingly, there is currently no standardised measurement procedure or characterisation method for the simultaneous electrical and mechanical characterisation of laser welds [55,63,64].

Consequently, for most welding processes, the simultaneous optimisation of joints from both electrical and mechanical aspects is a problem, which is a critical aspect for battery technology applications.

As a result, the subject of my thesis is a comprehensive study of deep penetration laser welds produced on steel plates from an electrical and mechanical point of view.

The quality and properties of welds are influenced by a number of processes occurring simultaneously in the melt pool and in all the heat affected zones during their formation. In practice, almost all of these processes can be monitored individually and used to predict the quality of the weld after the laser welding process or, in some cases, during the laser welding process. The combined effect of these processes not only remains solidified inside the weld, but also on the surface of the weld, resulting in visually different weld morphology depending on the process parameters.

The realisation that this inherent property (bead morphology) of laser welds can be consciously applied to optimise welds from a mechanical as well as an electrical point of view is the result of my own research.

In addition, I have extensively investigated the possibilities of optimizing welds through geometric parameters such as weld contour, segment number, segment length, segment spacing and vertical extent.

8.2. Objectives

The first results of my experiments have shown that there are many possibilities to optimize laser deep penetration welding for battery technology applications. These opportunities arise mainly from the flexibility and versatility of the technique and the extreme complexity of the process in physical terms.

In designing my experiments, my primary objective was to jointly optimise the electrical and mechanical properties of welds created in a homogeneous manner (i.e. both strips of the same material) on metallic strips with overlapping joint geometry.

It is well known that there are basically two ways of optimising the properties of welds created by laser welding. The most commonly used and simpler method is optimisation by directly varying the laser and other additional parameters. The other method is to optimise the joint contour and configuration with fixed laser parameters, where the possibilities are limited in two dimensions only by the imagination.

Based on previous observations, different weld morphologies can be observed on the surface of laser welded samples after machining due to variations in laser parameters, mainly due to melt flow. One of the aims of my research was to investigate the relationship between laser parameters and the morphological classes that develop in plate materials and to investigate in detail the characteristic electrical and mechanical properties of each class.

Finally, the aim of my research was to optimize the electrical and mechanical properties of laser welds independently of the laser parameters. In other words, to observe regularity and tendency behaviour during the systematic variation of the contour of the welds.

8.3. Materials and methods

In my experiments, I used a self-built 400W maximum power fiber laser welding system (SPI SP-400C-0005: 1071 nm wavelength, 400 W maximum power, unpolarised, $M2 = 1.08$) and a professional 1000W maximum power welding station (Trumpf Trufiber 1000: 1075 nm wavelength, 1000 W maximum power, unpolarised beam $M2 = 1.2$). I have created seam laser welds on 0.5 mm thick cold-rolled DC01 steel strips and 0.25 mm thick nickel-coated stainless-steel strips in overlapped joint geometry.

For the electrical testing of the laser welded specimens, a four-point resistance method (Keithley 2401, with a measurement accuracy of 0.1% over the voltage range used for our experiments) with an external power supply (TTi CPX200, with an accuracy of 1.1% for the maximum current of 10 A used in the measurement process) was used. For the mechanical tests, I used a mechanical tensile tester (Tinius Olsen H5KT) and a digital 3D microscope (Olympus DSX510). The digital 2D and 3D images were evaluated manually in ImageJ software. I supplemented my investigations with Vickers microhardness measurements (Reichert microhardness microscope) and preparing grindings. I also created a physical model using Comsol software to gain a deeper understanding of the electrical flow processes.

