

VÉKONY FÉMLEMEZEK LÉZERES FORRASZTÁSA ÁTLAPOLT KÖTÉSI GEOMETRIÁBAN

PhD-értekezés

KÖRMÖCZI ANDOR

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 c. egyetemi docens
Szegedi Tudományegyetem, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Szeged

2024

Tartalomjegyzék

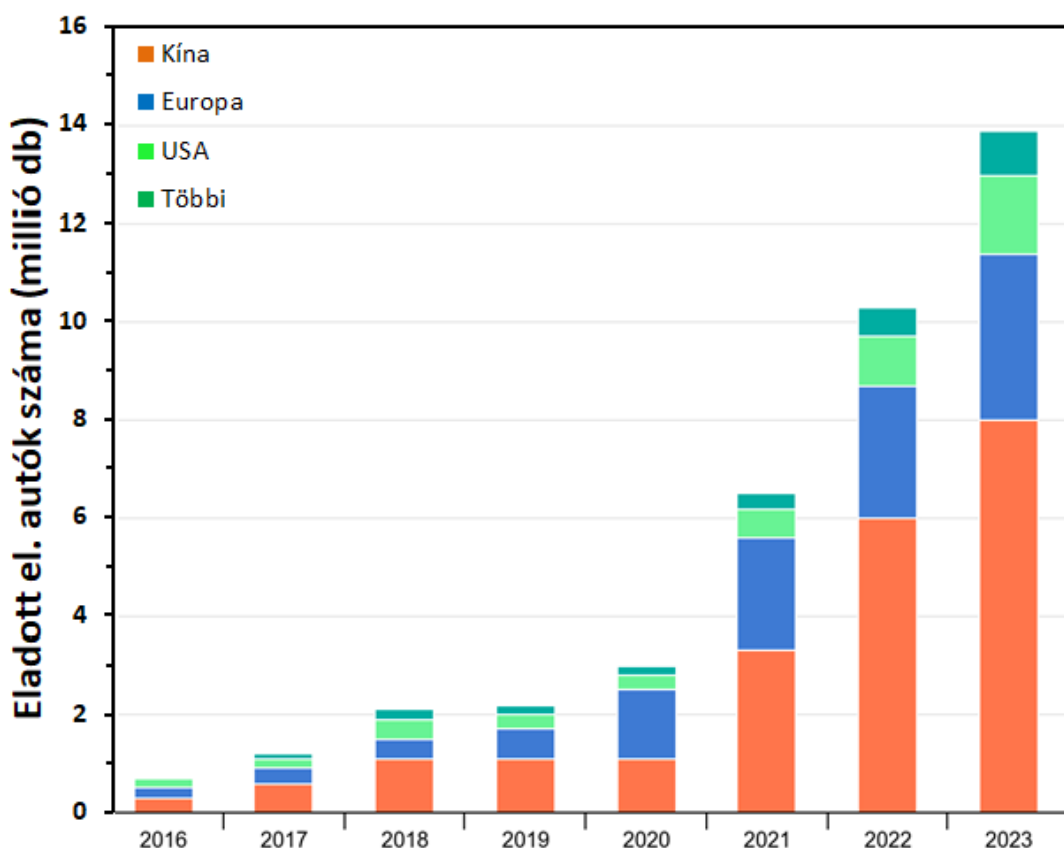
I. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK	4
I.1. Bevezetés.....	4
I.2. Akkumulátorok.....	8
I.2.1. Akkumulátorok kémiája	8
I.2.2. Akkumulátorcellák geometriája.....	12
I.3. Akkumulátorok kötésének kihívásai	15
I.4. Akkumulátorcellák kötésének módjai és anyagai	16
I.5. Kötéstechnológiák.....	18
I.5.1. Mechanikai kötés	19
I.5.2. Hegesztés	19
I.5.3. Forrasztás	25
I.5.3.1. Lézeres forrasztás	28
I.5.4. Konkluzió.....	30
II. CÉLKÍTÚZÉS	32
III. ANYAGOK, MÓDSZEREK, ELŐKÍSÉRLETEK	34
III.1. Anyagok és módszerek	34
III.2. A megmunkáló lézerrendszer	38
III.3. A minták jellemzésére használt módszerek és eszközök.....	43
III.3.1. Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM).....	43
III.3.2. Optikai mikroszkóp.....	43
III.3.3. Érdességmérés.....	43
III.3.4. Mikrokeménységmérés	44
III.3.5. Az összeforrasztott lemezpárok szakító-nyíró szilárdsága.....	45
III.3.6. Az összeforrasztott lemezpárok elektromos ellenállása.....	46
III.4. Modellezési módszerek.....	48
IV. EREDMÉNYEK.....	50
IV.1. Kísérleti eredmények.....	50
IV.1.1. Általános eredmények.....	50
IV.1.1.1. A Hilumin® lemez összetételének mérése	50
IV.1.1.2. A fémlamezek érdesség vizsgálata	51
IV.1.1.3. Mikrokeménység és hőhatásövezet (HAZ) vizsgálatok	52
IV.1.1.4. A forrasztanyag vastagságának mérése	55
IV.1.2. A kötések tulajdonságainak optimalizálása a folyamatparaméterekkel	61
IV.1.2.1. Lamezek kémiai tisztításának hatása	61

IV.1.2.2. A lemezek mechanikai érdesítésének hatása.....	62
IV.1.3. A kötések tulajdonságainak optimalizálása a lézeres folyamat paraméterekkel	66
IV.1.3.1. A megmunkálási ablak.....	66
IV.1.3.2. A lézerteljesítmény hatása	68
IV.1.3.3. A besugárzási idő hatása.....	71
IV.2. Egy új közelítés a kötés elektromos viselkedésének leírására: mérés és modellezés	74
IV.2.1. A kötések elektromos viselkedése: mérés.....	74
IV.2.2. Az elektromos viselkedés modellezése.....	77
IV.2.3. A forrasztott kötés jellemzőinek hatása az R(d) függvényre	80
IV.2.3.1. Távoli zóna.....	81
IV.2.3.2. Közeli zóna.....	84
V. ÖSSZEFOGLALÁS.....	89
V.1. Célkitűzések	89
V.2. Eszközök és módszerek	90
V.3. Új tudományos eredmények	90
VI. SUMMARY.....	94
VI.1. Objectives.....	94
VI.2. Materials and methods	95
VI.3. New scientific results.....	95
VII. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	99
VIII. PUBLIKÁCIÓS LISTA.....	101
IX. IRODALOMJEGYZÉK.....	104

I. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK

I.1. Bevezetés

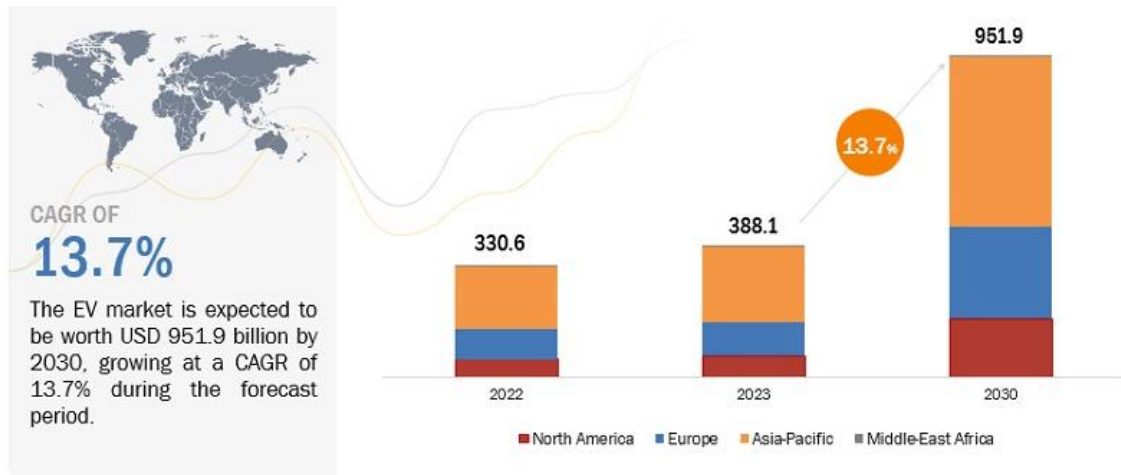
Napjainkban a környezettudatos szemléletnek köszönhetően a tudomány számos területén egyre nagyobb figyelmet kapnak a környezetbarát megoldások. Nincs ez másképp a járművek fejlesztése terén sem. A közlekedésfejlesztés szempontjából nem elhanyagolható az sem, hogy a Föld korlátozott mennyiségű fosszilis energiahordozóval rendelkezik. Az elektromobilitás térnyerése kulcsfontosságú a fenntartható közlekedés előmozdításában, így a klímaváltozás elleni küzdelemben. Így jöttek létre az új hibrid, illetve teljesen elektromos hajtásrendszerek a hagyományos belső égésű motorok alternatívájaként. Napjainkban már tapasztalhatjuk ezen változó tendenciákat, hiszen a piacon számos új elektromos autó jelenik meg nap mint nap, amelyet nem kis részben az üzemanyag-alapú járművek fokozatos megszüntetésére irányuló kormányzati kezdeményezéseknek köszönhetünk.



1. ábra: Eladott elektromos autók száma évenként millió darabszámban a világon 2016 és 2023 között [1]

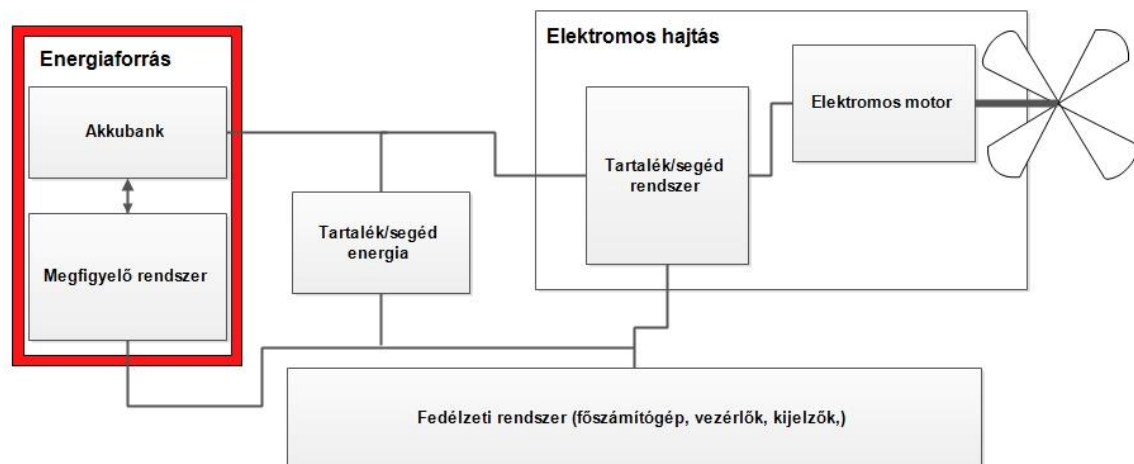
Az elektromos autók értékesítése (1. ábra), ideértve az akkumulátoros elektromos autókat (BEV) és a plug-in hibrid elektromos járműveket (PHEV), majdnem elérte a 14 milliót 2023-ban, ami több mint a négyszerese a 2020-as eladási számnak. A 2022-ben világszerte elért 10 milliós elektromos jármű értékesítési darabszám a világ teljes autóeladásainak 14%-os részarányát tette ki. Ez meghaladta az egész Európai

Unióban eladott autók teljes számát (körülbelül 9,5 millió jármű), és majdnem fele volt a Kínában eladott autóknak. Az elektromos járművek értékesítése hét év alatt, 2016-tól 2023-ig, a közel egy milliőról több mint tizenhárom millióra nőtt, hangsúlyozva az elektromos járművek rohamos értékesítését. Az elektromos autók részaránya a teljes autóeladásokban a 2021-es 9%-ról 2023-ra 18%-ra nőtt, több mint tízszeresére emelkedve 2016-hoz képest [2]. A globális elektromos járműpiac értékét világszerte 388,1 milliárd dollárra értékelték 2023-ban, és a becslések szerint 2030-ra, 13,7%-os összetett éves növekedési ráta (CAGR) mellett el fogja érni a 951,9 milliárd dollárt, ahogy az látható a 2. ábrán.



2. ábra: Az elektromos járművek piacának becsült növekedése 2030-ig [2]

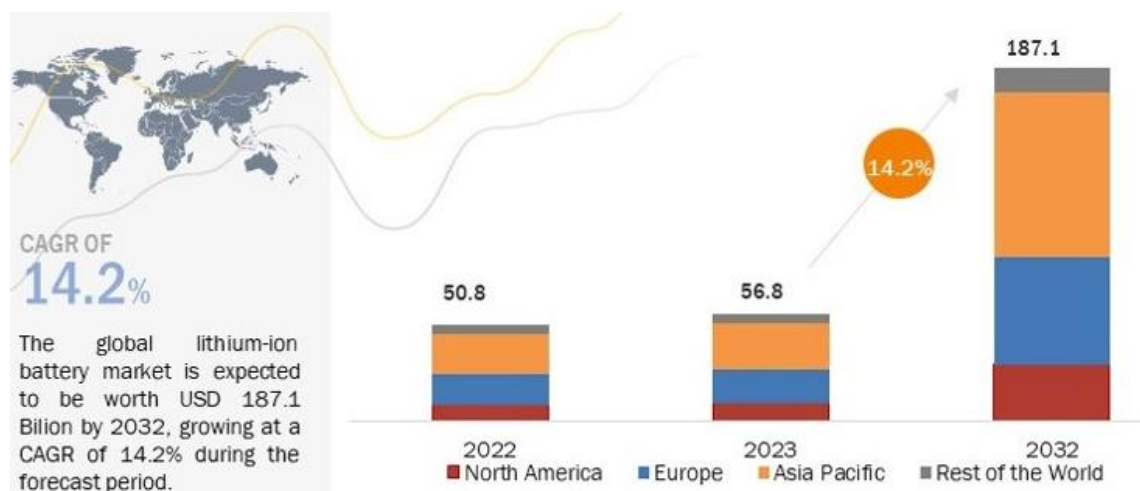
Egy tisztán elektromos meghajtással rendelkező járműben megvalósított hajtásrendszer blokkvázlatát a 3. ábra mutatja be [3]. A hajtásrendszer három fő része az elektromos hajtás, a fedélzeti rendszer és az energiaforrás. Az elektromos hajtás a motorból és a tartalék/segéd rendszerből áll. A fedélzeti rendszer a fő számítógépet, a vezérlőket, illetve a kijelzőket tartalmazza. Az energiaforrás pedig az akkumulátort és annak megfigyelőrendszerét foglalja magában.



3. ábra: Példa egy elektromos repülőgép hajtásrendszerének blokkvázlatára [3]

Az irányító testületek által világszerte kitűzött merész „nulla szén-dioxid-

kibocsátási” célok, amelyeket 2050-re kellene elérni, felgyorsították a lítium-ion akkumulátorok, mint az elektromos meghajtású autók energiaforrása iránti keresletet [4]. A fogyasztói elektronika mindennapi életben való óriási használata további nagy igényt teremtett a nagy teljesítményű, újratölthető akkumulátorok iránt. A lítium-ion technológia jelentős előnye, hogy – a konkurens akkumulátor kémiaiakkal összehasonlítva – rendkívül magas energiasűrűséggel rendelkezik, ami hosszabb üzemidőt vagy kisebb méretű, könnyebb készülékeket tesz lehetővé. Ennek eredményeként széles körben alkalmazzák okostelefonokban, laptopokban, táblagépekben, más hordozható eszközökben, továbbá energiatároló rendszerekben és napelemes háztartási rendszerekben. A lítium-ion akkumulátorok piacának növekedése részben az innovációnak, a kutatás-fejlesztési tevékenységnek is köszönhető. A gyártók folyamatosan törekszenek a cellák teljesítményének növelésére, az élettartam meghosszabbítására, valamint a fenntarthatóbb és környezetbarátabb anyagfelhasználásra. Egyes elemzések szerint 2032-re a lítium-ion akkumulátorpiac mérete el fogja érni a 187,1 milliárd dollárt, összetett éves növekedési ráta (CAGR) tekintetében 14,2%-os becsült ütemben (4. ábra). Az elterjedőbbé váló elektromobilitás és az energiatárolási igények fokozódása mind arra utal, hogy a lítium-ion akkumulátoroknak továbbra is kiemelkedő szerepük lesz a jövő energia piacán [5].



4. ábra: A lítium-ion akkumulátorok piacának növekedési üteme és annak előrejelzése 2032-re [5]

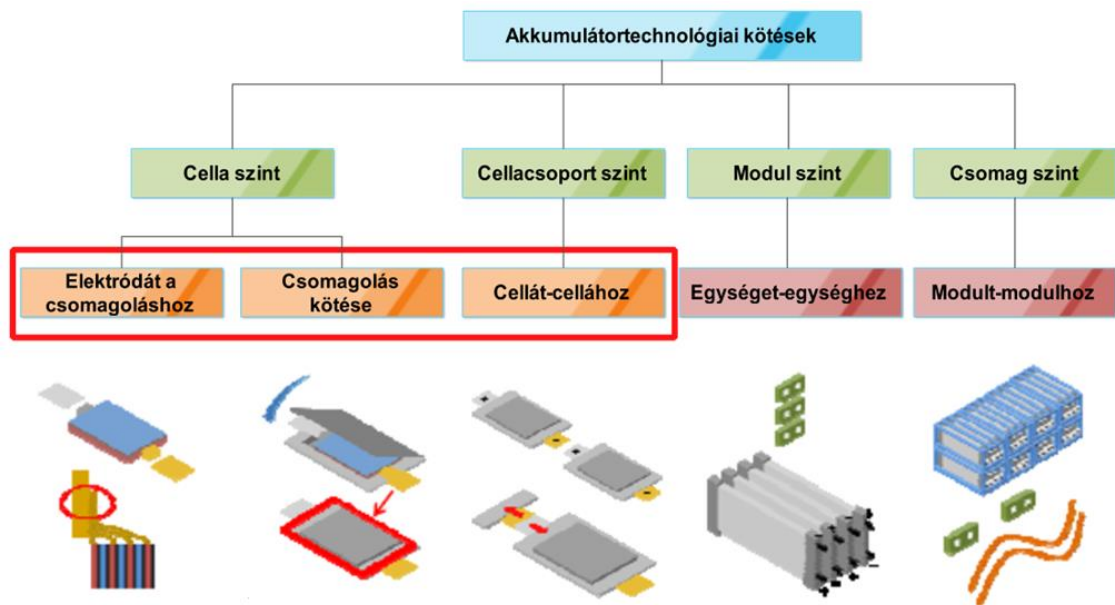
Az akkumulátor iparág jelenlegi kihívásai az energiasűrűség növelése, a töltési sebesség javítása és a költségek csökkentése. Az egyik fő kihívás az, hogy a lítium és más alapanyagok kitermelése és feldolgozása káros környezeti hatásokkal jár, és szükség van fenntartható forrásokra és új technológiákra a gyártás során. A kapacitásnövelés mellett az akkumulátorok élettartamának növelése is kritikus fontosságú. Az új generációs akkumulátorok célja a hosszabb ciklusélettartam és a jobb teljesítmény fenntartása, ami csökkenti az elektromos járművek üzemeltetési költségeit és növeli a fenntarthatóságát. Az akkumulátortechnológia területén zajló kutatások és fejlesztések fontos szerepet játszanak ezen célok elérésében. Az elektromos járművek akkumulátorainak hatékonyabbá tétele érdekében az ágazat folyamatosan törekszik az új anyagok és technológiák bevezetésére. A szilárdtest akkumulátorok például ígéretes

fejlesztések, mivel nemcsak biztonságosabbak, de akár nagyobb energiasűrűséget is elérhetnek [6]. További biztató alternatíva lehet a Li-levegő cella, amely egy nagyságrenddel nagyobb fajlagos energiával rendelkezik, mint a manapság alkalmazott Li-ion cellák. Azonban ezek a fejlesztések még kezdeti (TRL 4 – laborvizsgálatok) fázisban vannak [7, 8]. Értekezésem irodalmi összefoglalójában áttekintem az elektromos járműipar számára jelenleg elérhető nagy kapacitású akkubankokba köthető kis kapacitású cellatípusokat az 1.2. Akkumulátorok fejezetben.

Az akkumulátorok hatékonyságának növelése, nem csupán a cellák fajlagos energiájának növelésére korlátozódik, hanem kiterjed a cellák közötti kötések optimalizálására is. Az energiahatékony akkumulátor rendszerek kialakítása elengedhetetlen az elektromos járművek hatótávolságának növelése és a fenntartható közlekedés előmozdítása érdekében, így egyre növekvő figyelem irányul a cellák közötti kötésekre és azok minőségére. A cellák közötti kötések optimalizálása olyan kihívásokkal néz szembe, mint a lehető legjobb elektromos vezetés elérése, a hőelvezetés, az egyenletes töltés és kisütés biztosítása, valamint a rendszer mechanikai stabilitásának megőrzése. A cellák közötti kötések fejlesztése nemcsak tudományos szempontokon alapul, hanem a gyártási folyamatok optimalizálását is magában foglalja. A pontos és megbízható gyártási eljárások révén javítható a kötések minősége, ezáltal növelhető az akkumulátorok megbízhatósága. Az optimalizált cellakötések révén minimalizálhatók az energiaveszteségek, ami hozzájárul a teljes rendszer hatékonyságának növeléséhez, azaz nőhet az akkumulátorok teljesítménye. Továbbá a megbízható kötéseknek köszönhetően létrejövő egyenletesebb hőeloszlás csökkentheti az akkumulátorok hőmérséklettel kapcsolatos problémáit, ezáltal hozzájárulhat azok hosszabb élettartamához is. Az egyenletes terheléseloszlás és a megbízható kötések révén minimalizálhatók a degradációs folyamatok, ami növeli az akkumulátorok ciklusélettartamát és csökkenti karbantartási igényüket.

Az akkumulátor cella az akkubankok legkisebb önálló szerkezeti eleme, energiátároló egysége. Az akkubankokat sok, egyedi akkumulátor cella összekötésével alakítják ki, ami egy jól testre szabható, moduláris, így könnyebben monitorozható rendszert eredményez. A valós idejű monitorozásért, amely általában hőmérséklet és feszültség mérést jelent, az akkumulátor megfigyelőrendszere a felelős.

A nagy kapacitású akkumulátorbankokat az egyes egységek az 5. ábrán bemutatott, több szintű csatlakoztatásával hozzák létre. Az akkumulátortechnológiai kötések különböző szintjein nincs univerzálisan használt kötési technológia. A csomag és modul szinten általában mechanikai csatlakozást (szegecseles, csavarozás), míg az ennél „alacsonyabb” (cella és cellacsoport) szinteken nem oldható kötések (hegesztés vagy forrasztás) alkalmaznak, ezzel csökkentve az összsúlyt, az elektromos ellenállást, és javítva a mechanikai tulajdonságokat [9]. A potenciális kötési technikákat az értekezés I.5. Kötéstechnológiák alfejezetében tekintem át, és vetem össze.



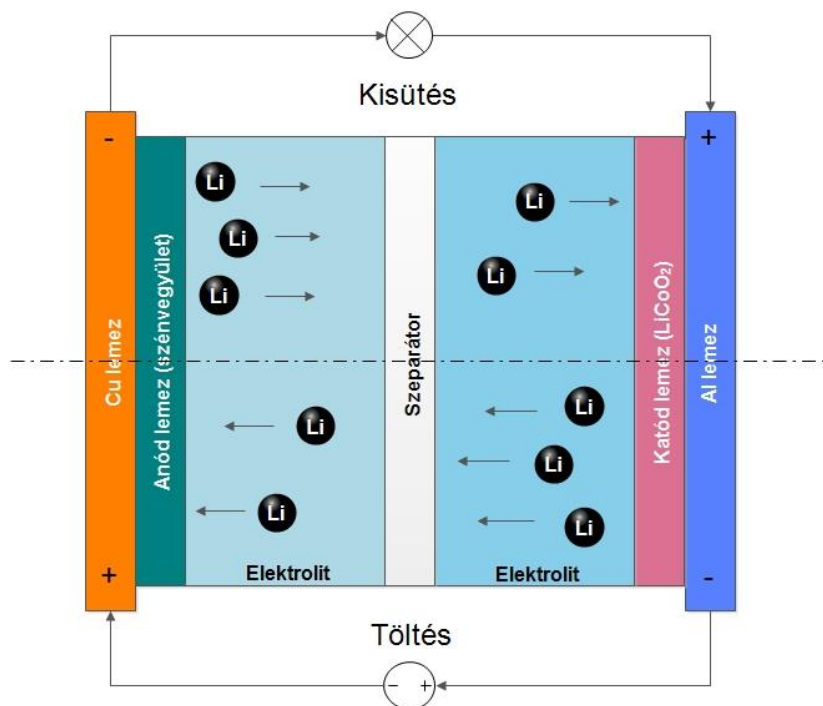
5. ábra: Az akkumulátorbankokban alkalmazott kötések szintjei. Pirossal kereteztem az értekezés szempontjából releváns kötésmódokat [9].

I.2. Akkumulátorok

Az akkumulátor a galvánelemek családjába tartozó, ciklikusan működő energiatároló egység, amely töltéskor a villamos energiát kémiai energiává alakítja, ezt huzamosabb ideig tárolni tudja, majd kisütéskor a kémia energiát villamos energiává alakítja vissza. Ebből kifolyólag közvetlenül csak egyenáram szolgáltatására alkalmas.