8.4. New scientific results

1. As an approximation not previously used in the literature, the concomitant electrical and mechanical behaviour of the welds produced by autogenous welding of 0.5mm thick cold-rolled DC01 steel plates in a lap joint geometry was investigated by me. When investigating solely the electrical resistance, I found that the scanning speed ranges of 20-75, 50-150, 50-200, 50-220 and 50-240 mm/s are the most suitable parameter windows for producing samples with extremely low electrical resistance and excellent reproducibility (1.09 ± 0.05 k factor) at incident laser powers of 300, 400, 600, 800 and 1000 W, respectively. Specimens prepared in the scanning speed ranges 50-75, 50-175, 50-200, 50-200 and 50-600 mm/s are considered to be

intermediate and exhibit a nearly constant (255 ± 6 MPa) tensile shear strength. When taking both properties into consideration, my results demonstrate that the scanning speed ranges of 50-75, 50-150, 50-200, 50-200 and 50-240 mm/s are optimal for the DC01 model system under investigation. [T1, T2]

2. I have shown that autogenous laser welding of 0.5 mm thick cold-rolled DC01 steel plates in a lap joint geometry in the 200-1000W power and 0.1-1100mm/s scanning speed window can result in five distinct seam morphology types (Rosenthal, single-wave, elongated keyhole, pre-humping and humping) that appear in the same scan speed sequence as previously described by Fabbro for laser processing of bulk materials only. I have specified where each morphology type appears in the power - scan speed plane, and have assigned a distinct electrical and mechanical behaviour to each of the five morphology types. [T2]

3. The results of my repeated experiments on 0.25 mm thick Hilumin® plates gave the same morphology map as measured on the DC01 model system, beyond the differences induced by the difference in material properties, demonstrating that my results are generalizable. [T2]

4. I have experimentally demonstrated that when autogenous laser welding of 0.5mm thick DC01 steel plates in lap geometry (400 W incident laser power, 50mm/s scanning speed 1075 nm wavelength, 0.35 mm spot diameter) is conducted, among the basic weld shapes I have investigated with a fixed joint cross-section (parallel line, perpendicular line, X, +, /, double perpendicular and double parallel lines), the ones with the lowest electrical resistivity (factor 1.031 ± 0.010 k) and the highest tensile shear strength (540.3 ± 19.1 MPa) are those consisting of at least two independent (non-overlapping) segments. [T3]

5. When producing laser welds consisting of multiple parallel segments in autogenous configuration (400 W incident laser power, 50 mm/s scan speed, 1075 nm wavelength, 0.35 mm spot diameter) on 0.5 mm thick DC01 steel plates, by systematically varying the segment length of each weld between 2.6-8 mm and their spacing between 1-8 mm, while keeping the total length constant at 16 mm, I determined the k factors and tensile shear strength of the patterns thus defined. I found that for shapes consisting of multiple parallel straight segments, the distance between the outermost segments (the vertical extent of the seam geometry) correlated with the electrical and mechanical behaviour of the welds. [T3]

6. When producing autogenous laser welds on 0.5mm thick DC01 steel plates in lap geometry (400 W incident laser power, 50mm/s scanning speed, 1075 nm wavelength, 0.35 mm spot diameter), I determined that the welds consisting of multiple, identical 8 mm long parallel segments can only achieve a significant improvement (more than 10%) in the k factor, indicating electrical conductivity, compared to the standard single weld, if the number of welds is increased from one to at least ten. However, increasing the number of segments does not yield a significant improvement in the tensile shear strength of the joint. [T3]

8.5. Outlook

Since electrical conductivity is a very important aspect of battery cell bonding, often a low resistivity element such as copper or aluminium is chosen as the material for the busbars.

In contrast (mainly for reasons of cost-effectiveness), the cell casing material is made of steel or a stainless alloy.

In the case of laser welding, it is also possible to join plates of different thicknesses or even different material qualities.

To demonstrate this, ranges of laser power and translation speed have been defined within which brass, aluminium and steel plates of different thicknesses can be welded, both autogenously and heterogeneously (see Figure 1).


Sheet 1	0.25 mm thick Hilumin®	0.25 mm thick Hilumin®	1 mm thick carbon steel	0.25 mm thick Hilumin®	0.25 mm thick Hilumin®
Sheet 2	0.5 mm thick stainless steel	1 mm thick brass	0.25 mm thick Hilumin®	0.25 mm thick Hilumin®	1 mm thick aluminium
Laser power and translation speed	250 W, 50 mm/s	250 W, 16 mm/s	400 W, 50 mm/s	200 W, 50 mm/s	250 W, 50 mm/s
Photo					

Figure 1: Welding of some plates with different properties and their welding parameters. In all cases, the laser illumination was from the material shown in row "Sheet 1".

This study represents a very important orientation for further, application-oriented studies in the future. My studies of this kind have been very promising in the first instance and have also proved useful in that they have shown that it is possible to make predictions about the bonding properties in such cases based on the experience gained with DC01 and Hilumin® plates.

9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm témavezetőmnek, Dr. Geretovszky Zsoltnak a rengeteg munkát és szakmai támogatást amit doktori tanulmányaim során biztosított. Hálás és büszke vagyok, hogy az immáron több mint 10 éves közös munka során minden kutatással kapcsolatos tudást és szemléletet az ő közreműködése révén tudtam elsajátítani.

Különleges köszönet illeti Dr. Szörényi Tamást aki szintén témavezetői szintű feladatokat látott el doktori tanulmányaim szinte teljes ideje alatt. Tamástól nem csak szakmai, de emberi értelemben is felbecsülhetetlen mértékű támogatást és segítséget kaptam, amelyre a végcél elérése érdekében nem egyszer igen nagy szükség volt.

Köszönettel tartozom Dr. Vass Csabának is aki a doktori munkám kezdeti szakaszában töltött be társtémavezetői funkciókat és fontos szerepet játszott az irodalomfeldolgozás és meréstechikák kidolgozásában egyaránt.

Óriási köszönet illeti Körmöczi Andort, PhD társamat és jó barátomat akivel közösen éltük meg a doktori kutatómunka valamennyi örömét és nehézségét. Ahol tudtuk mindenben messzemenőig segítettük egymás munkáját mind emberileg mind szakmailag egyaránt.

Köszönet illeti továbbá a Bólyai épület 223-as számú PhD szobájának valamennyi volt és jelenlegi tagját akik hozzájárultak a jó hangulat és a barátságos munkalétkör kialakításához valamint fenntartásához. Közülük külön kiemelném régi jó barátomat Tankó Szilárd Lázárt, H. Kovács Bálintot és természetesen Bíró Pétert aki rövid kávászüneteiben gyakran adott hasznos munkával kapcsolatos ötleteket.

Köszönettel tartozom a Dunaújvárosi Egyetem, Természettudományi és Környezetvédelmi Intézetének munkatársainak akik a lézerhegesztett minták csiszolatainak elkészítésével járultak hozzá ezen disszertáció teljességéhez.

Köszönöm a Tatabányai EDUTUS egyetemnek, hogy a doktori cselekményem kezdeti közbeszerzési fázisában biztosították számomra a 400W-os SPI lézerüket és az ahhoz tartozó kiegészítő eszközöket.

Szeretném megköszönni, szűk családomnak: húgomnak és édesanyámnak a kitartó támogatást és türelmet, amely nélkül ez az értekezés sosem jöhetett volna létre.

Végül, de nem utolsó sorban köszönettel tartozom édesapámnak valamint egykori fizika tanáromnak Dr. Szalma Istvánnak, akik bár már nincsenek köztünk, tudom, hogy büszkék volnának rám.

PhD-tanulmányaim alatt csoportunk munkáját a következő pályázati források támogatták:

EFOP-3.6.1-16-2016-00014 számú, „Diszruptív technológiák kutatásfejlesztése az e-mobility területén és in-tegrálásuk a mérnökképzésbe” pályázat