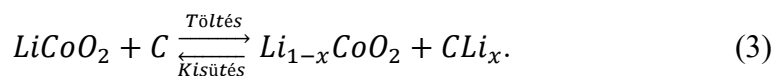
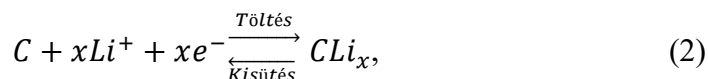
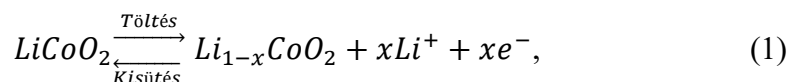
I.2.1. Akkumulátorok kémiája

Az akkumulátor cellában (a továbbiakban egyszerűen: cella) két különböző anyagú elektróda meghatározott összetételű folyadékba (elektrolitba) merül. Az elektródák kisütéskor a töltésszétválasztás miatt lassan átalakulnak. Ha ez az átalakulás teljesen végbemegy, a cella lemerült állapotba kerül. Töltés során – a rákapcsolt feszültség hatására – az elektródák eredeti állapotukba térnek vissza, vagyis fordított irányba megy végbe a kémiai folyamat, melynek eredménye a feltöltött energiaforrás. Azt, hogy ez az elv hogyan működik, az elektromos járművekben napjainkban legelterjedtebben alkalmazott Li-ion cella esetére a 6. ábrán mutatom be [10].



6. ábra: A Li-ion cella működési elve [10]

A Li-ion cella esetén a pozitív elektróda (katód) egy Li oxid, többnyire LiCoO_2 vagy LiMnO_2 , a negatív elektróda (anód) általában szénvegyület, esetleg grafit. Az anódot és a katódot egy folyékony elektrolit választja el egymástól, ez LiPF_6 (lítium-hexafluorofoszfát), vagy újabban a kevésbé korrodálódó LiBF_4 (lítium-tetrafluoroborát). A Li-ion cella katódján, anódján, illetve a teljes cellában végbemenő kémiai folyamatokat rendre az (1), (2) és (3) egyenletek írják le [7-9]:



A töltés során a Li-ionok a szénalapú anódhoz, míg kisütéskor a fénoxid alapú katódhoz vándorolnak. Erről a folyamatról kapta ez a technológia a nevét is, hiszen a töltéstárolásról a Li-ionok gondoskodnak. A kereskedelmi forgalomban kapható, elterjedtebb akkumulátor típusokat, legfontosabb tulajdonságaikkal együtt, az 1. táblázat foglalja össze.

Az elektromos járművek szempontjából az akkumulátorok legfontosabb tulajdonsága a fajlagos energiája (egységnyi tömegre jutó tárolt energia), hiszen ez határozza meg az egy töltéssel megtehető legnagyobb távot. A táblázatban összehasonlításként belevettem a klasszikus ólom akkumulátort, amely ugyan a legkisebb fajlagos energiát szolgáltatja (30-50 Wh/kg), cserébe viszont a legolcsóbb. Továbbá a lehetséges töltési ciklusok számában, illetve a hatékonyságban is elmarad legtöbb társától. A legalacsonyabb ár miatt használják olyan alkalmazásoknál, ahol a

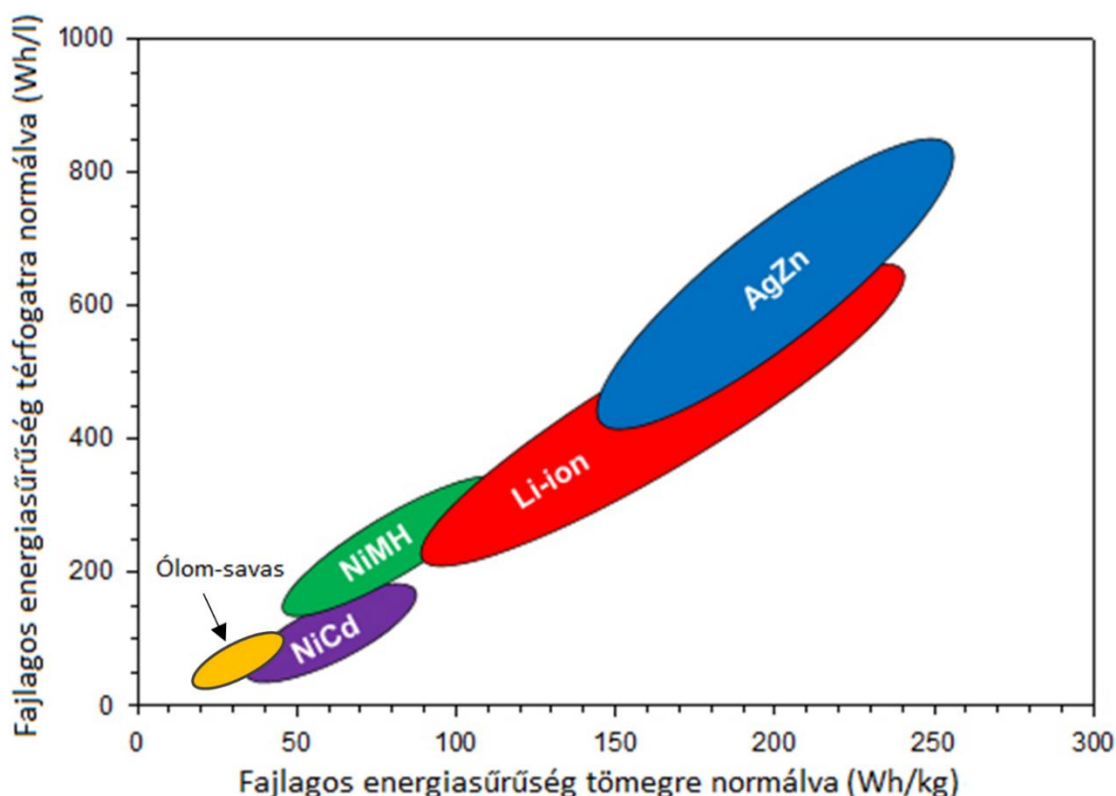
fajlagos energia nem kritikus. A Ni-Cd elem már jobb jellemzőkkel rendelkezik, akár 80 Wh/kg fajlagos energiát is el lehet érni ezzel a típussal 1,2 V feszültség mellett. Nagy előnye a magas, akár 1000 töltési ciklusszám. A Ni-MH (nikkel-fémhidrid) technikával még nagyobb fajlagos energia (120 Wh/kg) érhető el, de jóval kedvezőtlenebb a maximális töltési ciklusok száma (300-500). Közel azonos jellemzőket lehet elérni a Li-polimer kémiaiájú akkucsalláddal. Fajlagos energia szempontjából a két legjobb akkumulátortípus a Li-ion és az Ag-Zn, melyekkel közel 250 Wh/kg érhető el, ez teszi ezeket a jelenleg elérhető akkukémiaiák közül a legjobbnak az elektromos járműipar számára. A magas fajlagos energiának köszönhetően azonban sajnos ez utóbbi két cella ára magasabb a többi akkutípusénál.

Akkutípus	Fajlagos energia [Wh/kg]	Feszültség [V]	Töltési ciklusok	Ár	Töltési idő [h]
Ólom-savas [11, 12]	30-50	2	200-300	alacsony	8-16
Li-ion [11, 13]	90-250	3,2-3,7	500-2000	magas	1-2
Li polimer [11, 14]	100-180	3,7	300-1000	magas	1-2
Ni-Cd [11, 15]	45-80	1,2	1000	közepes	1-2
Ni-MH [11, 15]	60-120	1,2	300-500	közepes	2-4
Ag-Zn [16]	250	1,6	5-200	magas	1-2
Li-levegő (jövő) [17]	13000 (elméleti)	1,7-3,2	50 (első kis.)	-	-

1. táblázat: Különböző típusú akkumulátorok tulajdonságai [11-17].

A 7. ábra a fajlagos energia szempontjából hasonlítja össze a különböző akkumulátor típusokat [18, 19]. Mint az már a táblázatból is kiolvasható volt, a Li-ion és az Ag-Zn kimagaslik a többi közül. Az ezüst-cink technológia még nem kiforrott. Mivel az ára a legmagasabb, illetve a töltési ciklusok számában is elmarad a versenytársaitól [19], nem ért el széles körű kereskedelmi felhasználást, jelenleg még csak a hadiiparban és az űrkutatásban használják.

A Li-ionos család közül a Li-alumínium technika 296 Wh/kg fajlagos energia elérésére képes, ami a jelenleg ismert legnagyobb fajlagos energia, amit a tömeggyártásra alkalmas akkumulátor cellákkal el lehet érni [20]. A Li-ion akkuk 3,6 V feszültség leadására képesek, az élettartamuk magas, akár 1000 töltési ciklus is elérhető velük. A töltés során közel 100%-os hatékonysággal tudják az energiát tárolni. Egyedül az ár az, ami rontja a versenyképességét. A Li-ion technika előnyei között felsorolandó az is, hogy a lítiumból készült akkumulátorok sokkal könnyebbek és tartósabbak is mint a versenytársak, hiszen a lítium a legkönnyebb fém. A cella működése során nem képződnek kristályok, ezért a Li-ion akkumulátor nem rendelkezik memóriaeffektussal. Ez azt jelenti, hogy ezeket nem kell rendszeresen teljesen lemeríteni, majd teljesen feltölteni, sőt óvni kell a teljes kisütéstől. További előnyös tulajdonságuk, hogy kevés mérgező anyagot tartalmaznak [21, 22, 23].



7. ábra: A kereskedelmi forgalomban kapható akkumulátor típusok összehasonlítása tömegre, illetve térfogatra normált fajlagos energiasűrűségük szerint [18, 19]

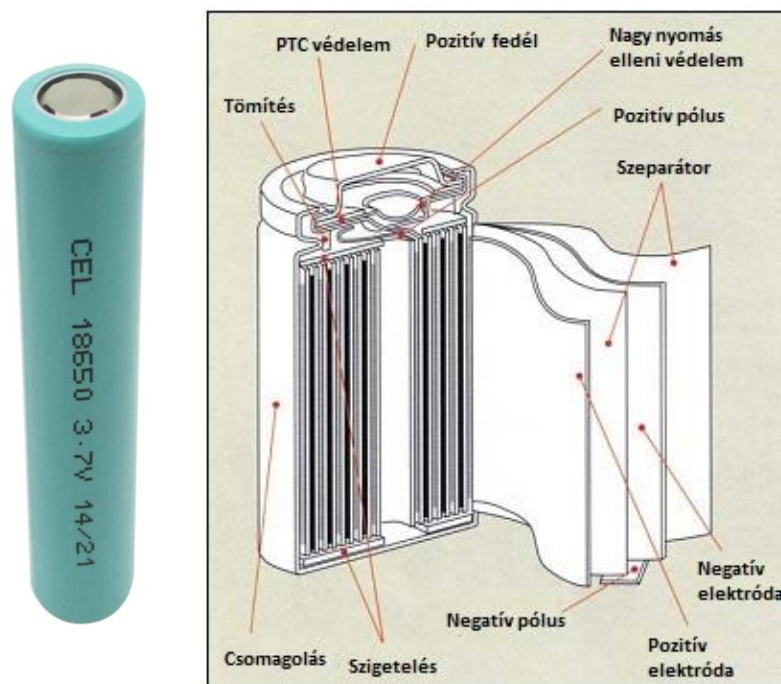
Az elektromos járműipar számára a jelenleg ismert akkumulátorok további fejlesztésére van szükség, hiszen például a repülőgépek számára készült, korszerű Li-ionos akkumulátorbankok ma még elfogadhatatlanul rövid repülési időt tesznek lehetővé a fajlagos energia alacsony értéke miatt [3]. 2023-ban a Kínai Tudományos Akadémia Fizikai Intézetének kutatói áttörést értek el 711 Wh/kg energiasűrűségű lítium-ion mangán-oxid akkumulátor (LMO) kifejlesztésével [24, 25]. Ez az érték több mint kétszer nagyobb, mint a Tesla által tartott jelenlegi csúcs, 296 Wh/kg. Ez a fejlesztés jelentős hatással lehet az olyan iparágakra, mint az űrkutatás és az elektromos repülés, azonban az LMO akkumulátorok tömeggyártása az előrejelzések szerint csak 2040-re várható. A jövő útja lehet az úgynevezett Li-levegő akkumulátor, amelynek elméletileg becsült fajlagos energiája elérheti akár a 13 kWh/kg-os értéket is, ami megegyezik a benzin, mint fosszilis üzemanyag fajlagos energia értékével. A laborkísérletek során még csak 1 kWh/kg-os fajlagos energiát sikerült elérni ilyen típusú akkumulátorral, és az élettartam is csak alig 50 töltési ciklus, ami valószínűleg a jelenleg még instabil kémiai reakciók eredménye, mivel ezek a fejlesztések még csak a laborkísérletek szintjén járnak, bőven van fejlődési lehetőség [7, 8, 17].

I.2.2. Akkumulátorcellák geometriája

Alakjuk alapján megkülönböztethetünk hengeres, szögletes, tasakos, és gombelem geometriájú cellákat. Ez utóbbiak olcsók és kicsik, de csak kis feszültség leadására képesek, ráadásul hosszú feltöltési idővel rendelkeznek [26]. Mivel ez a típus így nem releváns a nagyteljesítményű akkumulátorbankok szempontjából, a továbbiakban ezeket nem tárgyalom.

Hengeres cella

A hengeres cella manapság a legszélesebb körben használt forma a viszonylag egyszerű gyártási eljárás és a jó mechanikai stabilitás miatt. A hengeres cellák rendelkeznek felmelegedés elleni védelemmel, nyomáscsökkentő mechanizmussal, és maga a henger alakú cső is ellenálló a belső nyomás okozta deformálódásnak, így számos biztonsági előírásnak eleget tesznek. Előnyei közé sorolható a hosszú élettartam, a töltési ciklusok magas száma, illetve relatíve alacsony ára is. A kis hengeres cellákat általában orvosi és hordozható számítástechnikai eszközökben használják, míg a nagyobb méretű hengeres cellák az elektromos járművekben népszerűek [26, 27]. A hengeres kialakítás miatt a szorosan egymás mellé rendezett cellák térkihasználása viszont nem optimális, és a fém ház relatíve nagy tömeget eredményez.



8. ábra: Egy hengeres cella és felépítésének sematikus rajza [26]

A 8. ábrán egy hengeres cella, és annak sematikus rajza látható. A jelenleg három legnépszerűbb szabványosított hengeres modell a 18650, a 21700, és a 26650. E cellák nevesebb gyártóinak legjobb tulajdonságú típusai közül mutat be néhányat a 2. táblázatban.

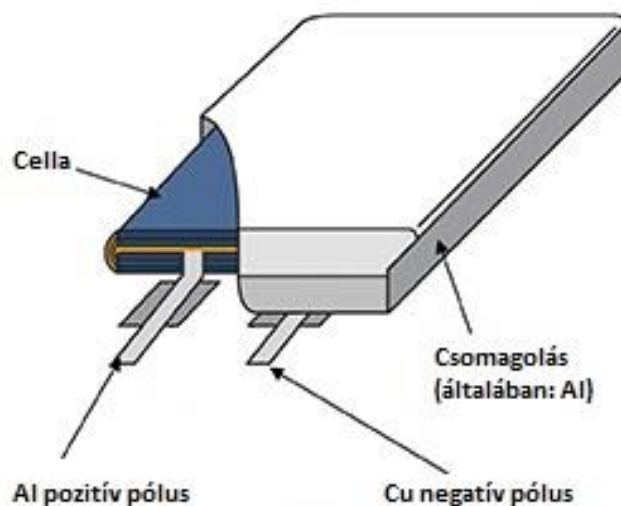
Akkutípus	Kapacitás [mAh]	Feszültség [V]	Tömeg [g]	Fajlagos energia [Wh/kg]
<i>Hengeres 18650 Li-ion</i> (Panasonic) [28]	3350	3,6	47,5	243
<i>Hengeres 18650 Li-ion</i> (LGChem) [29]	3500	4,2	49,0	230
<i>Hengeres 18650 Li-ion</i> (Sony) [30]	3000	3,6	46,6	221
<i>Hengeres 26650 Li-ion</i> (Panasonic) [31]	3300	3,7	95,0	218
<i>Hengeres 26650 Li-ion</i> (Enercig) [32]	3500	3,6	83,0	152
<i>Hengeres 21700 Li-ion</i> (Samsung) [33]	4900	3,6	69,0	256
<i>Hengeres 21700 Li-ion</i> (Tesla) [34]	4800	3,6	60,0	296
<i>Szögletes 103450 Li-ion</i> (Panasonic) [35]	2200	3,6	38,3	207
<i>Szögletes 103450 Li-ion</i> (LGChem) [36]	2000	3,7	41,0	180
<i>Tasakos Li-polimer</i> (A123) [37]	19500	3,30	496	130
<i>Tasakos Li-polimer</i> (Farasis) [38]	25000	3,65	485	188

2. táblázat: Nevesebb gyártók Li- akkumulátorainak főbb paraméterei [28-38]

Az elnevezések a cellák méreteire utalnak: a 18650-es cella 18 mm széles, és 65 mm magas. A záró 0 a hengeres kialakítást jelzi. Ez a geometria a fent megnevezett három típus közül még mindig a legnépszerűbb, 2022-ben a becslések szerint 5,3 milliárd amerikai dollár volt a piaci részesedése [39]. Ezzel a mérettel 3350 mAh az elért legnagyobb kapacitás, ami 243 Wh/kg fajlagos energiát eredményez [28]. A 26650-es modell nem ennyire népszerű, ami a vastagabb kialakításnak, a kisebb kapacitásnak és fajlagos energiának köszönhető. Ennek ellenére ez is széles körben használatos [26]. A 21700-as kialakítás a 2017-es év nagy slágere volt, hiszen Tesla az új autómódelljeikben is már ezeket fogják használni [34]. A térfogatnöveléssel 4800 mAh-ás kapacitású cellát hoztak létre, ami közel 300 Wh/kg fajlagos energiát eredményez, ami a 18650-os képest jelentős előrelépés. Ezek az értékek az első fejlesztések eredményei. A szakértők szerint a további fejlesztések révén akár 350 Wh/kg-ot is elérhető ezzel a geometriával.

Szögletes cella

A szögletes kialakítás kulcsfontosságú előnyei a viszonylag kis tömeg, hiszen a ház általában alumíniumból készül, és a helytakarékos felhasználást biztosító vékony profil, ami a terméktervezők számára könnyebb beépíthetőséget jelent. A 9. ábrán egy ilyen cella sematikus rajza látható. A szögletes cellákat jellemzően mobiltelefonokban, tabletekben és más elektronikai eszközökben használják. Míg jó térkitöltésük a szögletes cellákat nagyon vonzóvá teszi, számos hátrányuk is létezik, mint például, hogy az előállításuk költséges, a méretek nem szabványosítottak, rövidebb élettartammal rendelkeznek, mivel a hőelvezetésük kevésbé hatékony a hengeres kialakításhoz képest, és viszonylag könnyen deformálódnak mechanikai igénybevétel esetén [26, 27].



9. ábra: Szögletes cella sematikus rajza [26]

A szögletes cellák méreteit minden gyártó saját maga szabja meg; a legelterjedtebb a 103450 típusszámú. A típuszám itt is a cella méreteit jelöli, tehát a 2. táblázatban szereplő szögletes cellák 10 mm vastagok, 34 mm szélesek és 50 mm hosszúak. Feltűnő, hogy a szögletes cellák fajlagos energia értékei elmaradnak a hengeres kivitel által szolgáltatott értékektől.

Tasakos cella

A szögletes cellák továbbfejlesztése során egy új típust hoztak létre tasakos cella (pouch cell) néven, ami egy merev váz nélküli, közel szögletes cella. Ez a felépítés a leghatékonyabb helykihasználást teszi lehetővé, illetve így 95%-os belső térkitöltés is elérhető, ami a legmagasabb érték az akkumulátorok között. A fémburkolat eltávolítása természetesen súlycsökkenést is eredményez. A tasakos cellák összekötése során persze szükség van tartószerkezetre, és azt is figyelembe kell venni, hogy ezek a cellák 500 töltési ciklus alatt képesek akár 10 százalékos térfogatnövekedésre is. A cellaméret itt sem szabványosított. A tasakos cellák általában Li-polimer kémiával működnek, nagy áramot képesek leadni, de kis terhelés és lassú töltés mellett a legjobbak. A kapacitásuk alapján nevezik el őket. A 2. táblázatban bemutatott, a123 által gyártott ~20 Ah cella 7,25 mm vastag, 160 mm széles, és 227 mm hosszú. Annak ellenére, hogy a tasakos cellák a többi cellacsaládhoz képest sokkal nagyobb kapacitással rendelkeznek, fajlagos energiájuk kicsi. Általában autóiipari, és katonai alkalmazásaik vannak [26].

I.3. Akkumulátorok kötésének kihívásai

A szárazföldi és légi közlekedési alkalmazásokra szánt akkumulátorbankokban használt kötési technológiáknak és az előálló kötések minőségének szigorú követelményeknek kell megfelelnie (ISO 12405-4:2018 szabvány) [40], ami komoly kihívások elé állítja az iparágat [41].

Mechanikai kihívások

Az akkumulátor modulok működés közben dinamikus terhelésnek és véletlenszerű rezgéseknek vannak kitéve, amelyek rövidzárlatot és akár tüzet is okozhatnak [42]. A véletlenszerű rezgések különösen nagy hatással vannak a nagyszámú egyedi cellát tartalmazó modulokra, azok periodikus felépítése miatt. Ráadásul az akkumulátorok összekötő illesztései már a gyártás során bizonyos mértékig előfeszülnek [43]. Vékony szögletes vagy lágy tasakos polimer cellák alkalmazása esetén ezek a hatások a cellák működés közbeni méretváltozásai miatt felerősödhetnek. Ezek viselkedése függ a szerkezettől és a mérettől a töltés és a kisütés során, ami hatással lehet a kötésekre [44]. Ha különböző hőtágulású anyagokat kötnek össze, és az érintkezési határfelületen hő keletkezik, az érintkező anyagok eltérő hőtágulása nyíró terhelést, súlyos esetben akár képlékeny deformációt vagy törést is okozhat a kötésben. A mechanikai fáradás szintén a kötések elektromos ellenállásának növekedését eredményezi [45, 46].

Elektromos kihívások

Az akkumulátorok összekapcsolásakor, függetlenül a kötési technológiától és az elektromos áramkör típusától, elkerülhetetlen, hogy a kötésnek saját elektromos ellenállása legyen. Ez a kötési ellenállás. A töltés és kisütés során a kötési ellenállásnak két közvetlen hatása van: energiaveszteséget és hőtermelést okoz a kötési tartományban. Mindkettő mértéke az elektromos ellenállás nagyságától függ. Az energiaveszteség közvetlenül befolyásolja az akkumulátor hatásfokát, csökkenti annak hasznosítható kapacitását. Minél nagyobb az ellenállás, annál több energia disszipálódik, csökkentve a jármű meghajtására rendelkezésre álló energiát, ami a lehetséges hatótávolság lerövidülésében jelentkezik [47]. Ráadásul a disszipált energia hővé alakul át, ami – a működés megváltozása mellett - a cella gyorsabb degradációját és gyorsuló öregedését eredményezi [48, 49]. Extrém esetben akár tűz vagy robbanás is előfordulhat [50]. A lítium-ion cellákon belüli kémiai átalakulások és a fokozott öregedési sebesség gyártótól függően különböző hőmérséklet-tartományokban következnek be. Például a Panasonic a cellák 60 °C alatti üzemeltetését javasolja [28], miközben a Samsung 75 °C-os működési határt ad meg [51]. A fent említett hatások tovább erősödhetnek, ha a csatlakozásnál korrózió is megjelenik [52, 53].

Metallurgiai kihívások

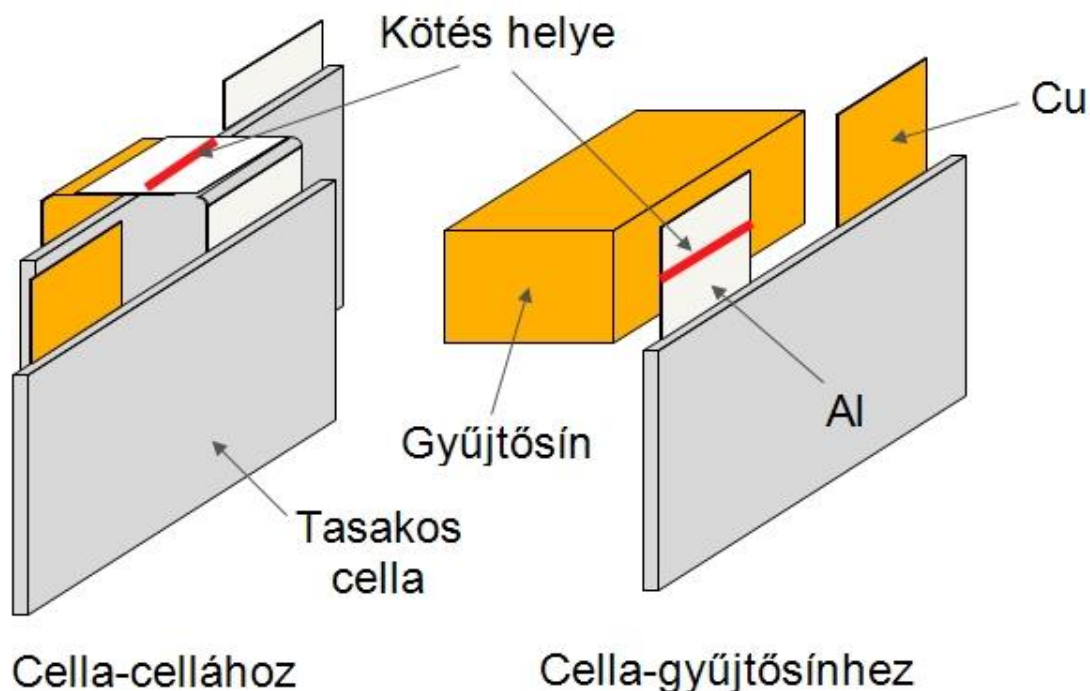
Az elektromos csatlakozásokban a fém-fém érintkezések oxidációját tekintik a legsúlyosabb degradációs mechanizmusnak [54, 55]. Az alumíniumon azonnal oxid réteg növekszik. A degradáció kevésbé súlyos, ha az alumínium csak az egyik csatlakozási partner. A réz oxidációja összetettebb, a szigetelő oxid réteg lassabban növekszik [56]. A keletkező intermetallikus vegyületek a mechanikai szilárdság csökkenését és az elektromos kötési ellenállás növekedését okozzák [57]. Kialakulásuk legtöbbször a folyamatparaméterek optimalizálásával kontrollálható. Ugyanakkor az akkumulátor működése során megemelkedett hőmérséklet és az áram jelenléte elősegíti a diffúziót és ezáltal intermetallikus vegyületek ellenőrizetlen kialakulását, vagy a már meglévő mennyiség növelését [56].