10. HIVATKOZÁSJEGYZÉK

- [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] Summary table of lithium based batteries, Battery university, [Internet] elérhető url: <https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries> (2023.08.16.)
- [5] Summary table of nickel based batteries, Battery university, [Internet] elérhető url: <https://batteryuniversity.com/article/bu-203-nickel-based-batteries> (2023.08.16.)
- [6] Summary table of alternate based batteries, Battery university, [Internet] elérhető url: <https://batteryuniversity.com/article/bu-217-summary-table-of-alternate-batteries> (2023.08.16.)
- [7] Summary table of future based batteries, Battery university, [Internet] elérhető url: <https://batteryuniversity.com/article/bu-218-summary-table-of-future-batteries> (2023.08.16.)
- [8] W. Ralf, P. Nina, P. Stefano, L. Jens, W. Martin, Current research trends and prospects among the various materials and designs used in lithium-based batteries., Journal of Applied Electrochemistry. (2013). DOI: 43. 10.1007/s10800-013-0533-6.
- [9] How do Lithium Batteries Work?, Battery university, [Internet] elérhető url: <https://batteryuniversity.com/article/bu-204-how-do-lithium-batteries-work> (2023.08.16.)
- [10] Yoshio M., Brodd R.J., Kozawa A.: Lithium-ion batteries (Springer, 2009), ISBN 0387344446
- [11] Energy Loss in Vehicle Engine, Sankey-diagrams, [Internet] elérhető url: <https://www.sankey-diagrams.com/energy-loss-in-vehicle-engine/> (2023.08.16.)
- [12] Future batteries, Battery university, [Internet] elérhető url: <https://batteryuniversity.com/article/bu-212-future-batteries> (2023.08.16.)
- [13] Types of battery cells, Battery university, [Internet] elérhető url: <https://batteryuniversity.com/article/bu-301a-types-of-battery-cells> (2023.08.16.)

- [14] Prismatic Cells vs. Cylindrical Cells: What is the Difference?, Laserax, [Internet] elérhető url: <https://www.laserax.com/blog/prismatic-vs-cylindrical-cells> (2023.08.16.)
- [15] Data sheet for Steel 1.0330 / DC01, Xometry, [Internet] elérhető url: <https://xometry.eu/wp-content/uploads/2022/08/Steel-1.0330-DC01-6112.pdf> (2023.08.16.)
- [16] T. Solchenbach, P. Plapper, W. Cai: Electrical performance of laser braze-welded aluminum–copperinterconnects, Journal of Manufacturing Processes,16 183-189 (2014)
- [17] Wieland-Werke AG, Strip for connectors datasheet, [Internet] elérhető url: <https://www.wieland.com/de/content/download/12966/file/Strip-for-connectors.pdf> (2023.08.16.)
- [18] Katayama S.: Handbook of laser welding technologies, Woodhead Publishing, (2013)
- [19] P. A Schmidt, P. Schmitz, M. F. Zaeh: Laser beam welding of electrical contacts for application in stationary energy storages devices, Journal of Laser Applications, 28/2 (2016)
- [20] K. Csaba: A hegesztés fogalma, fajtái, ábrázolása. A hegesztés gépei, segédeszközei,[Internet] elérhető url: https://www.nive.hu/Downloads/Szakkepzesi_dokumentumok/Bemeneti_kompetenciak_meresi_ertekelesi_eszkozrendszerenek_kialakitasa/5_0220_012_101030.pdf (2023.08.16.)
- [21] Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Kötéstechnológiák, [Internet] elérhető url: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiSvJnxj96AAxXogf0HHHeVpBtUQFnoECAoQAQ&url=http%3A%2F%2Fmti.kvk.uni-obuda.hu%2Fadat%2Ftananyag%2Fanyag%2Fbanki%2F3kotestecnologiak17.ppt&usg=AOvVaw1SKdsj-WJQE5pFVFnv_TPe&opi=89978449 (2023.08.16.)
- [22] F. Tiborné: Ragasztástechnológia – ragasztás fogalma, tényezői, folyamata, minőségi követelmények, [Internet] elérhető url: https://www.nive.hu/Downloads/Szakkepzesi_dokumentumok/Bemeneti_kompetenciak_meresi_ertekelesi_eszkozrendszerenek_kialakitasa/10_1321_tartalomelem_002_munkaanyag_100331.pdf (2023.08.16.)
- [23] Sz. László: Oldható kötések alkalmazása, szerszámjai, technológiája, [Internet] elérhető url: https://www.nive.hu/Downloads/Szakkepzesi_dokumentumok/Bemeneti_kompetenciak_meresi_ertekelesi_eszkozrendszerenek_kialakitasa/5_0109_010_100915.pdf (2023.08.16.)
- [24] K. Csaba Szegecskötések fajtái, szerelése, szerszámjai, munkabiztonsági előírásai, [Internet] elérhető url:

https://www.nive.hu/Downloads/Szakkepzesi_dokumentumok/Bemeneti_kompetenciak_meresi_ertekelesi_eszkozrendszerenek_kialakitasa/19_0220_010_101015.pdf (2023.08.16.)

[25] W. Zoltán: Járműipari kötéstechológiák, 2019, Akadémiai kiadó, DOI: 10.1556/9789634543305 ISBN: 978 963 454 330 5

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

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

[28] C. Dawes: Laser Welding – A Practical Guide, Abington Publishing, (1992)

[29] M. Zhou: Advances in battery manufacturing, services, and management systems, IEEE Press, (2016)

[30] H. T. Fujii, Y. Goto, Y. S. Sato, and H. Kokawa (February 2016). "Microstructure and lap shear strength of the weld interface in ultrasonic welding of Al alloy to stainless steel". Scripta Materialia. ELSEVIER. 116: 135–138. doi:10.1016/j.scriptamat.2016.02.004

[31] M. Shimaalsadat; H. D. Frank; M. Bernd, "Effect of process parameters on the interface temperature in ultrasonic aluminum wire bonding". Journal of Manufacturing Processes. 36: 104–114. doi:10.1016/j.jmapro.2018.09.020

[32] W. Austin "Welding Still Ensures High-Strength Joints". Assembly Magazine. 2020.

[33] N. Z. Khan; A. N. Siddiquee; Z. A. Khan Friction Stir Welding. Taylor & Francis. doi:10.1201/9781315116815. ISBN 9781315116815. (2021)

[34] Kallee, S. W. "Friction Stir Welding at TWI". The Welding Institute (TWI). (2006)

[35] D. Jeff; B. Carter; K. Lawless; A. Nunes; C. Russell; M. Suites; J. Schneider "A Decade of Friction Stir Welding R&D At NASA's Marshall Space Flight Center and a Glance into the Future" (PDF). NASA. (2008)

[36] Nicholas, E. D. (1998). "Developments in the friction-stir welding of metals". ICAA-6: 6th International Conference on Aluminium Alloys. Toyohashi, Japan.

[37] Schultz, Helmut (1993). Electron beam welding. Cambridge, England: Woodhead Publishing/The Welding Institute. ISBN 1-85573-050-2.

[38] M.St. Węglowski, S. Błacha, A. Phillips, Electron beam welding – Techniques and trends – Review, Vacuum, Volume 130, 2016, Pages 72-92, ISSN 0042-207X,

<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.05.004>.

[39] M. Sushree. Research on Resistance Spot Welding of Dissimilar Metal Sheets: An Overview., “Technological Advancement in Manufacturing & Processing of New Materials” (TAMPNM-2016) (2016).

[40] A. S. Bharaj, A. Kewati, S. Shukla, S. Gedam, R. Kukde, S. Verulkar, Study of resistant spot welding and its effect on the metallurgical and mechanical properties a review, *Materials Today: Proceedings*, 2023, DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.650.

[41] J. Ma, M. Harooni, B. Carlson, R. Kovacevic: Dissimilar joining of galvanized high-strength steel to aluminum alloy in a zero-gap lap joint configuration by two-pass laser welding, *Materials and Design* 58, 390–401, (2014)

[42] U. Dilthey, D. Fuest, W. Scheller: Laser welding with filler wire, *Opt.andQuantumElectronics* 27 1181-1191, (1995)

[43] M. Schweier, J. F. Heins, M. W. Haubold, M. F. Zaeh: Spatter formation in laser welding with beam oscillation, *Phys.Proc.* 41 20-30, (2013)

[44] F. Schmitt, B. Mehlmann, J. Gedicke, A. Olowinsky, A. Gillner, R. Poprawe: Laser Beam Micro Welding With High Brilliant Fiber Lasers, *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering* Vol. 5, No. 3, (2010)