A fenti kihívásokra adott válaszként elmondható, hogy az egyik legfontosabb szempont, hogy a kötési folyamat során a cellák hőmérséklete soha ne érje el a gyártó által megadott kritikus hőmérsékletet, hogy ne következzenek be nemkívánatos kémiai reakciók, amelyek lerövidíthetik az akkumulátor élettartamát, vagy akár használhatatlanná is tehetik azt. Egy másik fontos szempont, hogy a kötés során minimálisra csökkentsük az akkumulátorházra ható mechanikai igénybevételt is, továbbá, hogy biztosítsuk az akkucella házának teljes épségét.

A kötések minőségét illetően jóval összetettebb optimalizálást kell végezni. Először is a kötéseknek kiváló reprodukálhatósággal kell rendelkezniük, mivel minden egyes cella teljesítménye hatással van az egész csomagra, és egy-egy akkumulátorcsomagban akár több ezer cella lehet összekötve. Egyetlen hibás kötés is eltérő öregedési sebességet okozhat, ami a teljes csomag teljesítményének és élettartamának a csökkenéséhez vezethet. Ezen felül a kötéseknek számos biztonsági előírásnak, valamint térfogat- és súlykorlátozásnak is meg kell felelniük. Az illesztéseknek viszonylag széles hőmérséklettartományban (-40 és $+50^{\circ}\text{C}$ között) kell működniük, minél jobb korrózió- és hőállósággal kell rendelkezniük minél kevesebb intermetallikus vegyületet képződése mellett [58]. A kötések minőségének legfontosabb jellemzői azonban az **elektromos és mechanikai tulajdonságuk**. A cél a lehető **legkisebb elektromos ellenállás** a lehető **legnagyobb mechanikai szilárdság mellett** az adott feltételek (anyagok, geometria stb.) között. Döntően ezen kihívások teljesíthetősége határozza meg az alkalmazandó kötéstechnikák körét. A lehetőségeket az 1.4 alfejezetben mutatom be.

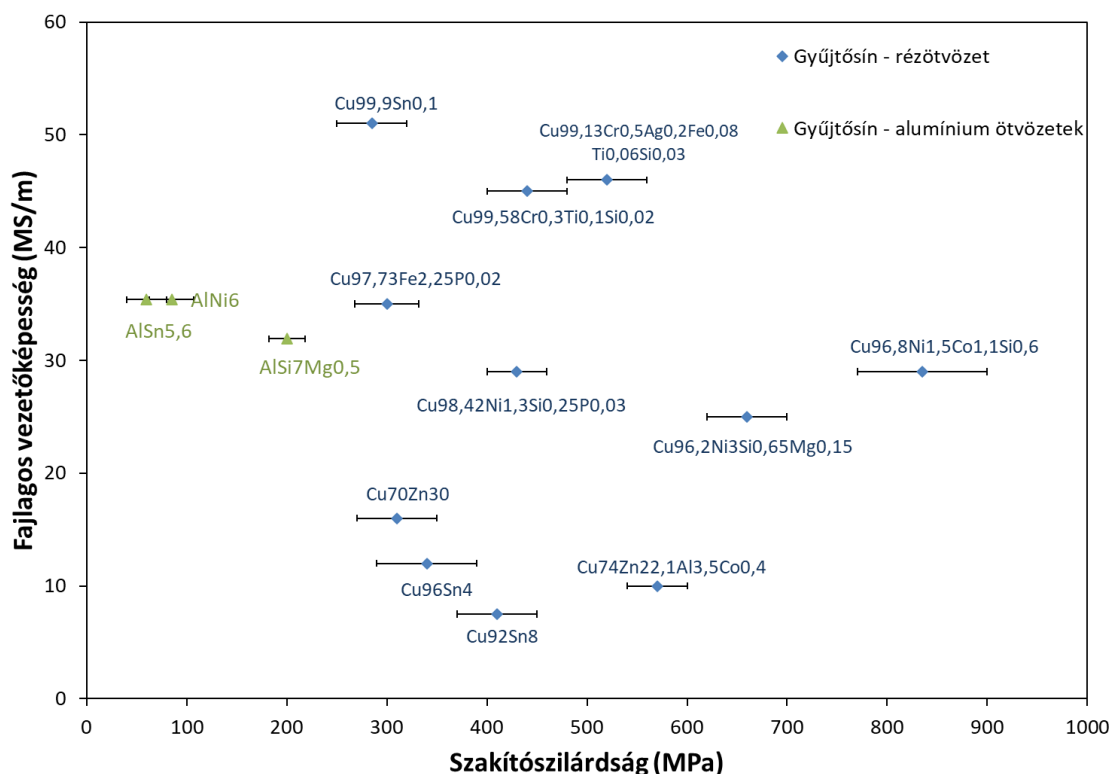
I.4. Akkumulátorcellák kötésének módjai és anyagai

A nagy teljesítményű akkucsomagokat akkumulátorcellák soros, illetve párhuzamos összekötésével alakítják ki. A sok kis cellát vagy közvetlenül, vagy gyűjtősin segítségével rögzítik egymáshoz [59], ahogy azt például a 10. ábra mutatja.



10. ábra: Tasakos cella másik cellához (bal oldalon), illetve gyűjtősínhez (jobb oldalon) csatlakoztatása. A jobb oldali cella a bal oldaliakhoz képest 180 fokkal el van fordítva [59].

Mindkét eset bonyolult anyagtudományi kihívásokat jelent. Elektromos járművekhez létrehozott akkubankok kötése esetén a felhasznált anyagok fontos tulajdonsága azok vezetőképessége és szakítószilárdsága. Azt, hogy a kötések megvalósítása során felmerülhető anyag hol helyezkednek el a fajlagos vezetőképesség – szakítószilárdság síkon, a [60] hivatkozás felhasználásával általam kiegészített 11. ábrán mutatom be. A hengeres Li-ion cellák házának és saruinak anyaga általában az úgynevezett Hilumin[®], ami egy vékony (1-5 μ m) nikkel réteggel bevont (0,1-1,2 mm vastag) DC04 acél [61, 62]. A DC04-es acél egy vas alapú (Fe) ötvözet, amely maximálisan 0,08 % szenet, 0,03 % foszfort, 0,03 % ként, és 0,4 % mangánt tartalmazhat [63, 64, 65]. Megjegyzem, hogy kísérleteim első modellanyaga a DC04-hez nagyon hasonló összetétellel és tulajdonságokkal rendelkező DC01-es acél volt. Szögletes és tasakos cellák esetén az anód anyaga általában réz, esetleg nikkel, a katód pedig alumínium. Gyűjtősínként legtöbbször valamilyen réz vagy alumínium ötvözetet használnak. A réz és ötvözetek jobban teljesítenek vezetőképesség és szakítószilárdság szempontjából, ugyanakkor azokban az alkalmazásokban, ahol az össztömeg is fontos, érdemes a réznél kb. 70 %-kal kisebb sűrűségű alumínium alapú gyűjtősínnek használatát megfontolni. A cellák forrasztásánál használt forrasztanyagokról az I.5.3.1. Lézeres forrasztás fejezetben írok.



11. ábra: A kötésekben felhasználható anyagok összehasonlítása vezetőképességük és szakítószilárdságuk szerint [60].

I.5. Kötéstechnológiák

A kötések lehetnek *oldhatók* és *nem oldhatók*. Az *oldható kötések*nél a kötés kialakítása olyan, hogy a szereléskor az alkatrészek sérülés nélkül vagy minimális sérüléssel szétszerelhetők. Ez lehetővé teszi a kötőelemek többszöri újrafelhasználását, ami környezetbarát és gazdaságos megoldás.

A *nem oldható kötési technikák* célja az, hogy a kezdetben különálló anyagdarabok egységes egésszé váljanak [66, 67]. Technológiailag persze sohasem közelítjük meg az „ideális” kötést, amelynél az egyik anyag atomjai elég közel kerülnek a másik anyag atomjaihoz ahhoz, hogy az atomok közötti vonzás kialakuljon, s így a két darab eggyé váljon, egy olyan állapotot létrehozva a kötendő anyagok felszínén, amely az egymástól történő elválást megakadályozza [68]. Ezt az állapotot nem egyszerű megvalósítani, hiszen a felületi érdesség, a szennyeződések jelenléte, az illeszkedési tökéletlenségek és a kötendő anyagok eltérő tulajdonságai praktikusán lehetetlenné teszik az atomi léptékben megvalósuló kötési folyamatot. A mérnöki gyakorlatban alkalmazott kötési eljárásokat úgy fejlesztették ki, hogy hő vagy nyomás, esetleg mindkettő egyidejű alkalmazásával leküzdjék az ideális kötés kialakulását akadályozó nehézségeket. Azonban az alkalmazott hő vagy nyomás károsan hat az egyesítendő anyagok mikroszerkezetére. Például a forró fém oxidálódásra hajlamos, ezért a kötési folyamatnak elegendő védelmet kell nyújtania az oxidáció ellen, hogy megakadályozza ezt a káros reakciót a környezeti oxigénnel, például megfelelő védőgáz alkalmazásával. A nem oldható kötések alkotóelemei a szétszerelés után már nem alkalmazhatók újra,

mivel a szétszerelés folyamatában megsérülnek vagy roncsolódnak. Ez egyben azt is jelenti, hogy a nem oldható kötések esetén a kötőelemek egyszer használhatóak.

Az akkumulátorbankok csomag- és modul- szintjén általában oldható, mechanikai csatlakozást (szegecseles, csavározás), míg cella szinten nem oldható kötések (hegesztés vagy forrasztás) alkalmaznak [9]. Mivel minden kötéstechnológiának megvan a maga előnye és hátránya, egy adott feladathoz a megfelelő kötési technológia kiválasztása komoly megfontolást igényel. Az elektromos járműipar akkumulátor csomagjaiban leggyakrabban alkalmazott kötéstechnológiák: a mechanikus kötések, az ultrahangos, a lézer- és a ponthegeztés, a wire-bonding, illetve a lágy- és a keményforrasztás [69]. A következőkben ezeket a technológiákat a tudományos szakirodalomra támaszkodva, az akkumulátorok csatlakoztatási feladataira való alkalmasságuk szempontjából mutatom be és értékelem.

1.5.1. Mechanikai kötés

Ebbe a csoportba oldható kötések, mint például a *csavározás*, illetve nem oldható kötések, mint például a *szegecseles* egyaránt tartoznak. 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 ellenereje szorítja össze a két összezsavazandó mintadarabot [66]. A *szegecseles* során egy szegecs segítségével alakítunk ki kötést két mintadarab között. Elektrokémiai és hőtágulási megfontolásokból a szegecs anyaga legtöbbször azonos az összekötendő anyagéval, ami ennek megfelelően jellemzően acél, sárgaréz, vörösréz vagy alumínium [70]. Mindkét technológia megfelelően jó mechanikai szilárdsággal képes kötések kialakítani a mintadarabok között. Ugyanakkor akkumulátor technológiai alkalmazásuk esetében elengedhetetlen, hogy a kötés megfelelően jó elektromos vezetőképességgel is rendelkezzen. Ez a modul és csomag szinten teljesül.

1.5.2. Hegesztés

A hegesztés olyan gyártási eljárás, amely (általában fémeket vagy hőre lágyuló műanyagokat) úgy köt össze, hogy a szorosan érintkező és/vagy összenyomott alkatrészeket összeolvasztja, majd hagyja lehűlni, ami permanens kötést eredményez. A hegesztés alapvetően különbözik az alacsonyabb hőmérsékletű kötéstechnikáktól, például a kemény- és lágyforrasztástól, amelyek nem olvasztják meg az alapfémeket. Az alapfém megolvasztása mellett adalékanyag is hozzáadható a kötéshez, hogy egy olvadt anyagból álló medencét képezzen, amely lehűlve olyan kötést képez, amely a hegesztési konfigurációtól függően (tompá, kulcslyuk, teljes behatolás stb.) akár erősebb is lehet, mint az alapanyag. A hegesztéshez tipikusan védőgázra is szükség van, hogy megvédje az olvadákot a szennyeződéstől és/vagy oxidálódástól. Jellemző a nemesgázok (pl.

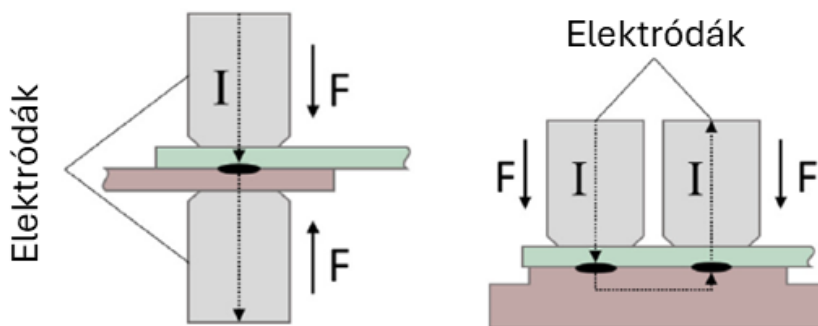
hélium vagy argon) használata, ugyanakkor a nitridizációra nem hajlamos anyagok hegesztésekor szokás nitrogén gáz alkalmazása is [71, 72].

A hegesztéshez számos energiaforrás használható, többek között gázláng (kémiai), elektromos ív, lézer, elektronsugár, sűrűlódás és ultrahang. Az akkumulátorok kötésekor leggyakrabban használt hegesztési technológiák a pont-, a lézer- és az ultrahangos hegesztés, ez utóbbi speciális eseteként a wire-bonding [41].

Ponthegesztés

A ponthegesztés egy széles körben használt ellenállás-hegesztési eljárás, amelyet legfeljebb 3 mm vastagságú, egymást átfedő fémlemezek összekötésére használnak. Előnyei közé tartozik a munkadarabok korlátozott deformációja, a nagy gyártási sebesség és a könnyű automatizálhatóság. A művelet során két vagy több fémfelületet összeszorítva, az érintkezési felületen keresztül áramot vezetve lokálisan termelünk hőt. A két elektróda egyaránt szolgál a fémlemezek egymáshoz szorítására és az áramnak a lemezekben való átvezetésére (12. ábra) [73]. A hegesztési területen kis olvadt fémmedencék képződnek az átfolyó nagy áram (1 000-100 000 A) hatására. Az ellenálláshegesztési módszerek általában hatékonyak és kevés környezetszennyezést okoznak, de alkalmazásuk kissé korlátozott, és a berendezés költségei magasak lehetnek [73]. Ennél az eljárásnál nem lehetséges adalékanyag használata.

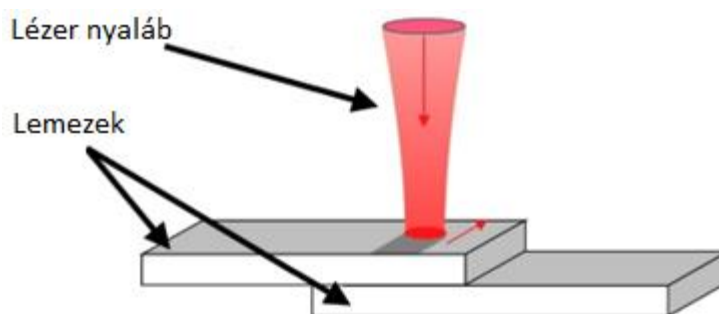
Ami a kötés elektromos vezetőképességét illeti, Brand és társai [74] megállapították, hogy az egyoldali ellenálláshegesztés alacsony vezetőképességű fémek hegesztésére alkalmas. A kötési ellenállást a hegesztési pontok számának a függvényében vizsgálva kimutatták, hogy minél több hegesztési pont készült, annál kisebb volt az eredő kötési ellenállás. A szerzők azt is állítják, hogy a ponthegesztésnek lényegesen kisebb volt a hőbevitel, mint a lézer- és ultrahangos hegesztésnek, amit magam eléggé meglepőnek tartok. Godek [75] korábban azt állapította meg, hogy ponthegesztés esetén az energiabevitel növelésével a kötési ellenállás csökkent, a hegesztési átmérő pedig nőtt, ami egy logikus következmény. Az akkumulátor cellák kötésénél a ponthegesztést egyre kevésbé alkalmazzák, aminek az az oka, hogy más hegesztési eljárásokkal nagyobb szakítószilárdságú és kisebb elektromos ellenállású kötések lehet létrehozni. Az autóipar más területein viszont továbbra is széles körben alkalmazzák, egy átlagos autóban több ezer ponthegesztést is végeznek ipari robotok.



12. ábra: Ponthegesztés működésének sematikus ábrája [41]

Lézersugaras hegesztés

A lézersugaras hegesztés során a munkadarabra fókuszált lézernyaláb olyan koncentrált hőforrást biztosít, amely keskeny, ugyanakkor mély hegesztési varratokat és nagy hegesztési sebességet tesz lehetővé. A (cw) lézersugaras hegesztés nagy teljesítménysűrűségű (néhány 10^5 –néhány 10^6 W/cm² nagyságrendű) megmunkálást tesz lehetővé, ami kis hőhatású övezeteket eredményez nagy fűtési és hűlési sebességek mellett. A behatolás mélysége arányos az abszorbeált energiával, és függ a fókusz sík mintafelszínhez viszonyított helyétől: a behatolás akkor a legnagyobb, ha a fókusz sík kissé a munkadarab felszíne alatt van. A hegesztés sebességtartományát alapvetően a rendelkezésre álló teljesítmény határozza meg; a határok természetesen függenek a munkadarabok anyagától és vastagságától. A folytonos üzemű lézerrendszereket általában vastag lemezek nagy volumenű, ugyanakkor precizitást igénylő, automatizált megmunkálására, elterjedten az autó- és repülőgépiparban alkalmazzák, mivel a folyamat könnyen automatizálható robotgépekkel. Vékony (mm alatti) anyagok hegesztésére szívesebben használnak impulzus lézereket [76, 77]. A lézeres hegesztés működésének sematikus rajza látható a 13. ábrán.



13. ábra: Lézeres hegesztés működésének sematikus rajza

A lézersugaras hegesztés jól alkalmazható akkumulátor cellák kötésére. Brand és szerzőtársai. [74] valamint Schmidt és mtsárai [78] közvetlen összefüggést találtak a hegesztési varrat méretei, területe és alakja, valamint a keletkező kötési ellenállás között. Bár az ilyen típusú összehasonlítás a nem egységesíthető folyamatparaméterek miatt nagyon óvatosan kezelendő, iránymutató, hogy Brandék a pont- és ultrahangos

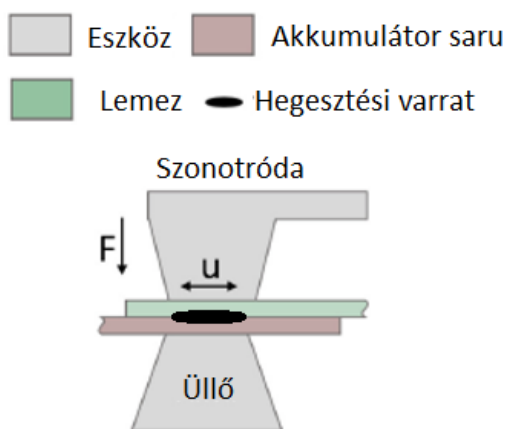
hegesztéssel összehasonlítva, a lézerhegesztésnél találták a legalacsonyabb kötési ellenállást, és úgy értékelték, hogy a hőbevitel jelentősen csökkenthető a folyamat-paraméterek optimalizációjával [74]. A lézeres kötéstechikák hátránya a viszonylag magas beruházási költség, valamint az, hogy a rendszert minden kötési problémára célszerű testre szabni. E hátrányok ellenére manapság egyre inkább előtérbe kerülnek a lézeres kötéstechikák, amit nagyban segít a kiváló sugárzási tulajdonságokkal és fókuszálhatósággal rendelkező nagy teljesítményű dióda- és szál-lézerek gyors fejlődése. Ezek ráadásul alacsony üzemeltetési költség mellett képesek iparilag releváns körülmények között, sűrű karbantartás nélkül működni. Ezeknek a modern lézereknek a használatával nagy sebességgel, pontossággal és kivételes reprodukálhatósággal működő, nagymértékben automatizálható lézeres hegesztőállomások építhetők. A lézeres kötési technikák komoly előnye a kis hőhatásövezet (HAZ=heat affected zone), amely a maradó feszültség minimalizálásával megakadályozza a megmunkált minta torzulását. A gyors megmunkálási sebesség azt is elősegíti, hogy csak minimális mennyiségű (rideg és nagy porozitású) intermetallikus vegyület (IMC) képződjön.

A releváns irodalomban számos fejlesztési ötlet tűnik fel. Mehlmann és társai [79] például a behatolási mélység szabályozására a térbeli teljesítménymodulációt, azaz a lézersugár körkörös forgatással történő betáplálását (wobbling) javasolják. Pantsar és társai [80] a zöld spektrumtartományban működő impulzus lézerek, illetve nanoszekundumos infravörös lézerek alkalmazását ajánlják a folyamat stabilitásának javítására, a fröccsenésképződés minimalizálására, valamint az intermetallikus vegyületek képződésének elnyomására a hegesztési szilárdság és vezetőképesség javítása érdekében. A folyamat kémiai vonatkozásait elemezve Helm és társai [81, 82] felhívták a figyelmet arra, hogy a mechanikai tulajdonságok degradálódnak, ha a réz lemezek a lézerhegesztési eljárás során oxidálódnak.

Ultrahangos hegesztés

Az ultrahangos hegesztés során nagyfrekvenciás akusztikus rezgéseket alkalmaznak helyileg az összenyomott munkadarabokra. A működési elv a 14. ábrán látható. A kötendő anyagokat egy rögzített üllő és egy ún. szonotróda közé helyezik, amely kHz-es, alacsony amplitúdójú akusztikus rezgést bocsát ki (lásd 14. ábra). A rezgőmozgás az összehegesztendő felületeket egymásba dörzsöli, így hozva létre szilárd hegesztési varratot. Ezt a technikát általánosan használják műanyagok, illetve eltérő anyagi minőségű darabok összekötésére. Előnye, hogy az ultrahangos hegesztésnél nincs szükség a munkadarabok külön rögzítésére, a felületeket a szonotróda és az üllő szorítja össze. Az ultrahangos hegesztés könnyen automatizálható, tiszta és pontos kötéseket készít; a hegesztés helye nagyon tiszta, és ritkán igényel utómunkálatokat. Jellemzően kis méretű alkatrészek pl. mobiltelefonok, szórakoztató elektronikai, illetve eldobható orvosi eszközök részegységeinek megmunkálására használják, de olyan nagyobb munkadarabok hegesztésére is alkalmazható, mint pl. egy kisebb autóiipari műszeregység. Az ultrahangos hegesztés fémek esetén jellemzően kis méretű, vékony, képlékeny fémek, pl. alumínium, réz, nikkel hegesztéseire korlátozódik. Az ultrahangos

hegesztés egy gyorsan fejlődő terület, amelynek számos aspektusa további tanulmányozást igényel. Ilyen például a hegesztési minőség és a folyamatparaméterek összefüggésének a vizsgálata [83, 84].



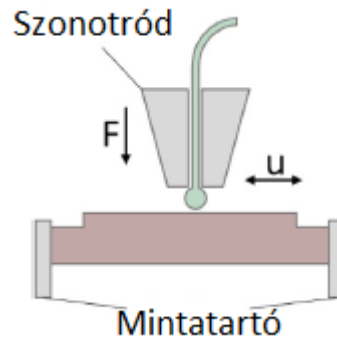
14. ábra: Akkumulátor cella kivezetésének a csatlakozóhoz kötése ultrahangos hegesztéssel [41].

Amint azt pl. Brand és mtársai [74] kimutatták, az ultrahangos hegesztés is alkalmazható akkumulátor cellák kötésére. Az elektromos ellenállás ebben az esetben is nőtt a kötési terület csökkenésével. Érdeemes megemlíteni, hogy az ultrahangos hegesztés nagyobb hőterheléssel jár, mint a lézer- és az ellenálláshegesztés. Azonban Brandék az akkumulátorokban alkalmazott kötések szempontjából a hőbevitelt nem értékelték kritikusnak. Zhao és mtársai [85] és Li és mtársai [86] vékonyréteg hőelemeket használtak a hőterhelés lokális mérésére. Eredményeik ellentmondanak Brandék állításának. Ők a hegesztési területtől 1 mm-re akár 660 °C-os hőmérsékletet is mértek. Raj [87, 88] és mtársai és McGovern és mtársai [89] alumínium és réz lemezek kötését vizsgálták elektromos ellenállás szempontjából különböző folyamatparaméterek függvényében, továbbá vizsgálták az intermetallikus vegyületek keletkezését is. A rezgések problémát jelentenek: Choi és mtársai [90] megjegyzi, hogy a folyamatból eredő rezgések átterjedhetnek az akkumulátorba, és ezzel károsíthatják azt. Kang és társai [91] és Li és társai [92] az összekötött tasakos vagy prizmás cellák numerikus vizsgálatait során azt tapasztalták, hogy a rezgések egy már meglévő hegesztési varratot károsíthatnak, miközben egy másik hegesztési varratot hoznak létre ugyanazon az összekötő elemen. A második hegesztés során olyan rezgések keletkeznek, amelyek feszültséget okoznak az első hegesztésben. Zhao és társai [46] azt tapasztalták, hogy a fáradás növeli az ultrahanggal hegesztett alumínium-réz minták ellenállását. A kötési ellenállás növekedése a fárasztás során azonosítható volt, ami lehetőséget nyújt annak az előrejelzésére, meddig teljesíti a kötés az elvárt feltételeket.

A kép tehát nem tiszta, van még tér az összefüggések konzisztens feltérképezésére. Bár a folyamatok nyomonkövetésével és javításával, a minőségbiztosítással, a hegesztés közbeni energialeadással kapcsolatosan sok kutatást végeztek az elmúlt években, ez különösen igaz az akkumulátorok ultrahangos hegesztésével kapcsolatban.

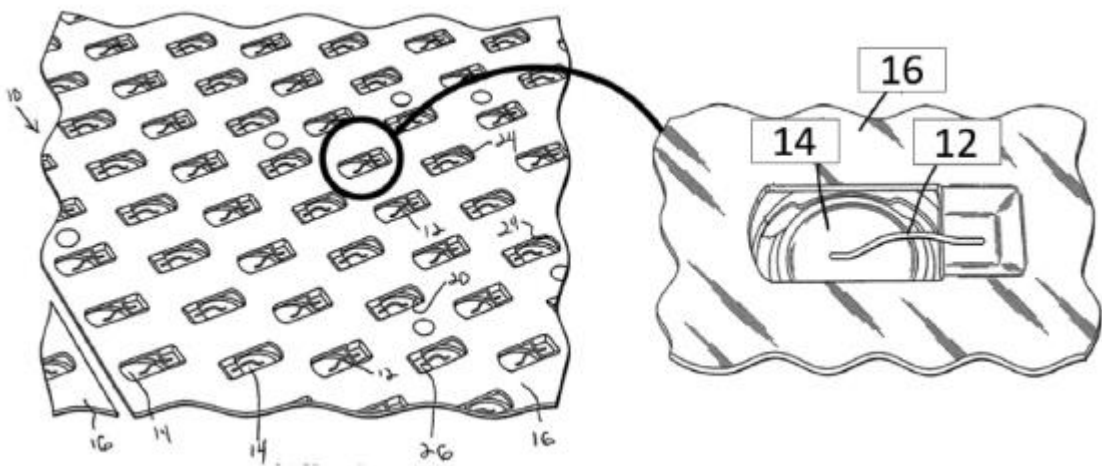
Wire bonding

A wire bonding a félvezető eszközök technológiájában rutinszerűen alkalmazott kötési technológia, amelyet a 15. ábrán mutatok be sematikus ultrahangos kötés esetén, hiszen itt a csatlakozásokat leggyakrabban termo-kompressziós kötéssel, ultrahangos kötéssel és termo-szonikus kötéssel állítják elő [93].



15. ábra: Wire-bonding ultrahangos kötéssel [41]

Nekem meglepetést okozott, hogy bár ez a technológia igencsak használhatónak tűnik, az akkumulátor-modulok gyártásával kapcsolatban wire-bondingról nem találtam tudományos szakirodalmat. Ugyanakkor a Tesla Inc. több szabadalommal rendelkezik wire-bonding használtáról akkumulátor-modulokban [94, 95, 96], és ezt a kötési eljárást alkalmazza is a Model S modelljében [97]. A 16. ábrán egy a Tesla US7923144B2 szabadalmából átvett [96] elrendezést mutatok be. Ebben az illesztéseket ultrahangos hegesztéssel végezték, megjegyezve, hogy bármilyen más eljárás is alkalmazható. Az alkalmazott alumínium huzalok átmérője 0,28-0,41 mm, a gyűjtőlemez bármilyen elektromosan vezető anyagból készülhet.

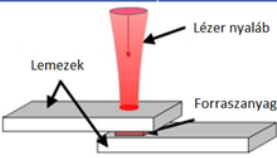


16. ábra: A Tesla US7923144B2 szabadalmában leírt, wire-bonding-gal készült kötés. A 14-es szám az akkumulátorcellát, a 12-es pedig az akkumulátorra csatlakoztatott vezetékét jelenti, amely a 16-tal jelölt gyűjtőlemezhez csatlakozik.

I.5.3. Forrasztás

A technológia több ezer éve létezik. Számos, régészeti ásatások során felfedezett tárgyról derült ki, hogy a részeket forrasztással kötötték össze. A kohászati ismeretek fejlődésével és az új fémek megjelenésével a technológia folyamatosan fejlődött. A réz- és ólomötvözetek voltak az első fémek, amelyeket forrasztással összekötöttek. A korai kohászok megtanulták azonosítani az alacsonyán olvadó eutektikumokat, ami lehetővé tette az összetett formák forrasztását ékszerek és használati tárgyak készítésekor. Az ipari forradalom elősegítette a forrasztott kötések használatának széleskörű elterjedését. Ezt a kötési eljárást ma is elterjedten használják. A forraszanyag-összetételek és a forrasztási technikák fejlődése folyamatos a mikroelektronikában, a távközlésben, az autó- és repülőgépiparban ugyanúgy, mint a vízvezetékszerelésben, vagy a dekoratív csomagolásban. Sok eljárás, forraszanyag és berendezéstípus létezik, amelyeket mindig az adott alkalmazásra kell megfelelően kiválasztani.

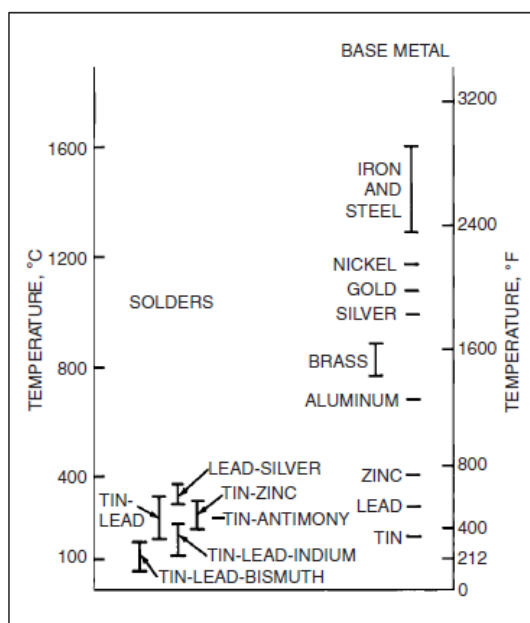
A forrasztás-alapú technológiákban az összekötendő darabokat egy segédanyag (az ún. forraszanyag, melyet angolul fillernek hívnak) megolvasztásával és ezt követő újbóli megszilárdulásával kötik össze. Kritikus a kötendő felületek nedvesítése az olvadt forraszanyaggal. A kötés kialakításához szükséges hőmérséklettől függően a forraszanyag-alapú kötési technológiákat két csoportra osztják: lágyforrasztás esetén a forraszanyag liquidus hőmérséklete $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt van, míg keményforrasztás esetén meghaladja azt [71, 72, 98]. A lágy- és keményforrasztás egyaránt optimális kis elektromos érintkezési ellenállással rendelkező kötések létrehozására, amit az elektronikai iparban való széles körű alkalmazásuk is igazol. A keményforrasztás nagyobb mechanikai szilárdságú kötések eredményez [72]. A 3. táblázat – a lézeres forrasztás példáján – összefoglalja a forraszanyag alapú kötési technológiák tulajdonságait.

	Lézeres forrasztás	
	Lágyforrasztás	Keményforrasztás
Sematikus elrendezés		
Hőmérséklet	$<450^{\circ}\text{C}$	$>450^{\circ}\text{C}$
Forraszanyag	Általában ón alapú	Ón helyett Cu, Ag, Si alapú
Folyatószer	Ritkán	Szinte mindig
Előnyök	Alacsony hőterhelés, csak a forraszanyag olvad meg	
	Alacsony hőmérséklet	Mechanikailag erősebb kötés
Hátrányok	Érzékeny a felület tulajdonságaira (tisztaság, érdesség)	
	Mechanikailag gyengébb kötés	Kevésbé univerzális

3. táblázat: A lágy- és kemény forrasztás tulajdonságai [71, 72]

A forrasztási technológia nagyon érzékeny az összeillesztendő darabok felületi minőségére [99]. A fémfelületeket általában oxidrétegek és szerves szennyeződések borítják, amelyek erősen befolyásolják a nedvesedési viszonyokat, ezzel akadályozva a kötés kialakítását és/vagy rontva annak minőségét. Ez a probléma megfelelő felület-előkezelési módszerek és/vagy megfelelő folyasztószer alkalmazásával oldható meg. A folyasztószer olyan vegyület, mely fő feladata a vékony oxidréteg eltávolítása és a forrasztás során az oxidáció bekövetkezésének megakadályozása, valamint a forraszanyag megfelelő nedvesítése. A legelterjedtebb kolofóniás (tülevelű fák gyantájából nyert anyag) alapú folyasztószer mellett különböző szintetikus vegyületeket is szoktak alkalmazni. A folyasztószer olvadási hőmérséklete kisebb, mint a használt forraszanyagé. Megjegyzem, hogy sem a forraszanyagok, sem a folyasztószer nem univerzálisak, azaz mindkettőt egyedileg kell kiválasztani minden egyes összeillesztendő fémkombinációhoz [71, 98]. A felületek tisztítására kémiai (pl. zsírtalanítás) és fizikai eljárások (pl. mechanikai érdesítés, amelynek a célja persze – mint a későbbiekben látni fogjuk – nem vagy nem csak a tisztítás) egyaránt alkalmazhatók.

Mivel a forraszanyag liquidus hőmérséklete kisebb, mint az összekötendő alapfémeké, a lézeres forrasztási technikák a hegesztési technikáknál alkalmazottaknál kisebb befektetett energiával megvalósíthatók. A forraszanyagok liquidus hőmérsékletét a 17. ábrán mutatom be. Mivel az akkumulátorcellák érzékenyek a hőterhelésre, ennél az alkalmazásnál az alacsonyabb munkahőmérséklet egyértelmű előnye a forrasztásnak. További előny, hogy a forraszanyagot többféle módon lehet hozzáadni a kötési rendszerhez, például előre felhordott forraszanyaggal paszta vagy lemez formájában, porinjektálással vagy forrasztóhuzal használatával a kötési területen. Ezen felül az alkalmi forrasztási kötések, amelyek tökéletlenségeket tartalmazhatnak, könnyen átdolgozhatóak vagy javíthatóak újraolvasztással.



17. ábra: Az alkalmazott forraszanyagok olvadási hőmérséklete [100]

Az akkumulátorok kötéstechológiájában legelterjedtebben hegesztést alkalmaznak cella szinten. Mivel itt a kötések elektromos ellenállása legalább annyira fontos, mint a kötések mechanikai stabilitása, felmerül a kérdés, hogy a forrasztás, mint a mikroelektronikában már jól bevált technológia, alkalmas lehet-e erre a célra. Kihasználható-e az az előnye a hegesztéssel szemben, hogy a sokkal kisebb ellenállású forrasztóanyag felhasználásával a kötendő anyagok ellenállásánál kisebb elektromos ellenállású kötést lehet vele létrehozni.

Annak vizsgálatára, hogy mennyire alkalmas ez a technológia akkumulátorok összekapcsolására, Brand és m társai [101] pákás forrasztással kötötték össze hengeres cellákat, különböző liquidus hőmérsékletű forrasztóanyagokat használva sárgaréz, illetve nikkelezett acéllemezekkel. Korábbi eredményeikkel [74, 102] összevetve megállapították, hogy a lézeres, ellenállásos és ultrahangos hegesztéssel összehasonlítva a forrasztás adja a legalacsonyabb csatlakozási ellenállást. Solchenbach és munkatársai [59] különböző alumínium-réz akkumulátor-összekötések lézeres forrasztását vizsgálták, ahol az alumínium közvetlenül forrasztóanyagként működött. Közvetlen összefüggést találtak a kötésben lévő intermetallikus vegyületek mérete és a kötés ellenállása között: minél kisebb volt ezen vegyületek száma, annál nagyobb volt az ellenállás. Azt is megfigyelték, hogy a kötést 200 amperes egyenárammal 1-24 órán keresztül terhelve a kialakult intermetallikus vegyületek egyértelműen nagyobb méretűek voltak. A lézerhegesztésnél tapasztaltakhoz hasonlóan a kötési ellenállás nőtt a kötési terület csökkentésével [101, 59].

A forrasztóanyag-alapú kötési technológiák különböző eszközökkel valósíthatók meg: alternatívák a pákás-, kemencés-, ellenállás-, permetezéses-, láng-, ultrahangos-, illetve lézeres forrasztás.

A pákás forrasztás (iron soldering) alkalmazása során árammal fűtött forrasztópáka segítségével, hővezetés útján melegítjük a munkadarabokat és a forrasztóanyagot a forrasztási hőmérsékletre. Az eljárás jellemzően manuális és nem automatizálható. A legelterjedtebb módszerek egyike, amelyet egyszerűbb forrasztások előállítására használnak.

A kemencés forrasztás során az összeillesztett munkadarabokat egy kemencébe helyezve a forrasztási hőmérsékletre melegítik. Ez az eljárás sok esetben konzisztens és kielégítő eredményt ad, különösen, ha sok (azonos) kötés egyidejű kialakítására van szükség. A fűtés történhet levegőben vagy védő atmoszférában. A forrasztóanyag természetesen előzetesen megfelelő méretben és formában a forrasztási helyekre kerül. Hátrány, hogy a környezetnél magasabb forrasztási hőmérséklet a kötendő munkadarabokat károsíthatja.

Az ellenállás forrasztás analóg a ponthegesztéssel. A munkadarabot is magában foglaló áramkörben az elektromos áram által a kontakt ellenálláson létrehozott Joule hő használjuk a forrasztóanyag megolvasztására. Az ellenállás forrasztáshoz a munkadarabot vagy egy föld- és egy mozgatható elektróda közé, vagy két mozgatható elektróda közé kell helyezni, hogy az elektromos áramkör létrejöjjön. A berendezés főbb egységei az áramforrás, a vezérlőegység és az elektródák. A forrasztási sebesség, a helyi

felmelegedés és az energiafogyasztás szempontjából előnyösebb lehet több, gördülő vagy egyedi tervezésű elektróda használata. A forrasztanyagot vagy a munkadarabokra helyezéssel vagy adagolással kell a kötés helyére juttatni. Tipikus alkalmazás a pont kötés.

A permetezéses forrasztás (spray soldering) során a permetező pisztolyban előzetesen felmelegített forrasztanyag permet formájában kerül fel a munkadarabra. Ezt a módszert általában akkor választják, ha a munkadarabok kontúrja nehezen kezelhető más forrasztási eljárással. Gázzal vagy elektromosan fűtött pisztolyokat használnak a folyamatosan adagolt szilárd forrasztanyaghoz.

A lángforrasztás egy gázláng hőjét használja a munkadarabok kívánt hőmérsékletre melegítéséhez. A láng és ezzel a forrasztási hely hőmérsékletét a felhasznált gáz vagy gázkeverék határozza meg. A legmagasabb lánghőmérsékletet acetilénnel érik el. Alacsonyabb hőmérsékletet produkál a propán, bután, földgáz és ipari gáz. A forrasztanyagot itt is vagy előre elhelyezik, vagy a kötési területre adagolják. Tipikusan cső alakú alkatrészeken/szerelvényeken történő forrasztás esetén alkalmazzák, mind manuálisan, mind automatizáltan. Kritikus pont a szénlerakódás, amely rontja a kötés minőségét. A kormos láng kialakulása a folyamatparaméterek optimalizálásával kerülhető el.

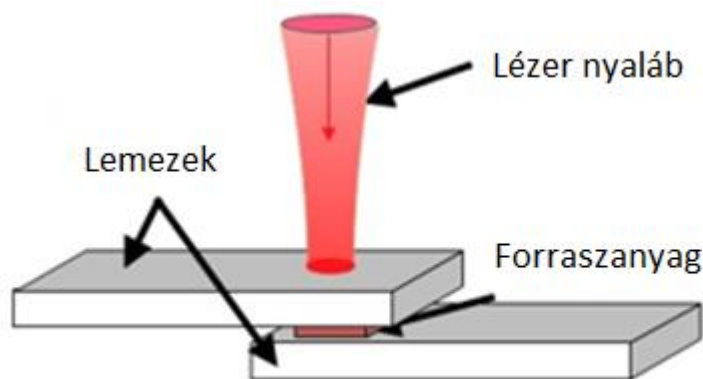
Végül az ultrahangos forrasztás egy olyan változat, amelyben nagyfrekvenciás rezgési energiát használnak a forrasztanyag megolvasztásához. Mivel ennek a technikának az a sajátossága, hogy a rezgőmozgás az érintkező felületeket egymásba dörzsöli, a felületek minősége, tisztasága nem annyira kritikus, a művelet folyasztószer használata nélkül végezhető. Ultrahanggal forrasztják például a klímaberendezések alumínium tekercseit, illetve nehezen forrasztható fémek felszínére visznek fel forrasztbevonatokat.

I.5.3.1. Lézeres forrasztás

A lézersugaras forrasztásnál egy lézernyaláb biztosítja a forrasztáshoz szükséges energiát. A technológia egyszerűségét átlapolt geometria esetére mutatja az 18. ábra. Ez a forrasztási eljárás akkor különösen előnyös, ha kis kötési terület pontosan hangolható, jól lokalizált felmelegítésére van szükség, különösen hőérzékeny elemek közelében. Természetesen nagyobb területek is forraszthatók ezzel az eljárással, pl. a fókuszált nyaláb pásztázásával, vagy – több kW lézer teljesítmény rendelkezésre állása esetén – a nyaláb keresztmetszetének nyitásával. A sugár multiplexelésével egyidejűleg több kötés is kialakítható.

Ezt a forrasztást is általában folyasztószerrel végzik. A forrasztanyagot és a folyasztószerrel általában előformaként viszik fel a kötési területre. Mivel a lézeres forrasztás során az energiát abszorpció útján csatoljuk be az anyagba, a folyamat megtervezésekor és az alkalmazandó lézer kiválasztásakor kiemelten fontos a megmunkálandó felszínek optikai tulajdonságainak alapos ismerete. A lézeres

forrasztást olyan alkalmazásokban érdemes alternatívaként tekinteni, ahol a darabszám viszonylag alacsony, ugyanakkor a kötés elvárt megbízhatóságának szintje magas.



18. ábra: A lézeres forrasztás működésének sematikus ábrája

Az időben precízen adagolható és jól lokalizált felmelegítéssel a lézeres anyagmegmunkálás lehetőséget nyújt a hőterhelés minimalizálására [69]. Becker már egy korai kutatásában kiemelte, hogy a lézeres forrasztás, mint non-kontakt eljárás, lehetővé teszi a forraszanyag megolvasztásához felhasznált energia finom szabályozását, és általánosságban ideális megközelítésnek tűnik hőérzékeny anyagok csatlakoztatására [103]. A lézeres forrasztás további előnye a forraszanyag többféle módon történő hozzáadásának lehetősége a kötési területhez, és az is, hogy nem támaszt túlzottan magas követelményeket a lézersugár optikai minőségével szemben [71]. A lézeres forrasztás jól működik különböző anyagok összekötésekor is [104].

Ahogy azt Zwicker és mtsai összefoglaló cikkükben rögzítik [41], az alacsony kötési ellenállás és jó reprodukálhatóság miatt a lézeres forrasztás ígéretesnek tűnik az egyedi akkumulátorcellák összekapcsolására is. Kastler és Menzl a lézeres forrasztást az akkumulátorcsomag-technológia innovációjaként írják le [105]. A Kreisel Electric szabadalmaztatott egy akkumulátorcsomagot, amelyben a hengeres cellákat lézeres forrasztással kötik egymáshoz [106]. A fent említettek alapján a lézeres forrasztást vonzó alternatívának tartom akkumulátorcellák kötésére, mind a mechanikai, mind az elektromos tulajdonságok lehetséges optimalizációjának szempontjából. Meglepett, hogy nem találtam erre irodalmi igazolást. Bár számos folyóiratcikk foglalkozik a különböző fémek lézeres hegesztésének mikrostrukturális, mechanikai és elektromos vonatkozásaival [107, 108, 109, 110, 111], nem találtam olyan munkát, amely egyszerre értékelte volna a lézerrel forrasztott csatlakozások elektromos és mechanikai viselkedését. Érthető módon, az autóiipari alkalmazásokra összpontosító kutatásokban, ahol a kötés erőssége és esztétikai minősége a lényeges kérdés, a lézeres keményforrasztással [112] és a lézeres hegesztés-keményforrasztással [113] foglalkozó (áttekintő) cikkek kizárólag a kötések mechanikai és mikrostrukturális jellemzésével foglalkoznak. Li és mtsai pl. elemzik a lézeres keményforrasztás előnyeit és korlátait különböző anyagok összekötése esetére [111]. Ugyanakkor a

releváns 67 hivatkozást áttekintve, egyetlen egyet sem találtam, amely figyelmet szentelt volna a kötés elektromos ellenállására.

Ez volt a motiváció amögött, hogy értekezésemben beszámolok a kritikus folyamat-paramétereknek a lézeres forrasztott kötések minőségére gyakorolt hatásáról, és egyidejűleg elemzem a lézerrel forrasztott Hilumin® és DC01 lemezek elektromos és mechanikai tulajdonságait. Azonosítom azt az optimális folyamatparaméter-ablakot, amelyben a lézeres forrasztással előállított kötések optimális húzószilárdságot és elektromos ellenállást mutatnak. Ezen túlmenően rávilágítok az elektromos és mechanikai tulajdonságok, valamint a újra szilárdult forrasztanyag morfológiája közötti korrelációra, amelyet modellezéssel is megtámogatok az elektromos ellenállás esetén.

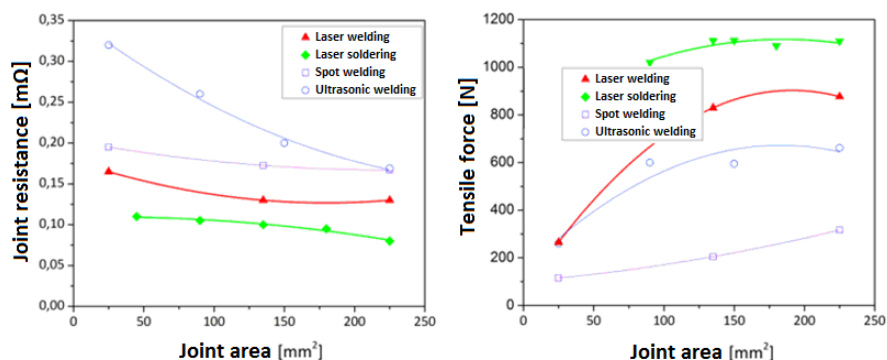
I.5.4. Konklúzió

Hogy tovább erősítsem azt a megállapítást, hogy a lézeres forrasztás eredményesen alkalmazható az akkumulátor cellák kötésére is, a 4.táblázatban – amelyet, mint hivatkozást, nem magyarítottam – összevetem az akkumulátor cellák kötésére szóba jövő eljárások előnyeit és hátrányait. Az összehasonlítás alátámasztja, hogy a forrasztás megfelelő eljárás lehet erre a célra, ráadásul a lézerrel végzett forrasztás további előnyöket is kínál: kis hőterhelés mellett kiváló elektromos tulajdonságokkal rendelkező kötések hozhatók létre, különböző anyagok összekötése esetén is.

Manufacturing technology	Advantages	Disadvantages
Ultrasonic welding	→ Self-tooling → Joining of dissimilar materials → Solid state process → No filler metals or gases → Good for thin sheets, wires, or multi-layer sheets → Low energy consumption → Excellent for highly conductive materials → Fast process	→ Clamping battery may be critical → High heat generation can damage batteries → Expensive consumables → Restricted to lap joints → Limited joint thickness (<3 mm) (Lee et al., 2010) → Challenging on high strength and hard materials → Sonotrode sticking → Sensitive to surface conditions → Possible audible noise → Large weld indentation
Wire Bonding	→ Joining of dissimilar materials → Widely applied in electronics industry → Easy automatable	→ Only suitable for thin wires → Low wire and join strength → Clamping battery may be critical → Complex manufacturing
Mechanical assembly (Force fitting)	→ Easy dismounting and recycling → Easy repair → Cold process	→ Potential mechanical damage and loosening → Additional weight due to additional parts → High connection resistance → Expensive → Labour intensive
Soldering and Brazing	→ Joining of dissimilar materials → Widely applied in electronics industry	→ Need for solder material → Joint strength → Debris → Labour intensive → Challenges in dissimilar joining
Laser beam welding	→ High speed → Low thermal input → Non-contact process → Easy automatable → High precision	→ High initial costs → Material reflectivity → Need of shielding gas → Needs good joint alignment → Quality control is difficult → Process monitoring is difficult → Challenges in dissimilar joining
Resistance welding	→ Low cost → No filler metals or gases → Efficient and fully automatable → Self-tooling → Low heat input (Brand et al., 2015) → Existing technology for weld quality control	→ Risk of expulsion → Electrode sticking/wear → Difficult for highly conductive materials → Difficult to produce large joints → Difficult for joining more than two layers → Challenges in dissimilar joining

4. táblázat: Az akkumulátor cellák kötésére felmerülő technológiák előnyei és hátrányai [41]

Annak érdekében, hogy még tovább erősítsem azt a következtetést, miszerint a lézeres forrasztás, mint technológia valóban kiváló alternatíva lehet, a 19. ábrán bemutatom Brandt és m. társai egyik kísérleti eredményét, amely szerint – a közleményben leírt feltételek között – a forrasztott kötések rendelkeztek a legnagyobb mechanikai szilárdsággal és a legalacsonyabb elektromos ellenállással.