[45] A. Haeusler and A. Schürmann, C. Schöler, A. Olowinsky, A. Gillner and R. Poprawe: Quality improvement of copper welds by laser microwelding with the usage of spatial power modulation, *Laser_Appl.* v29 n2, (2017)

[46] B. Mehlmann, E. Gehlena, A. Olowinsky, A. Gillner: Laser micro welding for ribbon bonding, *Phys.Proc.* 56 776-781, (2014)

[47] A. Heider, P. Stritt, A. Hess, R. Weber, T. Graf: Process Stabilization at welding Copper by Laser Power Modulation, *Phys.Proc.* 12 81–87, (2011)

[48] Cao, X., Wallace, W., Immarigeon, J.P., Poon, C. (2007) “Research and Progress in Laser Welding of Wrought Aluminum Alloys. II. Metallurgical Microstructures, Defects, and Mechanical Properties” *Materials and Manufacturing Processes.* 18:1, 23-49. DOI: 10.1081/AMP-120017587

[49] Yan, J., Gao, M., Zeng, X. (2010) “Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding” *Optics and Lasers in Engineering.* 48:4, 512-517. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2009.08.009

[50] Xia, M., Tian, Z., Zhao, L., Zhou, Y.N. (2008) “Metallurgical and Mechanical Properties

of Fusion Zones of TRIP Steels in Laser Welding” ISIJ International. 48:4, 483-488. DOI: 10.2355/isijinternational.48.483

[51] Reisgen, U., Olschok, S., Holtum, N. (2019) „Influencing the electrical properties of laser beam vacuum-welded Cu-Al mixed joints” Journal of Laser Applications. 31:2, 022406. DOI: 10.2351/1.5096093

[52] Trinh, L.N., Lee, D. (2020) “The Characteristics of Laser Welding of a Thin Aluminum Tab and Steel Battery Case for Lithium-Ion Battery” Metals. 10:6, 842. DOI: 10.3390/met10060842

[56] Dimatteo, V., Ascari, A., Fortunato, A., “Continuous laser welding with spatial beam oscillation of dissimilar thin sheet materials (Al-Cu and Cu-Al): Process optimization and characterization.” Journal of Manufacturing Processes. 44, 158–165. (2019) DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.06.002

[54] Jarwitz, M., Fetzer, F., Weber, R., Graf, T., “Weld Seam Geometry and Electrical Resistance of Laser-Welded, Aluminum-Copper Dissimilar Joints Produced with Spatial Beam Oscillation.” Metals - Open Access Metallurgy Journal. 8:7, 510. (2018) DOI: 10.3390/met8070510

[55] 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

[56] Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W., “NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis.” Nature Methods. 9:7, 671–675. (2012) DOI: 10.1038/nmeth.2089

[57] R.L. Smith & G.E. Sandland, "An Accurate Method of Determining the Hardness of Metals, with Particular Reference to Those of a High Degree of Hardness," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. I, 1922, p 623–641.

[58] The Vickers Hardness Testing Machine. UKcalibrations.co.uk. [Internet] elérhető url: <https://www.ukcalibrations.co.uk/vickers-htm> (2023.08.16.)

[59] Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials, [Internet] elérhető url: <https://www.astm.org/e0384-10e02.html> (2023.08.16.)

[60] Meyers, M., & Chawla, K. (2016). Hardness. In Mechanical Behavior of Materials (2nd ed., pp. 214–225). chapter, Cambridge University Press.

[61] NEWAGE Hardness Testers. (n.d.). Hardness Testing Basics, [Internet] elérhető url: <https://www.hardnesstesters.com/test-types/hardness-testing-basics> (2023.08.16.)