Joint	Resistance spot welding	Ultrasonic welding	Laser welding	Laser soldering
Min. joint resistance [mΩ]	0,167	0,169	0,130	0,080
Max. tensile force [N]	316,78	661,32	876,8	1112,30

19. ábra: Különböző technikával készült kötések elektromos és mechanikai tulajdonságai [101]

II. CÉLKÍTÜZÉS

Napjainkban az elektromos és hibrid járművek elektromos energiaforrásaiként szolgáló akkumulátorcsomagok kötése népszerű téma a műszaki és tudományos kutatások területén. Mivel akár több ezer egyedi elemet kell összekötni, a folyamat optimalizálása kulcsfontosságú feladat, mivel akár csekély javulás a legalacsonyabb összekötési szinten összességében jelentős nyereséget eredményezhet [41]. Az akkumulátorcellák kötésének legfontosabb tulajdonságai annak elektromos ellenállása és mechanikai szilárdsága. Az elektromos tulajdonságok az energiafelhasználás hatékonysága (azaz a tárolt töltésekre vetített veszteségek minimalizálása), míg a mechanikai tulajdonságok az akkumulátorok tartóssága és biztonsági okok miatt fontosak.

A forrasztás a mikroelektronikában már jó bevált kötéstechnológia. Sajátos tulajdonsága, hogy a csatlakoztatandó anyagok elektromos vezetőképességénél akár nagyobb elektromos vezetőképességű forrasztóanyagok alkalmazásával alacsony ellenállású kötések kialakítására képesek (akár a kötendő anyagok ellenállása alatti kötések is létre tudunk hozni). A lézerek használata a forrasztás hőforrásaként a folyamat energiájának szigorú és pontos szabályozása révén rugalmasságot kölcsönöz az akkumulátorok kötéséhez. A lézerforrasztással előállított kötés kiváló elektromos jellemzői megfelelő szilárdsággal párosulnak [101], így vonzó gyártási lehetőséget biztosítanak az akkumulátorcellák kiváló minőségű kötéséhez.

Ebből az igényből fakadóan kutatásom során fő célom az volt, hogy egyidejűleg optimalizáljam két vékony fémlemez között lézeres forrasztással autogén módon átlapolt geometriában (lap joint) létrehozott kötések elektromos és mechanikai tulajdonságuk alapján. Lézeres forrasztással létrehozott kötések tulajdonságainak optimalizálására kétféle lehetőség van: folyamat (forrasztóanyag mennyiség, tisztítási módszer) és lézer paraméterek (teljesítmény, besugárzási idő) közvetlen változtatásával történő optimalizálás. Ezen paraméterek közvetlen változásának hatására elsősorban a forrasztóanyag-hő kölcsönhatás típusai miatt a megmunkálás után három különféle kötési morfológia alakul ki a lézer forrasztott lemezek között.

Kutatásaim egyik célja az volt, hogy feltárjam a kapcsolatot egyrészt ezen paraméterek és a forrasztóanyagban megfigyelt morfológiai osztályok között, másrészt, hogy megvizsgáljam, hogy az egyes morfológiai osztályok továbbá a paraméterek hatása milyen karakterisztikus elektromos és mechanikai viselkedést eredményeznek.

Kutatásaim másik célját képezte a lézeres forrasztások elektromos tulajdonságainak mérése, hiszen ahhoz nincs kidolgozott szabvány, illetve a kialakult kötés tulajdonságainak a kötés elektromos tulajdonságára gyakorolt hatásainak feltárása numerikus modell útján. Ehhez szükség van egy olyan realiztikus modell felépítésére, amely a megfelelő peremfeltételek kiválasztása után, segítséget nyújt a mögöttes fizikai effektusok megértésére/feltárására.

A kutatómunkám során ezen túl elektromos és mechanikai jellemzők mérésére összpontosítottam. Ehhez külső tápegységgel ellátott négy pontos ellenállásmérést, digitális 3D mikroszkópot és szakítógépet alkalmaztam. A kutatási mintának a legtöbb esetben az akkumulátor cellák burkolatának és saruinak anyagát, a nikkelbevonattal

rendelkező rozsdamentes acél ötvözet szalagokat alkalmaztam. Ugyanakkor az eredmények univerzalitásának igazolása érdekében a lézeres forrasztási kísérleteket DC01 acélszalagokkal is megismételtem. A vékony lemezeket egy speciálisan erre a célra tervezett minta befogóban (jigben) rögzítettem a megmunkálás alatt.

III. ANYAGOK, MÓDSZEREK, ELŐKÍSÉRLETEK

Kísérleteim során a vékony fémlamezek összeforrasztására hőforrásként folyamatos üzemű (cw) szállévert használtam. Ebben a fejezetben a saját építésű optikai rendszer leírása mellett a kötések jellemzésére használt eszközöket és módszereket ismertetem.

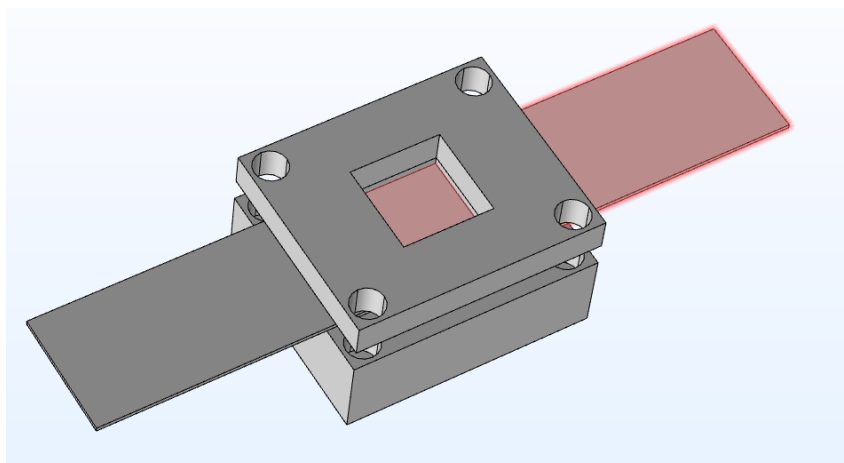
III.1. Anyagok és módszerek

Kísérleteimet két anyagpárral végeztem. A Hilumin® a TATA Steel által kifejlesztett és védjegy oltalommal védett termék: olyan rozsdamentes acéllemez, amelyet nikkel réteggel vonnak be a korrózióállóság növelése érdekében [61, 62]. Ezt az anyagot előszeretettel alkalmazzák a hengeres akkucellák burkolata, illetve a saruk anyagaként. Kísérleteimben a kötendő Hilumin® lemezek vastagsága 0,25 mm, szélessége 9,0 mm volt. Hosszuk az adott kísérlet követelményeinek megfelelően 30,0 mm és 80,0 mm között változott. Az eredmények univerzalizálásának bizonyítására a fémiparban széles körben elterjedt, hidegen hengerelt DC01 acéllemezek autogén kötését is megvalósítottam. A használt DC01 lemezek vastagsága 0,50 mm, szélessége 16,0 mm, és hossza 60,0 mm volt. A két anyagnak az értekezés szempontjából fontos tulajdonságait az 5. táblázat foglalja össze:

Anyag	Vastagság, d (mm)	Fajlagos ellenállás, ρ (Ωm)		Szakítósz., (MPa) [114, 115]	Vonalm. érdesség R_a (μm) [62, 63]
		Mért	Irodalmi érték [63, 115]		
Hilumin®	0,25	$7,25 \cdot 10^{-7}$	-	342	1,8
DC01 acél	0.5	$1,62 \cdot 10^{-7}$	$(1,43-1,74) \cdot 10^{-7}$	390-540	1,9

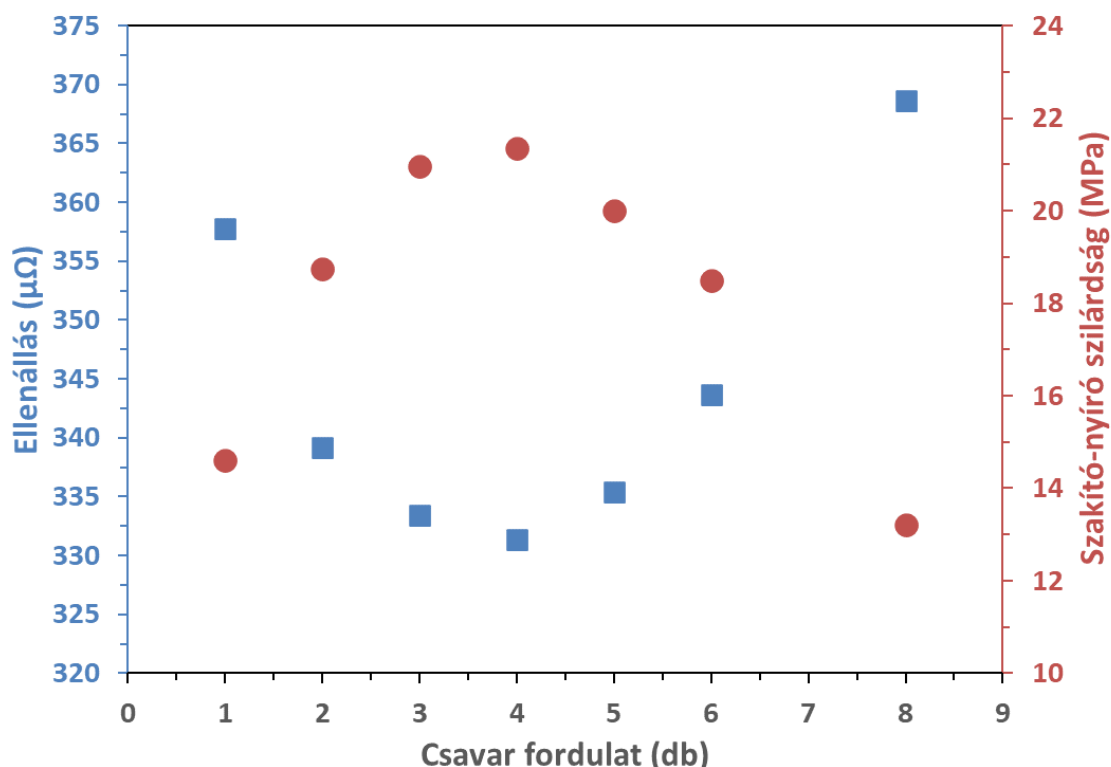
5. táblázat: A Hilumin® és a DC01 lemezek tulajdonságai

Kötési konfigurációként átlapot geometriát alkalmaztam, mivel ez jól reprezentálja a "akkusaru akkusaruhoz", a "gyűjtősín gyűjtősínhez" és az "akkusaru gyűjtősínhez" kötési eseteket. Így lemodelleztem az akkumulátorcsomagokban általánosan alkalmazott kötési típusok többségét. A megmunkálás során a lemezek egymáshoz való rögzítéséhez egy házilag készített mintabefogót használtam, amelynek egyszerűsített rajzát a 20. ábrán mutatom be.



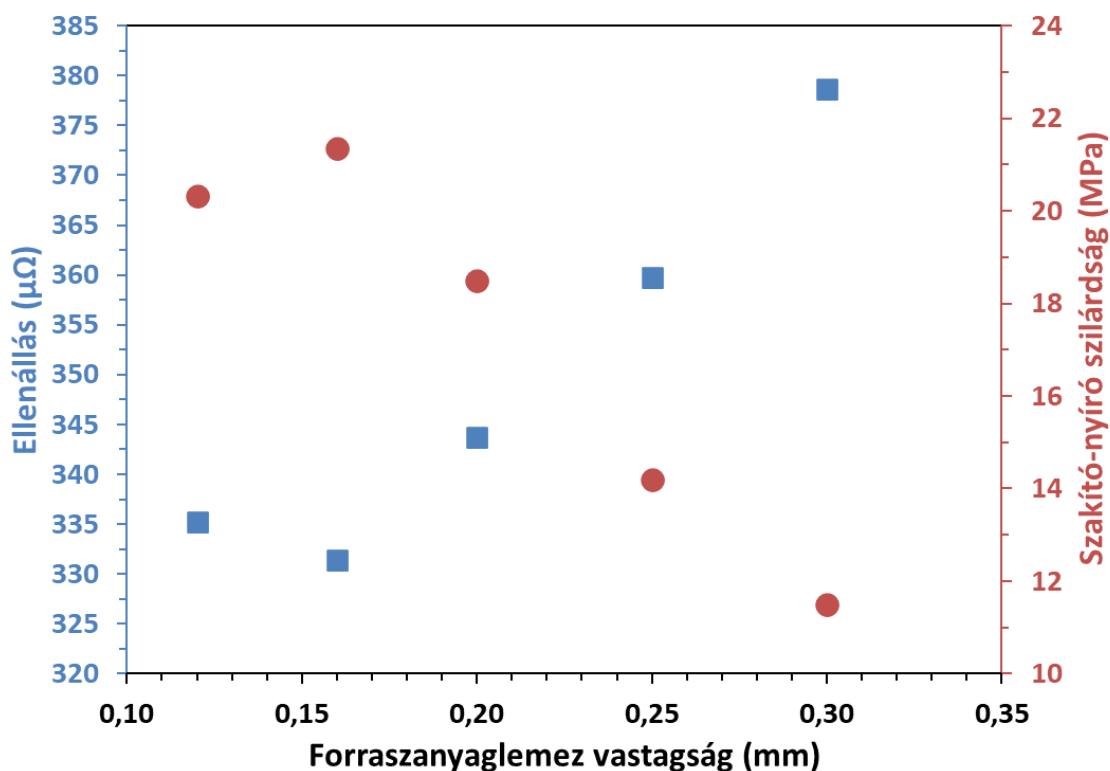
20. ábra: A házilag készített mintatartó CAD rajza

A rozsdamentes acélból készült befogó négy sarkában elhelyezkedő, rugóval ellátott csavarokkal jól reprodukálhatóan szabályozható volt a lemezeket összeszorító erő. Az összeszorítás mértéke, amelyet a csavarfordulatok számával jellemeztem, hatással volt a létrehozott kötések elektromos és mechanikai tulajdonságaira. Amint azt a 21. ábrán – a dolgozatban ismétlődően használt, 120 W lézerteljesítménnyel és 5 s besugárzási idővel készült DC01 kötések esetére – bemutatom, a minimális ellenállást és ugyanekkor maximális szilárdságot a négy egész csavarfordulattal történő szorítás biztosította. Ennek megfelelően minden tárgyalt kísérletben ezt a szorítási mértéket használtam.



21. ábra: A lemezek összeszorításának a hatása 120 W lézerteljesítménnyel 5 másodpercig forrasztott DC01 lemezpárok elektromos ellenállására és mechanikai szilárdságára

A forrasztáshoz a széles körben elterjedt, könnyen kapható, ón alapú (Sn99,3Cu0,7) forrasztanyagot (fillert) használtam, amelyet vékony lemez formájában helyeztem a két kötendő acéldarab közé. A választott forrasztanyag liquidus hőmérséklete 227 °C, és gyantaalapú folyasztószert tartalmaz a forrasztott felületek megfelelő nedvesítésének biztosítása érdekében [116]. Az eredetileg 0,5 mm átmérőjű forrasztanyag huzalból a 0,30-0,12 mm tartományban állítható vastagságú forrasztanyag lemezeket préseltem Dezimalpresse DP 36 présgéppel, 5-39 MPa nyomást alkalmazva. A forrasztanyag geometriájának a kötési tulajdonságokra gyakorolt hatása nyomon követésére irányult méréssorozathoz a lemezvastagságot úgy változtattam, hogy közben a felhasznált forrasztanyag térfogatát állandó értéken, 4,8 mm³-en tartottam. Ebben a sorozatban a lemezek alapterülete 40 és 16 mm² között változott (nagyobb vastagságú lemez kisebb alapterületet vonzott, és fordítva). Azt, hogy a kötések elektromos és mechanikai tulajdonságai hogyan függenek a forrasztanyag vastagságától, a 22. ábrán mutatom be.

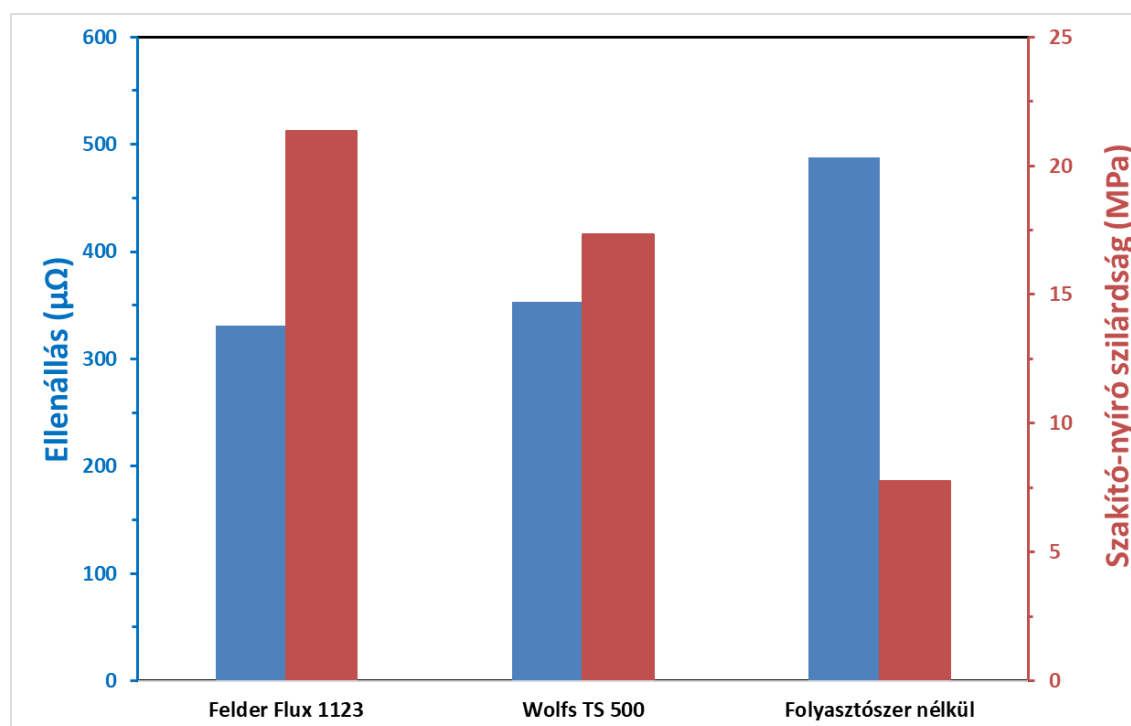


22. ábra: A forrasztanyag lemezek vastagságának a hatása 120 W lézerteljesítménnyel és 5 s besugárzási idővel forrasztott DC01 lemezpárok elektromos ellenállására és mechanikai szilárdságára

Jól látható, hogy van egy optimális forrasztanyagvastagság, ami 4,8 mm³ forrasztanyag térfogat esetén 0,16 mm környéki. Ezért a későbbiekben ismertetett kísérleteim során mindig az optimálisnak bizonyult, 0,16±0,01 mm vastag, 5,0±0,1 mm szélességű forrasztanyag-lemezekkel dolgoztam. Azokban a négyponos ellenállás mérés kísérletekben, amelyekben a forrasztanyag mennyiségének a hatását vizsgáltam, a forrasztanyag lemezek hosszát a DC01 minták esetében 2,0 és 10,0 mm között, a Hilumin[®] minták esetében pedig 0,5 és 4,0 mm között változtattam.

Az, hogy a forrasztóanyag megfelelően nedvesíti-e a kötendő felületet, nagyon fontos a keletkező kötés minősége szempontjából. A nedvesítés mértékét az érintkező anyagok határfelületi energiája és a forrasztás során esetlegesen bekövetkező ötvöződés mértéke befolyásolja. A forrasztásnál ezt folyasztószerrel szokás segíteni. A folyasztószer a forrasztás kialakítása közben létrejövő körülmények között, a liquidus hőmérsékleten fejti ki a hatását. Eltávolítja az oxidokat a forrasztandó lemezek felületéről és a forrasztóötvözetből, ezzel csökkentve a felületi feszültséget az olvadt forrasztóanyag és a szilárd hordozó között, így javítva a forrasztóanyag nedvesítését és terjedését, ugyanakkor megvédi a megtisztított területeket a forrasztás során bekövetkező oxidációtól és/vagy újraszennyeződéstől. A kémiai reakcióknak hatékonyaknak kell lenniük, azonban ezek nem váltják ki az előzetes tisztítást. A forrasztási helyen a lehűlés után maradhat némi folyasztószer maradvány, amelyet célszerű eltávolítani, hogy megelőzzük a kötés használat közbeni, esetleges korrodálódását.

A folyasztószer fontos szerepének tudatában összehasonlítottam a Felder Flux 1123 [117] és a Wolfs TS 500 [118] folyasztószer hatását a kötés mechanikai és elektromos tulajdonságaira azzal az esettel, amikor nem használtam folyasztószert. A 23. ábrán bemutatott eredmény meggyőzően igazolja, hogy a legkisebb elektromos ellenállású, ugyanakkor legnagyobb szilárdságú kötést a Felder Flux 1123 folyasztószer használata biztosítja. Ennek megfelelően további kísérleteim során mindig ezt az anyagot alkalmaztam.



23. ábra: A folyasztószer hatása a kötés elektromos ellenállására (kék), és szakító-nyíró szilárdságára (vörös) 120 W lézerteljesítménnyel és 5 s besugárzási idővel készült DC01 fémlemezek kötése esetén

Amint azt az irodalmi áttekintésben említettem, a forrasztás nagyon érzékeny a

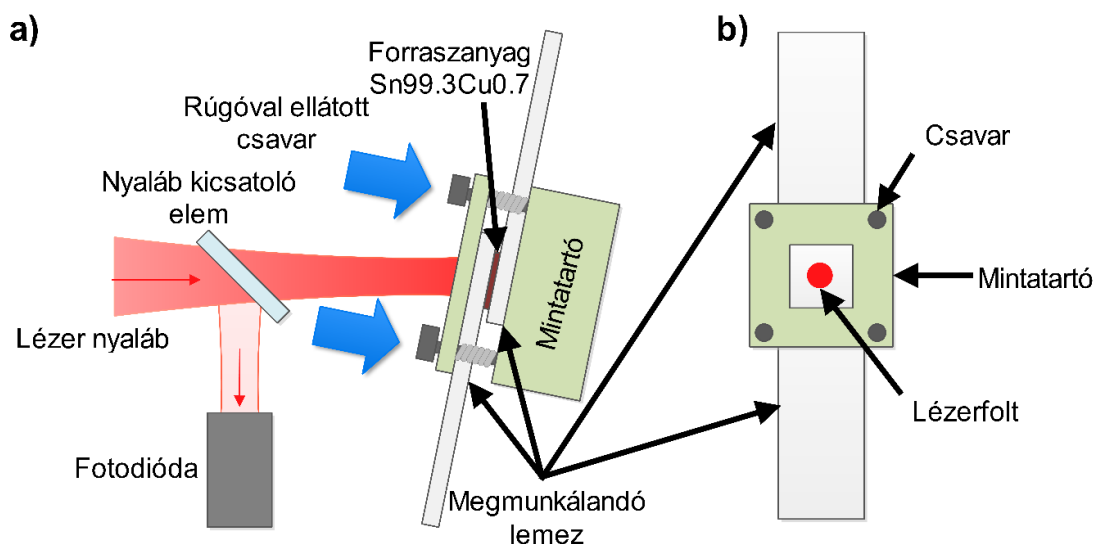
felület tisztaságára és érdekességére is. Ezért megvizsgáltam az etanolos, 2-propanolos és acetonos kémiai tisztítás hatását. Továbbá a lemezek rögzítése előtt mindkét acéllemezt különböző szemcseméretű csiszolópapírral történő érdesítésnek vettem alá, hogy megvizsgáljam annak hatását is. Ehhez korund szemcséket tartalmazó, papír alapú csiszolópapírokat alkalmaztam p40, és p2000 finomságú szemcseméret között. Az erre vonatkozó eredményeknek külön fejezetet (4.1.2.) szenteltem.

III.2. A megmunkáló lézerrendszer

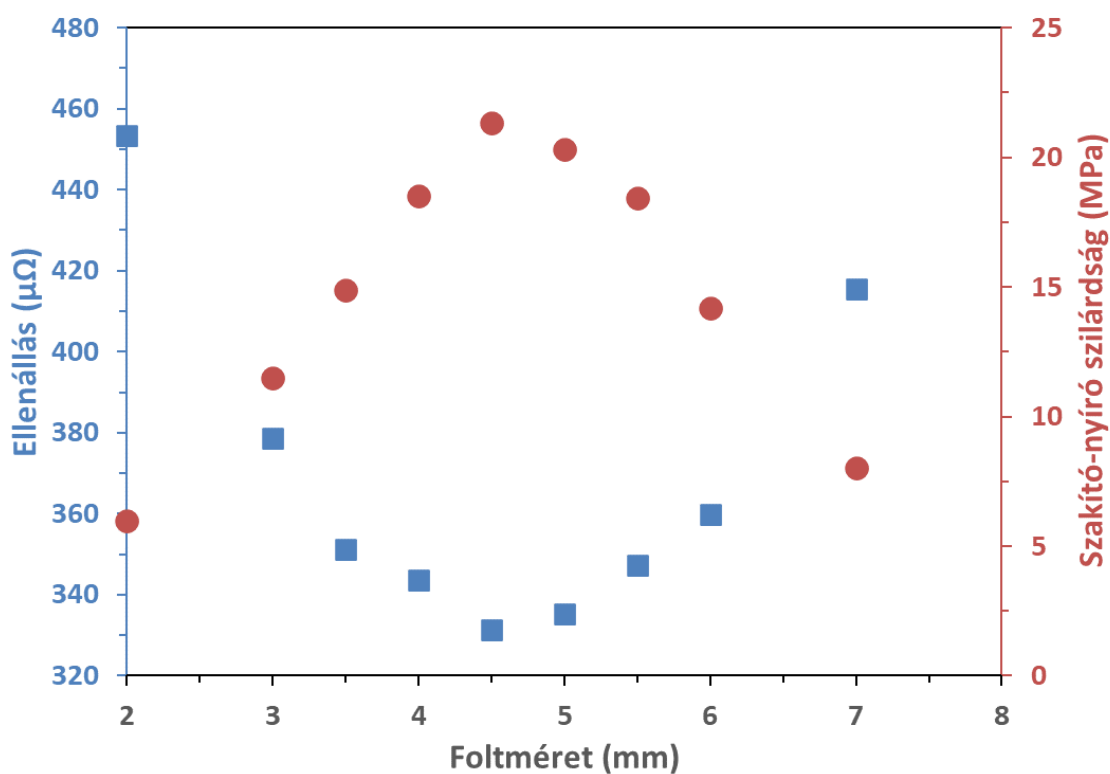
Megmunkáló állomásként egy optikai rendszert építettem, amely lehetővé tette a forrasztások kialakítását a lézerteljesítmény és a besugárzási idő szabályozása mellett, illetve a mintára érkező energia in-situ mérését. A rendszer négy fő összetevőből állt: egy független lézerforrásból, az ahhoz kialakított vezérlésből, az optikai elrendezésből és a mintatartóból. A mintatartóban rögzített lemezpárra érkező, gyengén fókuszált lézernyaláb helyzetét a 24. ábrán vázolom.

Lézerforrásként egy folyamatos üzemű, egymódusú, 400 W-os maximális teljesítményre képes, Yb-adalékolt szállézert (SPI SP-400C-0005) alkalmaztam. A szál végén kilépő fény 1071 nm-es hullámhosszú, polarizálatlan, 1,08-as M^2 értékkel [119]. A kilépő lézerteljesítményt a gyári szoftver segítségével 5 és 180 W között változtattam. A teljesítmény abszolút értékét és stabilitását a kicsatolt nyaláb kalibrált fotodiódával (Thorlabs S130C) történő mérésével monitoroztam a megmunkálás ideje alatt [120]. A besugárzási időt egy TTi EX355P típusú tápegység beprogramozásával előállított vezérlő négyszögjelekkel 2 és 30 s között változtattam [121]. A tápegység RS232 soros porton keresztül történő vezérlését egy LabVIEW nyelven (2010-es verzió) megírt saját kóddal oldottam meg [122]. A lézerszálbba történő visszatükröződés megakadályozása érdekében a mintákat a szakterületen szokásos $\sim 10^\circ$ -os beesési szögben sugároztam be. Így az átfedő lemezpár felső felületén az 1000 mm névleges fókusztávolságú N-BK7 üveglencse (Thorlabs LA1464-B) [123] egy enyhén elliptikus besugárzási foltot hozott létre, amelynek kistengelye $\sim 4,5$ mm volt.

Előkísérleteim során a foltméret változtatásának a hatását is megvizsgáltam a minta lencsétől való távolságának változtatásával. A foltméretet Metrolux ML3000-es detektor segítségével határoztam meg. Amint azt a 25. ábrán bemutatom, optimálisnak a 4,5 mm kistengelyű, enyhén elliptikus folt bizonyult, ezért a továbbiakban ezt a foltméretet alkalmaztam.



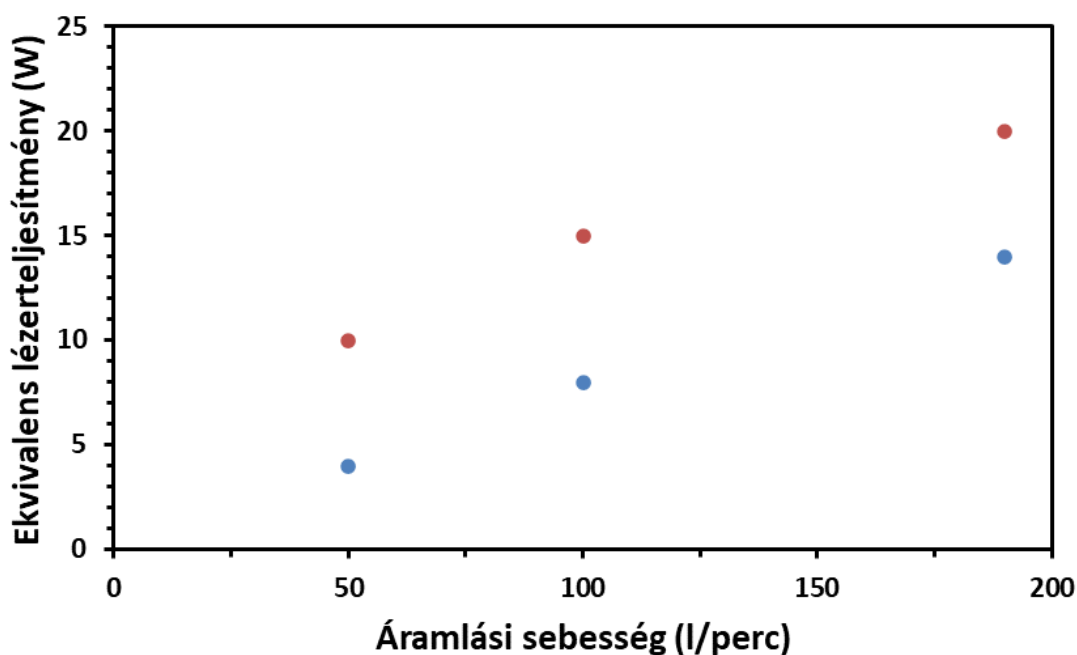
24. ábra: A lézernyaláb a mintatartóba befogott lemezpár felső felületén a) oldal, b) felülnézetben.



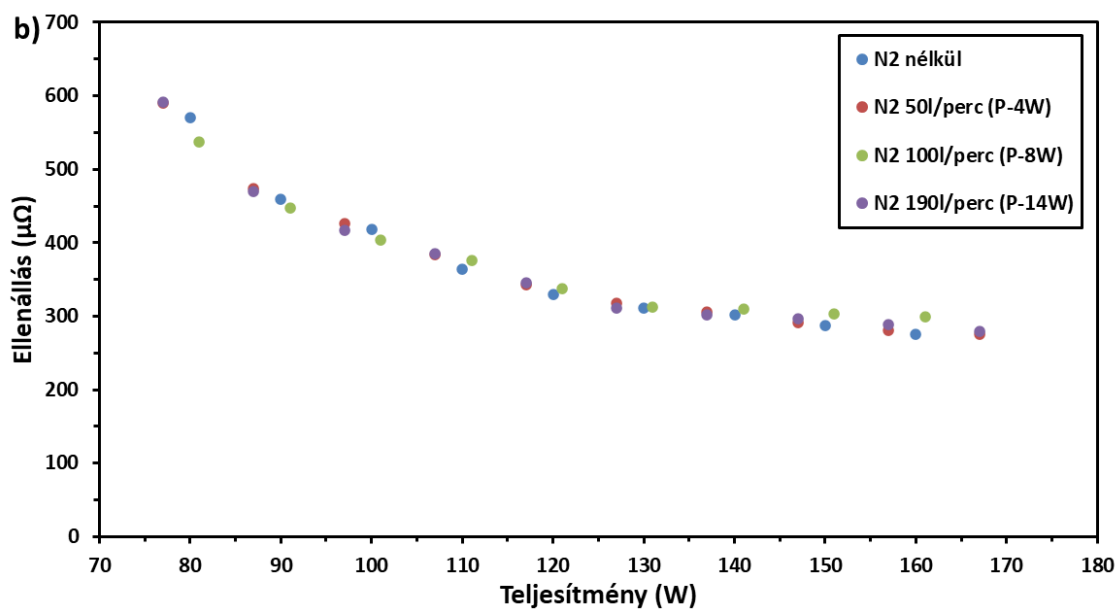
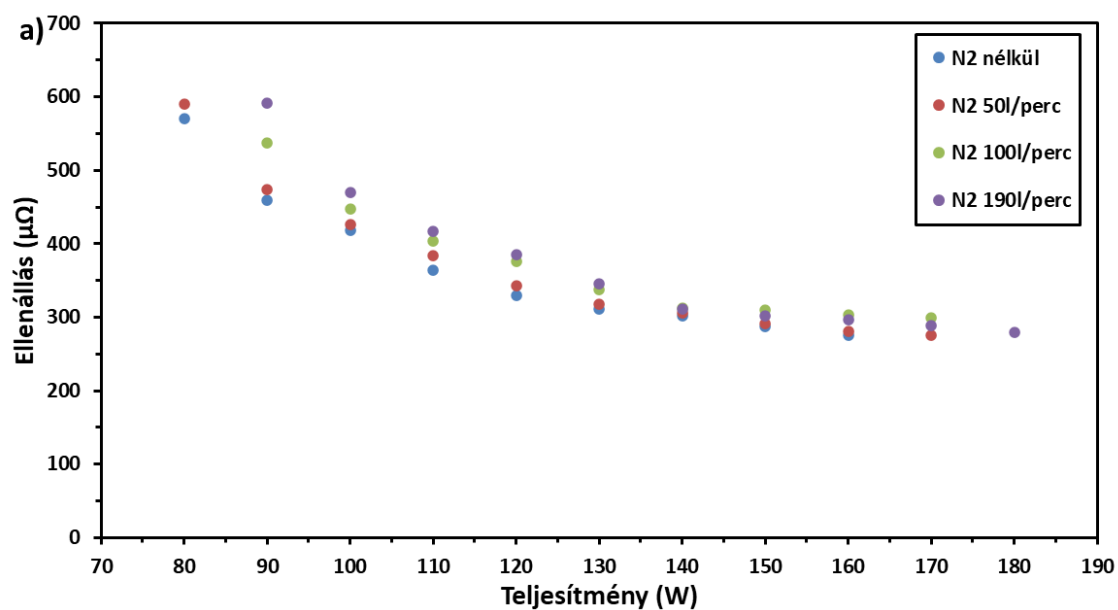
25. ábra: A foltméret hatása DC01 lemezek $4,8 \text{ mm}^3$ ($6,0 \times 5,0 \times 0,16 \text{ mm}^3$) térfogatú forrasztanyaggal, 120 W lézerteljesítménnyel és 5 s besugárzási idővel készült kötése esetén

A forrasztás során is szoktak védőgázokat alkalmazni [124, 125, 126]. Ellenőriztem azt is, hogy az általam vizsgált konfigurációban milyen hatása van nitrogén, argon és hélium gázáramnak a forrasztott minták elektromos és mechanikai tulajdonságira. A palackból érkező, SMC PF2A751-F04-67 típusú áramlásmérővel beállított sebességű gázsugarat úgy irányítottam, hogy a felső lemez felső részét ott

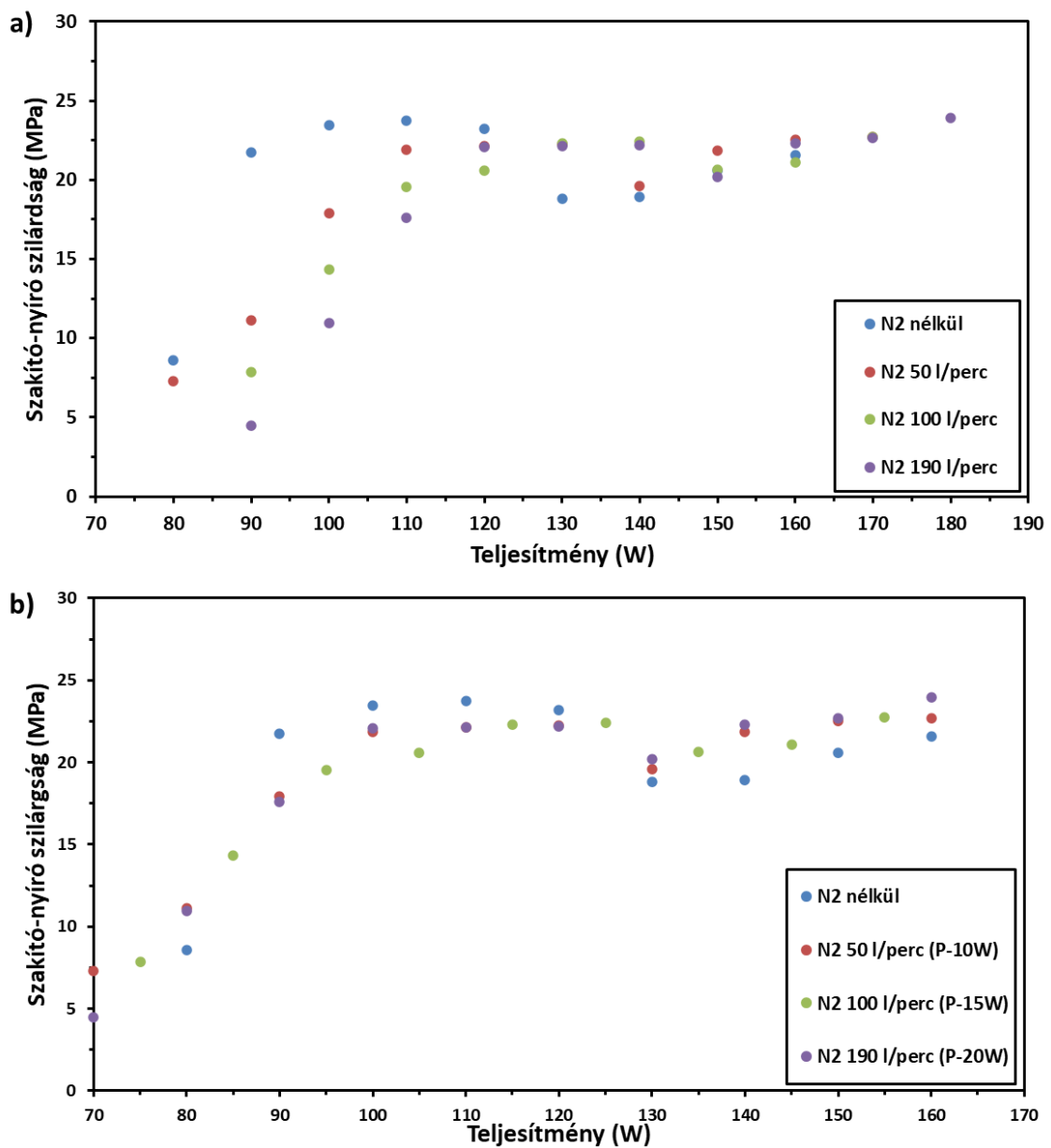
terítse be, ahol a lézernyaláb azt megvilágítja [127]. Négy áramlási sebességet állítottam be, rendre 0, 50, 100 és 190 l/percet. Megjegyezve, hogy az argon és hélium gáztérben készült mintákat nagyon hasonló tendenciák jellemezték, a $4,8 \text{ mm}^3$ térfogatú forraszanyag és 5 s besugárzási idő használatával, különböző lézerteljesítmények mellett, N_2 gáz alkalmazásával készült minták esetén kapott eredményeket a 27.a) és a 28.b) ábrán mutatom be. Az egyre nagyobb gázáramlási sebességgel egyre növekvő elektromos ellenállású, és egyre csökkenő szakító-nyíró szilárdsággal rendelkező kötések sikerült készítenem. Az eredmények értékelése során arra a következtetésre jutottam, hogy az átlapolt geometriában történő kötések esetén a gázok kizárólag hűtési szerepet töltenek be, amit azzal bizonyítok, hogy – amint azt a 27.a) és a 28.b) ábrán bemutatom – a különböző áramlási sebességek esetére kapott görbék eltolásával visszakapható a gázáramlás nélkül készült minták görbéje. Az eltolás mértéke a gázáramlás mértékétől függ. Ez azt jelenti, hogy egy adott áramlási sebesség hatása megegyezik egy ennek megfelelő lézerteljesítmény hatásával. Mivel ennek az ekvivalens lézerteljesítménynek wattban megadott értéke (26. ábra) lineárisan függ az áramlási sebességtől, ez az érték használható az eltolás mértékéül: 50 l/perc esetén 4 W-os és 10 W-os, 100 l/perc esetén 8 W-os és 15 W-os, 190 l/perc esetén pedig 14 W-os és 20 W-os eltolás eredményezi az eredeti görbét az elektromos ellenállás, illetve a szakító-nyíró szilárdság mérése esetén. A megfelelő ekvivalens lézerteljesítményeket a b) ábrákon rendre feltüntettem.



26. ábra: Az ekvivalens lézerteljesítmény az N_2 gáz áramlási sebességének jó közelítéssel lineáris függvénye a vizsgált tartományban, mind az elektromos ellenállás (kék) mind a szakító-nyíró szilárdság (piros) lézerteljesítménytől való függése esetén.



27. ábra: A nitrogén gáz áramlási sebességének hatása DC01 fémlemezek 120 W lézerteljesítménnyel és 5 s besugárzási idővel készült, lézerforrasztott kötéseinek elektromos ellenállására. Az N₂ szimbólum a nitrogén gáz áramlási sebességét jelöli.



28. ábra: A nitrogén gáz áramlási sebességének hatása DC01 fémlamezek 120 W lézerteljesítménnyel és 5 s besugárzási idővel készült lézerforrasztott kötéseinek szakító-nyíró szilárdságára. Az N2 szimbólum a nitrogén gáz áramlási sebességét jelöli.

III.3. A minták jellemzésére használt módszerek és eszközök

Az elkészült forrasztott kötéseket jellemzésük és az összehasonlításuk érdekében különböző vizsgálatoknak vettem alá. Ebben az alfejezetben a lemezek és a kötések jellemzésére használt eszközöket és módszereket ismertetem.

III.3.1. Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM)

A Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Karán található Hitachi S4700 típusú pásztázó elektronmikroszkópot [128] a Hilumin[®] lemez felületén lévő nikkel vékonyréteg vastagságának a megmérésére használtam. Az EDS [129] eredményeket a IV.1.1. Hilumin[®] lemez összetételének mérése című fejezetben tárgyalom. A 10-20 kV gyorsítófeszültséggel készült, 1,5 nm-es felbontást lehetővé tevő felvételeket Kopniczky Juditnak köszönöm meg.

III.3.2. Optikai mikroszkóp

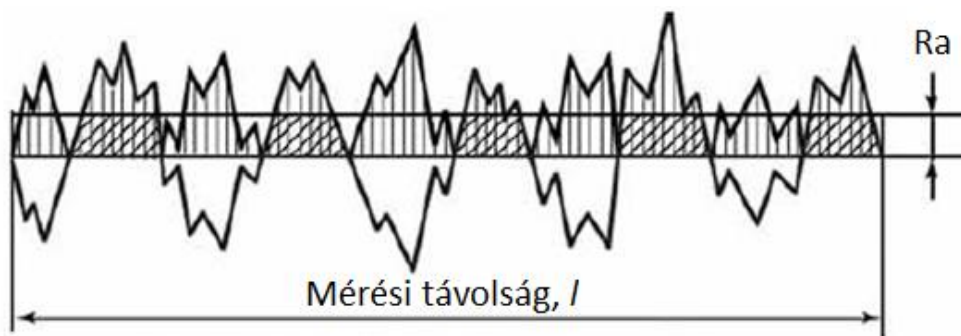
Kísérleteim során egy Olympus DSX510 típusú digitális 3D optikai mikroszkópot [130] használtam a kötési terület, a lemez érdessége és a mikrokeménység meghatározásához szükséges lenyomatok átlóinak mérésére, illetve az előforduló kötési geometriák és lemezek olvadásának megjelenését igazoló optikai vizsgálatokra. Ez a mikroszkóp egy egyedülálló optikai rendszert kombinál a legújabb digitális képalkotási technológiákkal, ezzel biztosítva a nagy mélységbeli és térbeli felbontást. A mikroszkóp 5x-40x nagyítású lencsével rendelkezik, amit még optikailag és digitálisan lehet 400x nagyításig javítani. Igazi erőssége az, hogy a mozgatható tárgyasztal és mélységbeli feloldása miatt nagy laterális és axiális felbontású, 0,225 µm-es 3D-s képek készítésére is alkalmazható. A digitális 2D és 3D felvételeket ImageJ szoftverben, manuálisan értékeltem ki.

III.3.3. Érdességmérés

A forrasztás érzékeny a két kötendő felszín érdességére. A felületi érdességet az ISO 21920-2:2021 szabvány szerint az érdességi profil átlagos magasságával (arithmetic mean height), az R_a értékkel adom meg [131]:

$$R_a = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l |Z(x)| dx, \quad (4)$$

ahol l a mérési távolság, $Z(x)$ az adott x pozícióban a profil magassága. Azaz az átlagos vonalmenti érdességnek is nevezett R_a -n az elvégzett mérés hosszára vonatkozó átlagos magasságkülönbséget, azaz a csúcsok és völgyek közötti átlagos távolságkülönbséget értjük [132], ennek illusztrációja látható a 29. ábrán. Ez az egyik legszélesebb körben használt érdesség definíció, amelyet nem befolyásolnak jelentősen a karcolások, a szennyeződések és a mérési zaj.



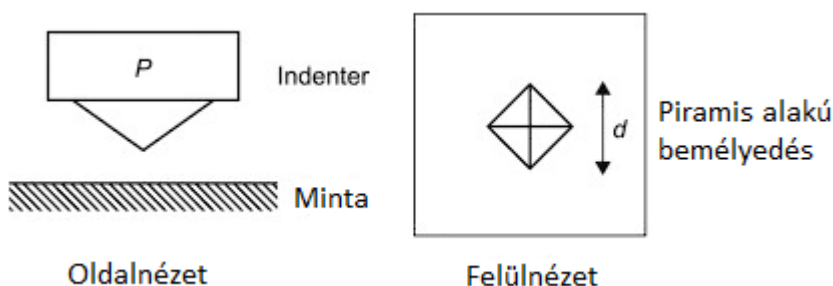
29. ábra: Az átlagos vonalmenti érdesség, R_a definíciójának illusztrációja

Ezt a mennyiséget az Olympus DSX510 típusú digitális 3D optikai mikroszkóp segítségével határoztam meg. A mérés során a legnagyobb nagyítású lencse (40x) alkalmazásával és a szoftveren belül vezérelhető plusz optikai (10x) zoom hozzáadásával (összesen 400x nagyításon) $0,225\ \mu\text{m}$ mélységbeli felbontás volt elérhető. A méréseket 9 másik helyen megismételtem, majd a 10 pontból kapott átlagot tüntettem fel a megfelelő grafikonokon.

III.3.4. Mikrokeménységmérés

A keménységvizsgálat a 20. század elején kifejlesztett módszer, amely sikeresen alkalmazható fémek képlékeny alakváltozásainak jellemzésére. A Brinell-, Vickers- és Rockwell-féle, ún. szűrő keménységmérő eljárás során egy 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.

Forrasztási kötések anyagvizsgálata esetén a legszélesebb körben az úgynevezett Vickers keménységet szokás meghatározni [133, 134, 135]. A Vickers keménységmérés szűrőszerszáma egy olyan négyzet alapú egyenes gyémánt gúla (indenter), amelynek lapszöge $2\alpha=136^\circ$. A szűrőszerszám oldalnézetből és az általa hagyott lenyomat felülnézetből a 30. ábrán látható.



30. ábra: A mikrokeménység mérés szűrőszerszáma oldalnézetből és az általa hagyott lenyomat felülnézetből

A lenyomat alapjának átlója d , oldaléle a hosszúságú. A keménység általános definíciójából kiindulva, a Vickers-keménység az alábbiak szerint számítható:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{F}{4 \frac{am}{2}} = \frac{F}{4 \frac{a}{2} \frac{a}{2 \sin \alpha}} = \frac{F}{\frac{a^2}{\sin \alpha}} = 2 \sin \alpha \frac{F}{d^2} \approx 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (5)$$

A gyakorlatban a d értékével számolunk, hiszen a lenyomaton az oldalélek metszéspontja határozottabban látszik, mint maga az oldal, ezért az pontosabban mérhető.