- [62] COMSOL Multiphysics® Simulation Software, [Internet] elérhető url: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (2023.08.16.)
- [63] 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)
- [64] 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)
- [65] Sibillano, T., Ancona, A., Berardi, V., Lugarà, P.M., “Correlation analysis in laser welding plasma” *Optics Communications*. 251:1-3, 139-148. (2005) DOI: 10.1016/j.optcom.2005.02.076
- [66] Sibillano, T., Ancona, A., Berardi, V., Lugarà, P.M., “A Real-Time Spectroscopic Sensor for Monitoring Laser Welding Processes” *Sensors*. 9:5, 3376-3385. (2009) DOI: 10.3390/s90503376
- [67] Young, W. P., Hyunsung, P., Seun, R., Munjin, K., „Real time estimation of CO2 laser weld quality for automotive industry” *Optics & Laser Technology*. 34:2, 135-142. (2002) DOI: 10.1016/S0030-3992(01)00103-7
- [68] Schweier, M., Heins, J.F., Haubold, M.W., Zaeh, M.F., “Spatter Formation in Laser Welding with Beam Oscillation” *Physics Procedia*. 41, 20-30. (2013) DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.047
- [69] Heider, A., Sollinger, J., Abt, F., Boley, M., Weber, R., Graf, T., “High-Speed X-Ray Analysis of Spatter Formation in Laser Welding of Copper” *Physics Procedia*. 41, 112-118. (2013) DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.058
- [70] Yuewei, A., Xinyu, S., Ping, J., Peigen, L., Yang, L., Wei, L., „Welded joints integrity analysis and optimization for fiber laser welding of dissimilar materials” *Optics and Lasers in Engineering*. 86, 62-74. (2016) DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.05.011
- [71] Benyounis, K.Y., Olabi, A.G., Hashmi, M.S.J., “Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile” *Journal of Materials Processing Technology*. 164–165, 978-985. (2005) DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.060
- [72] Zhongmei, G., Ping, J., Gaoyang, M., Longchao, C., Wei, L., “Investigation on the weld bead profile transformation with the keyhole and molten pool dynamic behavior simulation in high power laser welding” *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 116, 1304-1313. (2018) DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.122
- [73] Riofrio, P.G., Ferreira, J.A.M., Capela, C.A., „Imperfections and Modelling of the Weld Bead Profile of Laser Butt Joints in HSLA Steel Thin Plate” *Metals*. 11:1, 151. (2021) DOI:

10.3390/met11010151

[74] SeungGu, K., Joonghan, S., “The effect of laser beam intensity distribution on weld characteristics in laser welded aluminum alloy (AA5052)” *Optics & Laser Technology*. 142, 107239. (2021) DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107239

[75] Fabbro, R., “Melt pool and keyhole behaviour analysis for deep penetration laser welding.” *Journal of Physics D: Applied Physics*. 43:44, 445501. (2010) DOI: 10.1088/0022-3727/43/44/445501

[76] Fabbro, R., Slimani, S., Doudet, I., Coste, F., Briand, F., “Experimental study of the dynamical coupling between the induced vapour plume and the melt pool for Nd–Yag CW laser welding.” *Journal of Physics D: Applied Physics*. 39:2, 394-400. (2006) DOI: 10.1088/0022-3727/39/2/023

[77] Matmatch. Munich (Germany); [Internet]. elérhető url: <http://www.matmatch.com/materials/minfm33714-en-10130-grade-dc01-skin-passed> (2023.08.16.)

[78] Matweb. Blacksburg (VA); [Internet]. elérhető url: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9c7aacf30eb745a09d7d8e245747177e> (2023.08.16.)

[79] Sárosi, Z., Knapp, W., Kunz, A., Wegener, K., “Evaluation of reflectivity of metal parts by a thermo-camera.” *InfraMation 2010 Proceedings*. 1, 210-243. (2010) DOI: 10.3929/ETHZ-A-006206911

[80] Steinhardt, M., Gillich, E.I., Rheinfeld, A., Kraft, L., Spielbauer, M., Bohlen, O., Jossen, A., “Low-effort determination of heat capacity and thermal conductivity for cylindrical 18650 and 21700 lithium-ion cells.” *Journal of Energy Storage*. 42, 103065. (2021) DOI: 10.1016/J.EST.2021.103065

[81] Hollatz, S., Kremer, S., Ünlübayir, C., Sauer, D.U., Olowinsky, A., Gillner, A., (2020) “Electrical modelling and investigation of laser beam welded joints for lithium-ion batteries” *Batteries* 6(2), 24, DOI:10.3390/batteries6020024

[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, bírálóat alatt