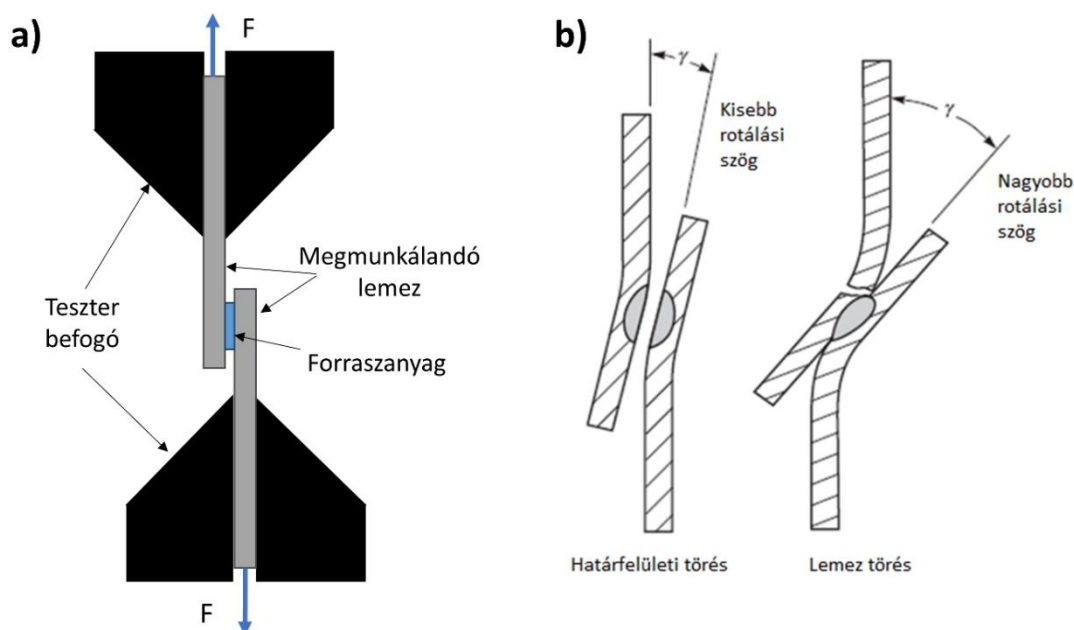
Mikrokeménységmérő műszerként egy Reichert Metallurgia Mérőmikroszkópot alkalmaztam [136]. A Vickers-gyémánt az objektív külső lencsájének közepére, vagy az objektív acél foglalatára volt rögzítve. A lenyomatátlókat az okulárba beépített mérőskála segítségével határoztam meg, és ex-situ az Olympus DSX510 típusú digitális 3D optikai mikroszkóppal is megmértem.

III.3.5. Az összeforrasztott lemezpárok szakító-nyíró szilárdsága

A kötések mechanikai szilárdságát Tinius Olsen H5KT típusú mechanikai teszterrel határoztam meg [137]. Az eszköz 5 kN maximális terhelési erőt tud kifejteni. A mérés a hozzá tartozó QMat v1.0.20 Labor HTE szoftver segítségével történt. A vizsgálat során a terhelési tartományt a maximális 5000 N-ra, a maximális megnyúlást 80 mm-re, a húzási sebességet 5 mm/perc-re, az előterhelést pedig 0 N-ra állítottam be az acél esetén alkalmazandó ISO 6892-1 típusú szabványnak megfelelően [138]. Az átlapolt geometriában készült kötés egy hagyományos mechanikai teszterrel történő vizsgálata során (31. ábra) a befogófej által kifejtett erő egy komplex terhelés, ami mind szakító-, mind nyírófeszültségi komponenst tartalmaz. A szakító-nyíró szilárdság (tensile-shear strength) meghatározásához szükséges a kötési terület, amit optikai mikroszkóppal (Olympus DSX510) határoztam meg a lemezpár szétszakítása után. Minden vizsgált kísérleti paramétersereghez három mintát készítettem, majd mértem le, így a releváns ábrákon bemutatott hibásávok a szakító-nyíró szilárdság esetében három független mérésből kapott abszolút hibákat szemléltetik 95% konfidencia intervallum mellett.

A mérés során a szakító-nyíró páros erő hatására az átlapolt kötés meghajolhat és elfordulhat, ahogyan azt az eredetileg hegesztés esetére megrajzolt 31. ábra [139] szemlélteti. Ilyenkor a kötés roncsolódása határfelületi- vagy lemez törés formájában következhet be. A határfelületi törések akkor következnek be, amikor a két lemez közötti kötés gyengébb, mint az alapfémek szilárdsága. Lemez törések vagy azért következnek be, mert a kötés erősebb, mint az alapfém, vagy az alapfém hő hatására rideggé válik a kötés környezetében. A lemez törés előfordulási valószínűségét növeli a minta tesztelése során fellépő kiforgás. Ezt vastagabb minták (2,5 mm felett) esetén ellensúlyozni lehet a szakítógéppel befogóinak eltolásával vagy a markolatba ékek/fémbetétek behelyezésével. Az én méréseim során a befogók eltolására a teszter kialakításából adódóan nem volt lehetőség. Kipróbáltam viszont ékek behelyezését, azonban ez nem hozott számottevő különbséget a mérés során (valószínűleg a lemezek vékony volta miatt), így a dolgozatban bemutatott méréseim ékek nélkül készültek. Az általam készített forrasztott minták többségükben határfelületi törés formában szakadtak el. Ez alól kivétel akkor volt, amikor az egész átfedési terület mentén kialakítottam

kötést, hiszen akkor az már erősebb lehetett az alapfém szilárdságánál.

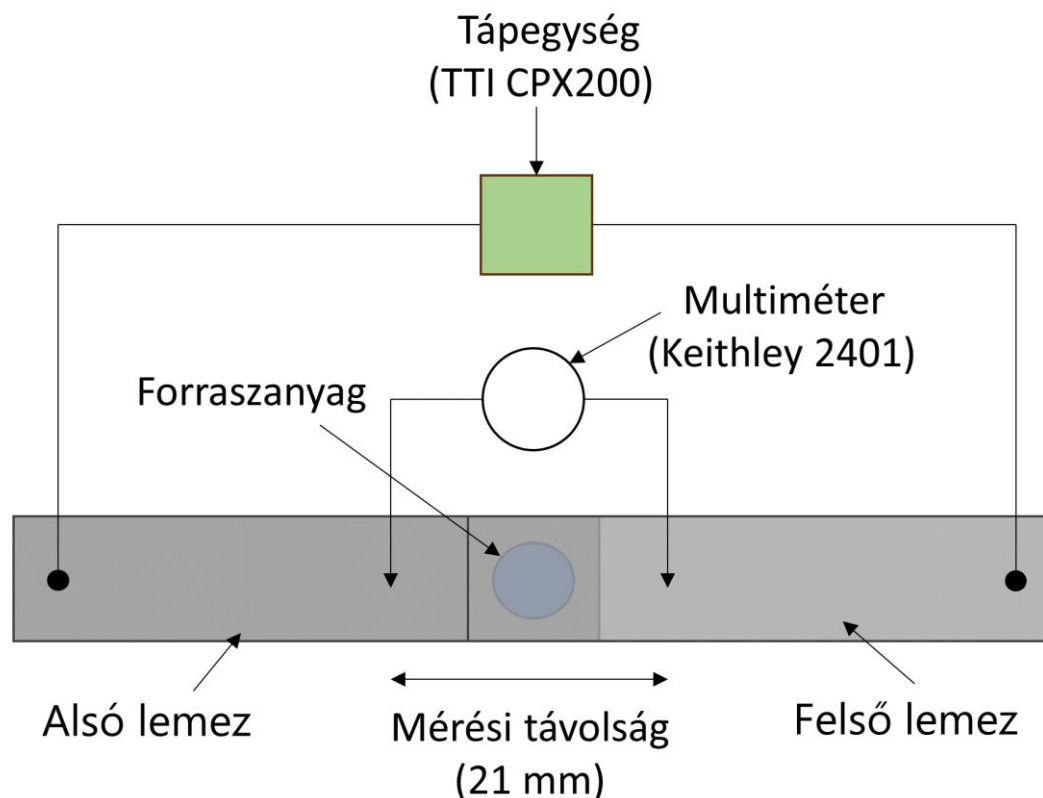


31. ábra: a) A mechanikai mérés sematikus ábrája. b) Törési típusok [139]. Az ábra arányai túlzóak: a lemez arányaiban sokkal vékonyabb, mint ahogy azt az ábra sugallja.

III.3.6. Az összeforrasztott lemezpárok elektromos ellenállása

A forrasztott és hegesztett kötések elektromos tulajdonságainak mérése nagy kihívást jelentő feladat két okból is. Elvi probléma, hogy a kötés elektromos ellenállásának közvetlen mérése nem lehetséges, mert a két kötendő lemez ellenállása mindig hozzájárul a mért nettó ellenálláshoz, függetlenül attól, hogy milyen közel kerülünk a mérőtűkkel a tényleges kötési területhez. Gyakorlati oldalról: nem áll rendelkezésre szabványosított módszer az ellenállás meghatározására. Egyedüli konszenzus a kutatók között az, hogy négyponthoz ellenállásmérés alkalmazására van szükség, mivel a kötések $10\text{--}100\ \mu\Omega$ ellenállása a mérőtűk és mérőkábelek ellenállásának a nagyságrendjébe esik [140, 141]. Méréseim során ezért én is ezt a módszert követtem (32. ábra).

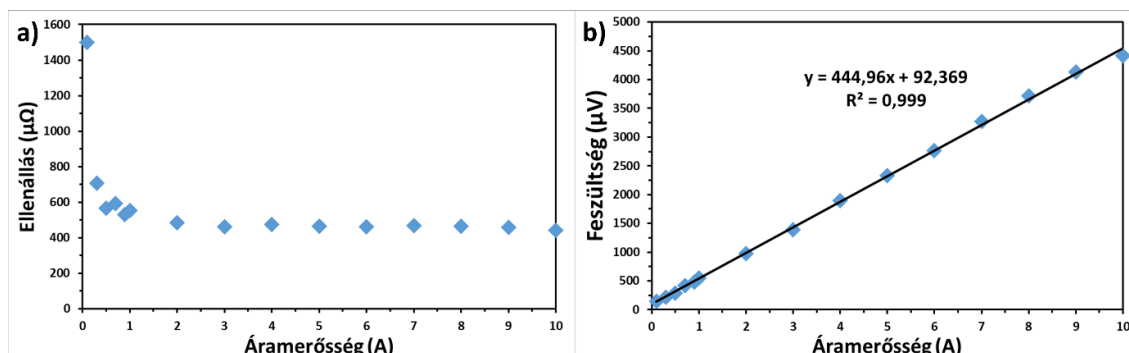
Az ilyen kis ellenállások pontos meghatározása érdekében nagy betáplált áramot kell alkalmazni, hogy a mintán eső feszültség megfelelő pontossággal mérhető legyen. Egy $15\ \mu\Omega$ nagyságú, réz anyagú ellenállás 1 %-os hibán belüli meghatározásához legalább 180 A nagyságú áram szükséges [142]. Ilyen nagy áramok használata viszont hőmérsékletnövekedést okoz a rendszerben, amely megváltoztatja a mérni kívánt ellenállás nagyságát, végső esetben akár a kötés károsodását is okozva. Úgy ítélt meg, hogy ez az út számomra nem járható, a hőmérséklet megemelkedését okozó nagy áramok alkalmazása helyett más megoldási módszert kerestem.



32. ábra: A forrasztott lemezpárokon végzett négy pontos ellenállásmérés elvi vázlata

Az általam *aszimptotikus módszernek* nevezett egyik megoldás lényege, hogy a kötési terület ellenállását több áramerősségen is megmérjük, majd a kapott értékeket az áramerősség függvényében felrakva meghatározzuk, milyen ellenállás érték felé tart a görbe. A 33. ábrán példaként egy 360 W-os lézerteljesítménnyel és 50 mm/s szkennelési sebességgel hegesztett minta ellenállásának a mérőáram nagyságától való függését mutatom be. Ez a módszer szemléletes, de az aszimptota számszerűsítése nem elég meggyőző. A *meredekség módszernek* hívott másik megoldás alapja, hogy a több áramerősségen mért feszültség-áramerősség párokat ábrázolva, a mérési pontokra illesztett egyenes meredeksége megadja a keresett ellenállás értékét. Ez a módszer önellenőrző, hiszen, ha minden pont jól illeszkedik az egyenesre, ez azt jelenti, hogy a mérés során alkalmazott áramerősségek mindegyikére igaz, hogy a kötésen átfolyó áram nem okozott hőmérsékletemelkedést, azaz az ellenállás végig konstans maradt a mérés alatt. Példaként a 33. ábrán mutatom be az ugyanazon paraméterek mellett elvégzett mérés eredményét.

Az összeforrasztott lemezpárok ellenállásának mérésére a meredekség módszert alkalmaztam. Megállapítottam, hogy 10 A-ig mérhetek a hőmérséklet észrevehető emelkedése nélkül, és hogy az ellenállás 1 %-os hibán belüli meghatározásához legalább 6 mérési pontra van szükség. Ennek megfelelően 0,1; 0,5; 1; 3; 6 és 10 A áramokon mértem.



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

A mérőáramot a lemezek végeire csavarozott kötéssel kapcsolt TTI CPX200 típusú tápegységből tápláltam be [143]. A feszültséget egy Keithley 2401 multiméterrel [144] mértem 21 mm távolságban úgy, hogy a két mérőtű érintkezési pontjának szimmetriatengelye egybeesett a kötési terület középpontjával (32. ábra). A mérések elvégzése ebben az általam standardizált geometriában alkalmassá tette ezt a módszert a minták elektromos ellenállásának összehasonlító vizsgálatára [74].

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

III.4. Modellezési módszerek

A kísérleti vizsgálatokat numerikus modellezéssel is kiegészítettem. A COMSOL Multiphysics programban kidolgozott modell segítségével betekintést nyertem az áramsűrűség és az elektromos potenciál (amellyel az ellenállás kiszámítható) eloszlásába a forrasztott kötésen belül és annak közelében, ami elősegítette az összeforrasztott lemezpárok elektromos viselkedésének mélyebb megértését. A COMSOL Multiphysics 5.5 verziószámú számítási keretrendszerét használtam [145]. AC/DC modult alkalmaztam, továbbá használtam a CAD import, és az anyagtulajdonság könyvtár funkcióit is. A kötendő lemezek és a forrasztóanyag elektromos viselkedésének ábrázolását a megfelelő elektromos tulajdonságok (fajlagos ellenállás és geometriai méretek) mérésével, majd ezen eredmények modellbe történő integrálásával valósítottam meg. A modellezéshez szükséges további anyagjellemzőket a anyagtulajdonság könyvtárból az előre definiált vas (az anyagtulajdonság könyvtárban "iron" -ként jelölve) és 99% ón + 1% réz forrasztóanyag (az anyagtulajdonság

könyvtárban "Sn-1Cu"-ként jelölve) tulajdonságai adták, biztosítva a robusztus és konzisztens működést. A szimulációkban az elegendő pontosság és felbontás elérése érdekében a számítások alatt a "rendkívül finom" ("extremely fine") hálót alkalmaztam.

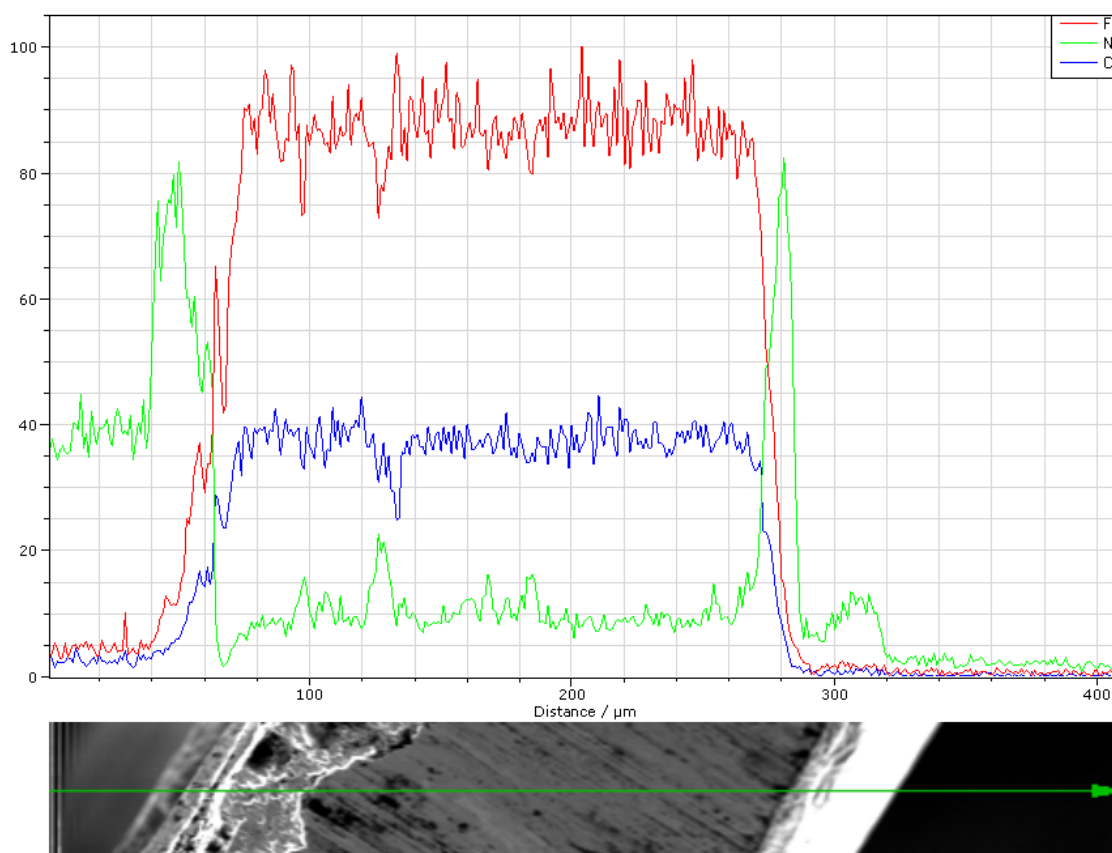
IV. EREDMÉNYEK

IV.1. Kísérleti eredmények

IV.1.1. Általános eredmények

IV.1.1.1. A Hilumin® lemez összetételének mérése

A Hilumin® lemezek korroziógátló nikkelt bevonatának rétegvastagságát pásztázó elektronmikroszkóppal, a teljes lemez kémiai elemösszetételét pedig a rendszer részét képező Röntec QX2 energiadisperzív mikroanalitikai egység felhasználásával (EDS) határoztam meg. A mérés eredményét a 34. ábrán mutatom be.



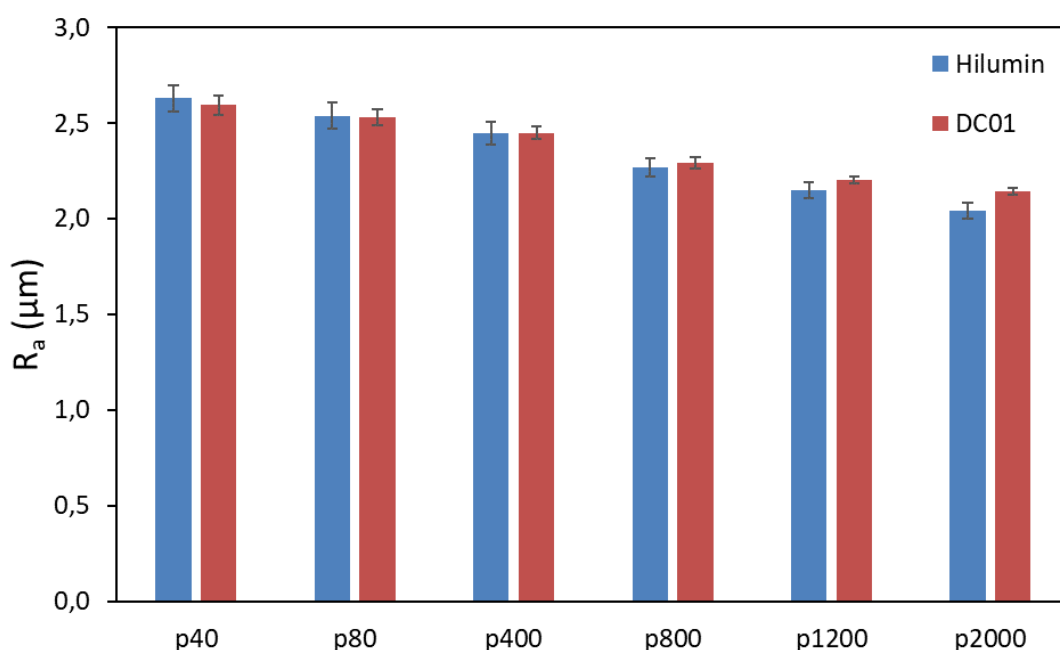
34. ábra: A Hilumin® lemezt alkotó elemek mélységprofilja.

A mérésből jól látható volt, hogy a vékony védőréteg a lemez mindkét oldalán megtalálható, és valóban több mint 90 százalékból nikkelt tartalmaz. Amint az a 34. ábra alján bemutatott SEM képből is látható, annak vastagsága csak becsülhető volt a lemez minta méretre vágása által okozta sérülések, deformáció miatt. A nikkelt réteg vastagságát öt helyen megmérve, az átlagban $(10,0 \pm 0,1)$ μm-nek adódott. A lemez anyaga rozsdamentes acél, amelyre – szintén öt mérésből – a következő összetétel adódott: $(70,57 \pm 4,20)$ % vas, $(18,37 \pm 1,00)$ % króm és $(8,01 \pm 0,90)$ % nikkelt. Ez a kémiai összetétel megfelel az AISI 304L rozsdamentes acél összetételének az ASTM A240/A240M szabvány szerint, amely előírja, hogy a rozsdamentes acéllemez $(17,5-19,5)$ % krómot és $(8,0-12,0)$ % nikkelt kell tartalmazzon a fő elem, a vas mellett [146].

Ennek az acéllemeznek a becsült vastagsága (230 ± 5) μm volt.

IV.1.1.2. A fémlamezek érdesség vizsgálata

A lemezek forrasztásos kötésekor nagyon fontos a felületek megfelelő előkészítése. A megmunkálás előtt, a kémiai tisztításon túl, a kötendő lemez érdesítésével is lehetséges a kötéserősséget javítani, hiszen ilyenkor a forrasztanyag nagyobb felületen tapadhat meg. A kísérleteim során a DC01 és a Hilumin[®] lemezeket hat, a durvától (p40) a nagyon finomig (p2000) változó szemcseméretű, papír hordozójú csiszolóanyaggal csiszoltam. A csiszoló-papírral történő kezeléseket azáltal standardizáltam, hogy azonos csiszolási időt és nyomást alkalmaztam. A megcsiszolt lemezek érdességét az ISO 21920-2:2021 szabvány szerint az *átlagos felületi érdességgel*, R_a jellemeztem [131]. A 10 mm-es mintahosszon optikai mikroszkóppal meghatározott átlagos felületi érdesség értékeit a 35. ábrán ábrázoltam.



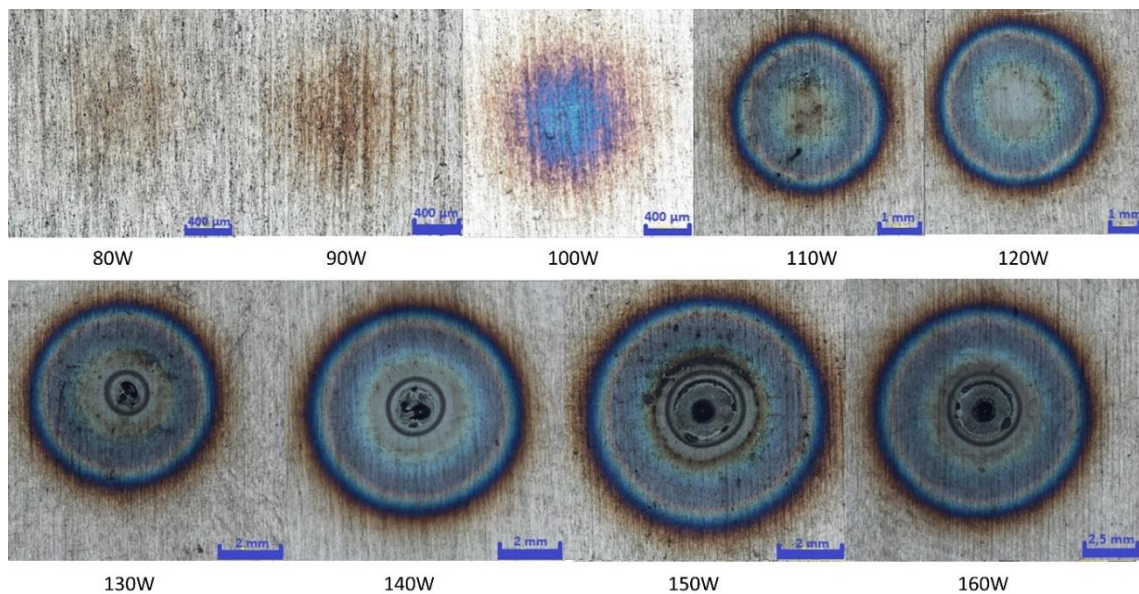
35. ábra: Különböző finomságú csiszolópapírral feldurvított felületek átlagos felületi érdessége: kék: Hilumin[®] lemezek, piros: DC01 lemezek esetén. A mérési hibásávok 10 adatból származnak 95% konfidencia intervallum mellett.

Az átlagos felületi érdesség a DC01 lemezek esetében ($2,59\pm0,05$) μm -ről ($2,14\pm0,02$) μm -re, míg a Hilumin[®] lemezek esetében ($2,63\pm0,07$) μm -ről ($2,04\pm0,04$) μm -re csökkent a p40-től p2000-ig csökkenő szemcseméretű papírokkal történő csiszolás eredményeként. Engem meglepett, hogy a nikkel rétegnek nem volt számottevő hatása a kialakuló átlagos felületi érdességre, hiszen az R_a értékek praktikusán megegyeztek a két különböző lemez esetében.

IV.1.1.3. Mikrokeménység és hőhatásövezet (HAZ) vizsgálatok

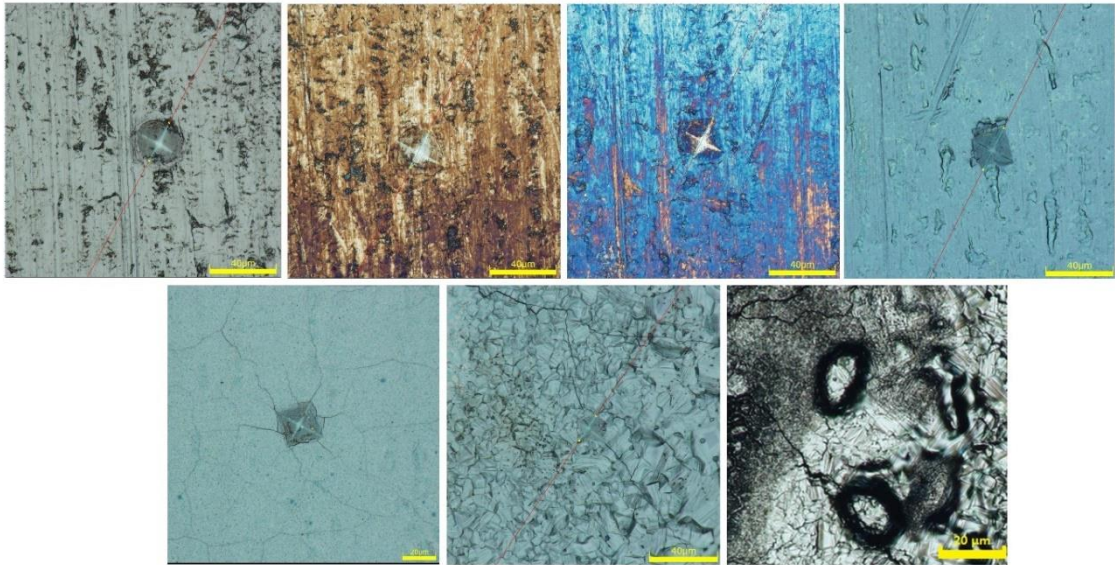
A fémlamezek hegesztési varratainak jellemzésére elfogadott mérési módszer a mikrokeménység mérése. Az átlapolt geometriában készült forrasztott minták a kialakításuk miatt nem adnak lehetőséget a kötés mikrokeménység vizsgálatára. Azonban a lézerrel megvilágított lemezfelület hőhatásövezetének (HAZ=heat affected zone) tulajdonságai mérhetőek, és a változások a kötés szempontjából is informatívak.

A HAZ megjelenése a lemez elszíneződését eredményezi. Ez az elszíneződés, amely egyébként pl. csiszolással vagy salétromsavval letisztítható, a lemez oxidációjának köszönhető. A színe és mértéke nagyon sok dologtól függ, például a felszíni tisztaságtól (olaj, zsír, ujjlenyomat, rozsdá) [147], a lemez króm tartalmától (minél nagyobb króm tartalom annál kisebb az elszíneződési zóna) [148], vagy a használt védőgáztól. A HAZ területének nagysága növekszik a lézerteljesítmény növelésével, ahogy ez az 36. és 38. ábrán látszik. A DC01 és Hilumin® lemezek esetében az elszíneződött zóna külső része barna, belső pedig sötétkék színű volt.



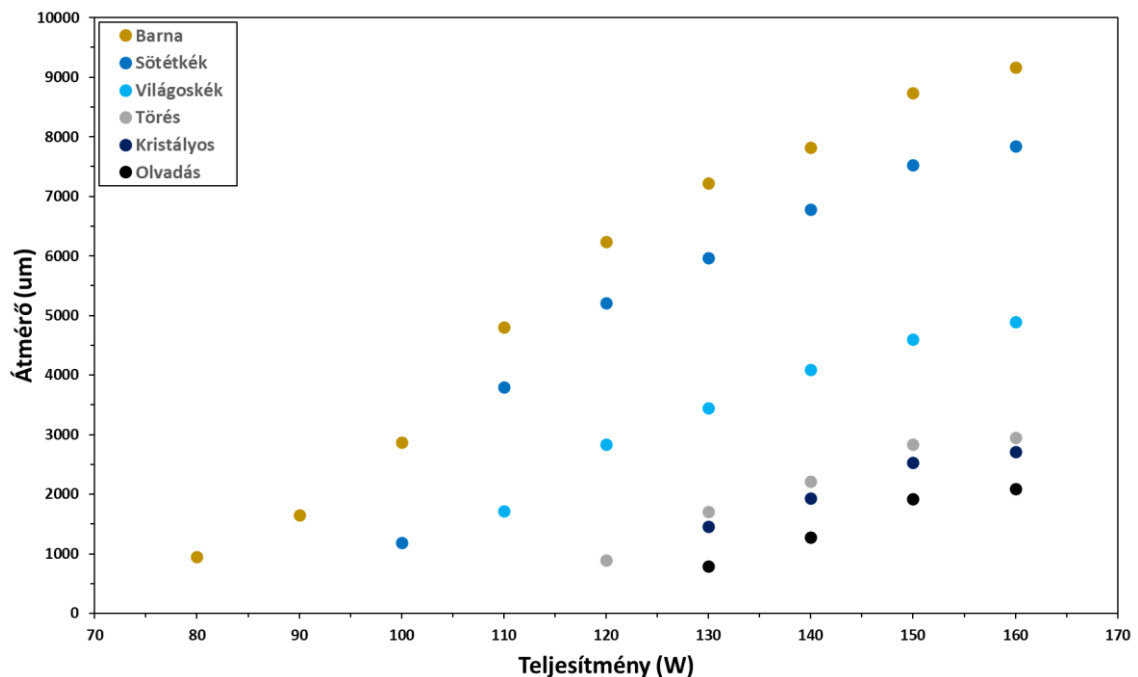
36. ábra: DC01-es lemezek felületén kialakuló HAZ megjelenése különböző lézerteljesítményeken (5 s besugárzási idő mellett). A változó átmérőjű zónák jól láthatóvá tétele érdekében a képek különböző nagyítással készültek.

Olyan lézerteljesítmény használatával, amellyel már a lemezt az olvadási pontjához tartozó hőmérsékletre vagy akár még magasabbra tudjuk hevíteni, az elszíneződött zónák mellett újabb morfológiai elemek jelennek meg. A sötétkék színű zóna után sorrendben a HAZ középpontja felé tartva megjelenik az edzett-, törés-, kristályos- és megolvadt zóna. Ezekről készült, nagyobb nagyítású képeket mutatok be a 37. ábrán. A törés zóna mikro-repedéseket és törésvonalakat tartalmaz, a kristályos zónában kristályos szerkezetű felület figyelhető meg, míg a megolvadt zónában a félig és teljesen megolvadt területek keverednek egymással.



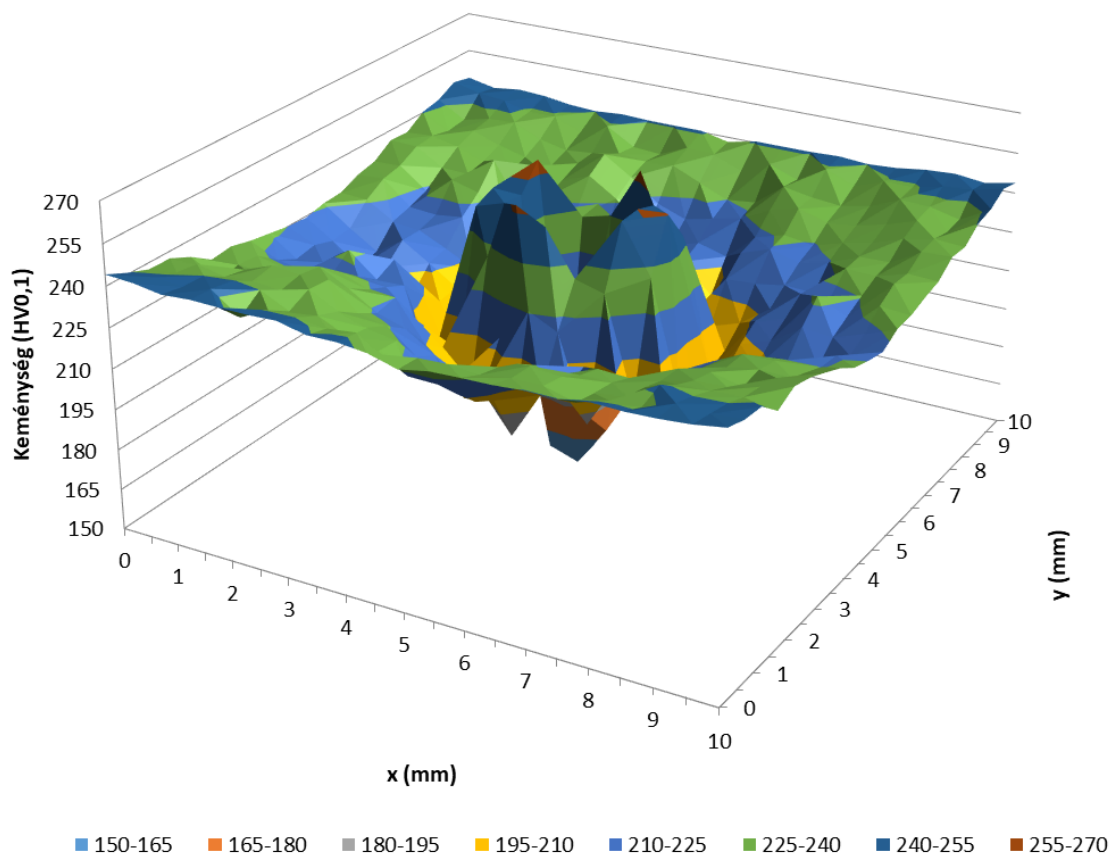
37. ábra: A HAZ különböző tartományai DC01-es lemezen: a) kezeletlen felület, b) barna és c) kék elszíneződés; 120 W-tal 5 s-ig besugárzott felületen kialakuló d) edzett-, és e) törés zóna, valamint 150 W-on 5 s-ig kezelt felület f) kristályos és g) megolvadt zónája.

A lézerteljesítmény növelésével ezen zónák területe, és ezzel együtt az az átmérő, amely a zónaváltozáshoz rendelhető, is növekszik. Ezt mutatja be a 38. ábra DC01-es minták esetére. Az elszíneződés a 80 W-os teljesítménytől indul, olvadás pedig csak 120 W teljesítmény felett jelenik meg. A zónák átmérője a megjelenés után gyorsan növekszik, majd ez a hirtelen növekedés lelassul, és az átmérő besimulni látszik egy adott értékhez, amelyet azonban egyik zóna esetén sem értünk el 160W-ig.



38. ábra: Különböző HAZ zónák nagyságának változása DC01 lemezeken a lézernyaláb teljesítményének növelésével, 5 s besugárzási idő használata mellett.

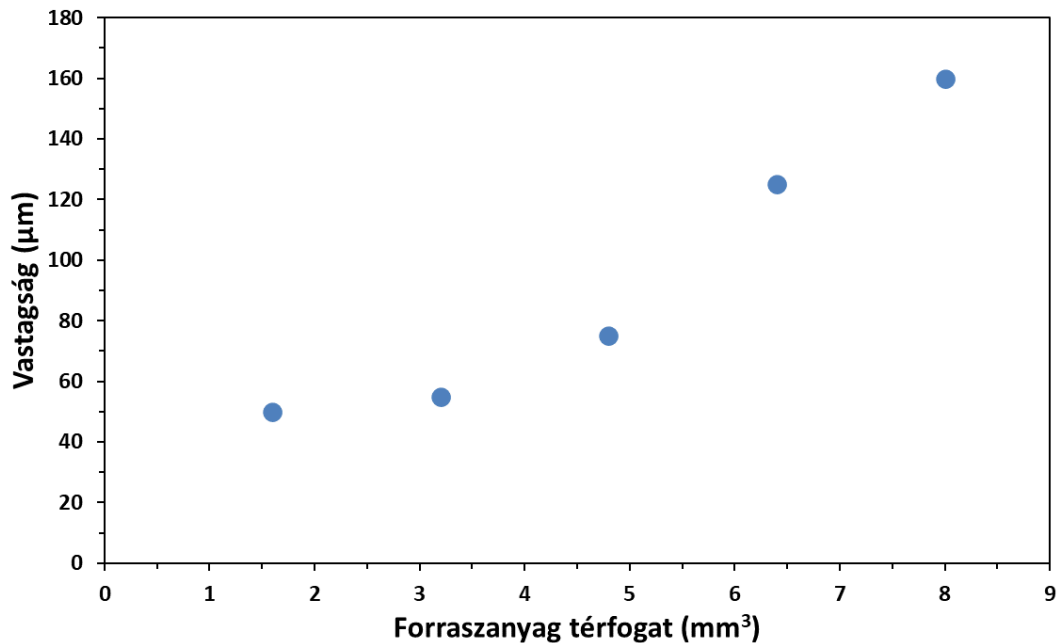
A HAZ méretének és a kialakuló morfológiáknak a vizsgálatán túl kíváncsi voltam arra is, hogy a különböző zónákat milyen keménység jellemzi. Egy 10x10 mm-es mikrokeménység térképet készítettem 0,5 mm térbeli léptékkal egy 120 W lézerteljesítménnyel, 5 s besugárzási idővel és 4,8 mm³ forraszanyag mennyiséggel készült mintáról. Ez, mint láthattuk, egy olyan paraméter szett, ahol a lemez megolvadása még éppen nem kezdődik el. Egy 21x21 pontos mátrixot szúrtam bele a gyémántgúla segítségével a lemezbe a HAZ zóna körül, amely így 0,5 mm-eként adott információt a lemez kezelt felületének Vickers mikrokeménység értékéről [135]. A 39. ábra azt mutatja, hogy a hőhatásövezeten kívül a mikrokeménység megegyezett a kezeletlen lemezen mért mikrokeménységgel, ami (24416±2,47) HV0,1. A HAZ külső zónájában (a 39. ábra kék és zöld színnel jelölve) a lemez elkezdi meglágyulni (sárga zóna), majd a következő, edzett zónában hirtelen felkeményedik. A kemény rész a legbelső, törés zónáig tart, ahol a mikrorepedések miatt újra kisebb mikrokeménység értékekkel rendelkezik a hőkezelt terület.



39. ábra: A lézer folt középpontja körüli 10x10 mm-es területen készült Vickers mikrokeménység térkép két DC01-es lemez összeforrasztása után a felső lemezen. Paraméterek: 120 W lézerteljesítmény, 5 s besugárzási idő, 4,8 mm³ forraszanyag térfogat.

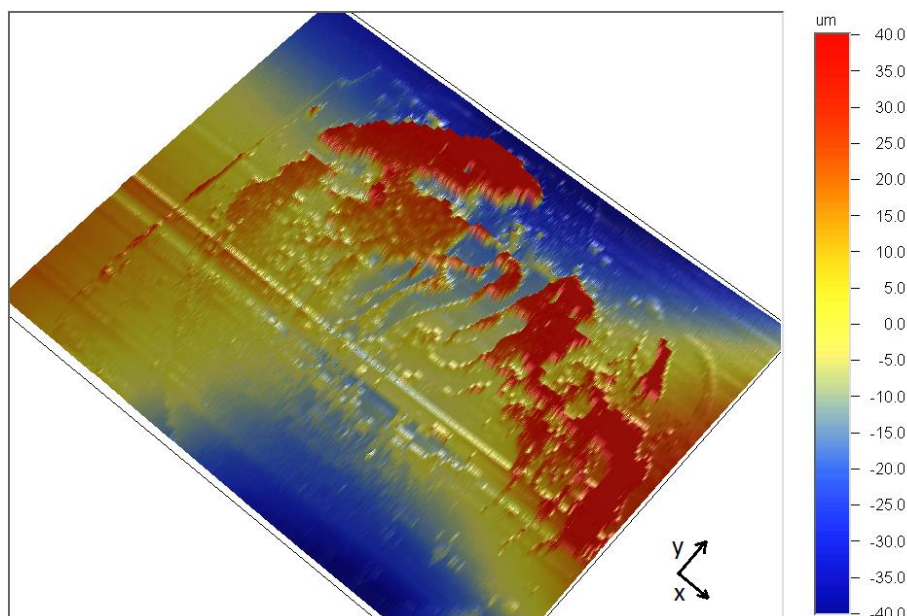
IV.1.1.4. A forraszanyag vastagságának mérése

A későbbi fejezetekben tárgyalt vizsgálatokhoz szükség volt a visszaszilárdult forraszanyag vastagságának mérésére. A mérést első körben $10\text{ }\mu\text{m}$ osztásközű mikrométer csavarral végeztem oly módon, hogy kötés előtt lemértem a két összekötendő fémlemez együttes vastagságát, majd azt a kötés kialakítása után mért összvastagságból levonva kaptam meg a forraszanyag vastagságát. A forraszanyag vastagságokat a 40. ábrán mutatom be a használt tárfogat függvényében.



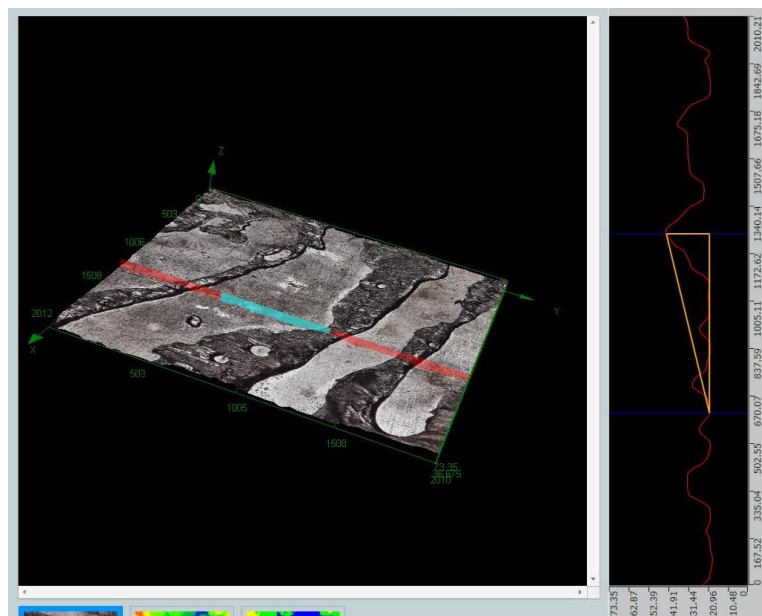
40. ábra: A visszaszilárdult forraszanyag vastagsága a forraszanyag térfogat függvényében. Kísérleti paraméterek: DC01 lemezek kötése 120 W lézerteljesítménnyel és 5 s besugárzási idővel.

A mikrométer csavarral elérhető pontosság $10\text{ }\mu\text{m}$ volt, ennek javítása érdekében profilométerrel (Veeco Dektak 8) és a 3D optikai mikroszkóppal is mértem forraszanyag vastagságokat. A mérés során a profilométer lépésköze $1,670\text{ }\mu\text{m}$ volt, míg az optikai mikroszkóppal $0,225\text{ }\mu\text{m}$ mélységi feloldás volt elérhető. Ezen módszerek további előnye, hogy segítségükkel a forraszanyag laterális eloszlása is meghatározható. A profilométerrel meghatározott magasságtérkép látható a 41. ábrán egy olyan DC01-es minta esetén, amely $4,8\text{ mm}^3$ forraszanyag felhasználásával 120 W lézerteljesítmény és 5 s besugárzási idő mellett készült. Az ábrán látható domborzati szintérkép a felső lemez alsó, kötésben érintett felületéről készült. Megfigyelhető, hogy a lemez kissé meghajlott U alakban y irányban. Ez a deformáció a lemez tárolása, vágása és az összeszorítása során keletkezhetett. A mérések alapján a forraszanyag átlagos vastagsága $27\text{ }\mu\text{m}$, míg az alsó lemez felső, kötésben érintett felületén $31\text{ }\mu\text{m}$ -nak adódott. A figyelembe vett terület helyzetétől és kiterjedésétől függő átlagos vastagságok összegzése alulbecslés. Az így kapott $58\text{ }\mu\text{m}$, bár kisebb a mikrométercsavarral történő mérés során kapott $\sim 75\text{ }\mu\text{m}$ -es értéknél, beilleszthető a 40. ábrán megjelenő trendbe.



41. ábra: Profilométeres 3D-s domborzati térkép a felső lemez alsó kötött felületéről. Kötési paraméterek: 120 W lézerteljesítmény és 5 s besugárzási idő, 4,8 mm³ forrasztanyag használatával DC01 lemezek kötése esetén. A mért terület 12x12 mm.

A 42. ábrán bemutatott felület középső részéről az Olympus mikroszkóppal kinagyított 3D képről és a mellékelt magasságprofilról (41. ábra) 26 μm körüli magasságkülönbségek olvashatók le, ami jól egyezik a profilométerrel kapott térkép színskálája alapján becsülhető értékkel. Mivel a saját laborunkban hozzáférhető mikroszkópos mérés ráadásul gyorsabb is volt, a továbbiakban a forrasztanyag vastagságának méréséhez ezt a módszert alkalmaztam.



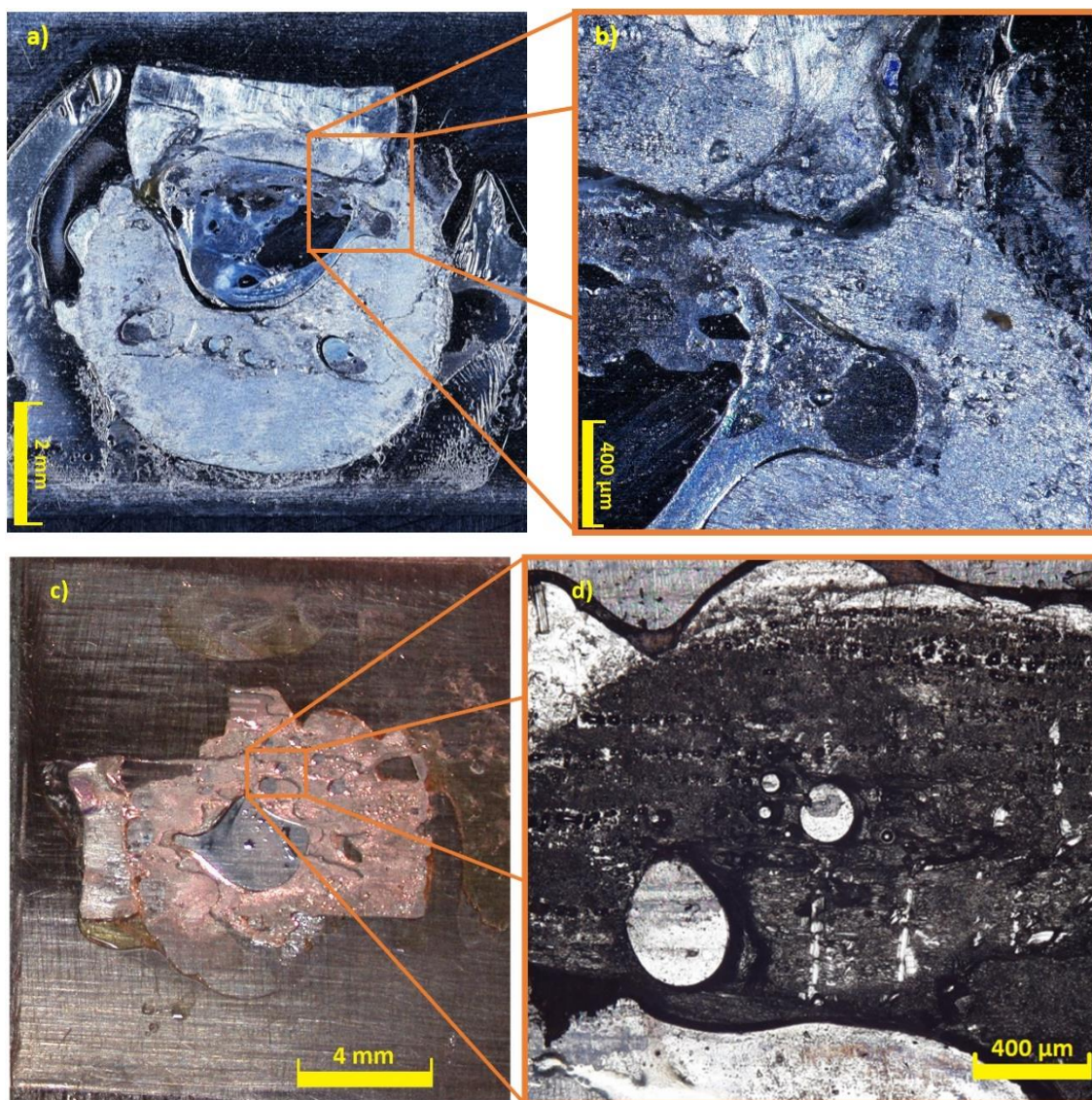
42. ábra: Forrasztanyag vastagság mérése 3D-s optikai mikroszkóppal a felső lemez alsó felületén. Kötési paraméterek: 120 W lézerteljesítmény és 5 s besugárzási idő, 4,8 mm³ forrasztanyagmennyiség.

IV.1.1.5. Morfológiai vizsgálatok

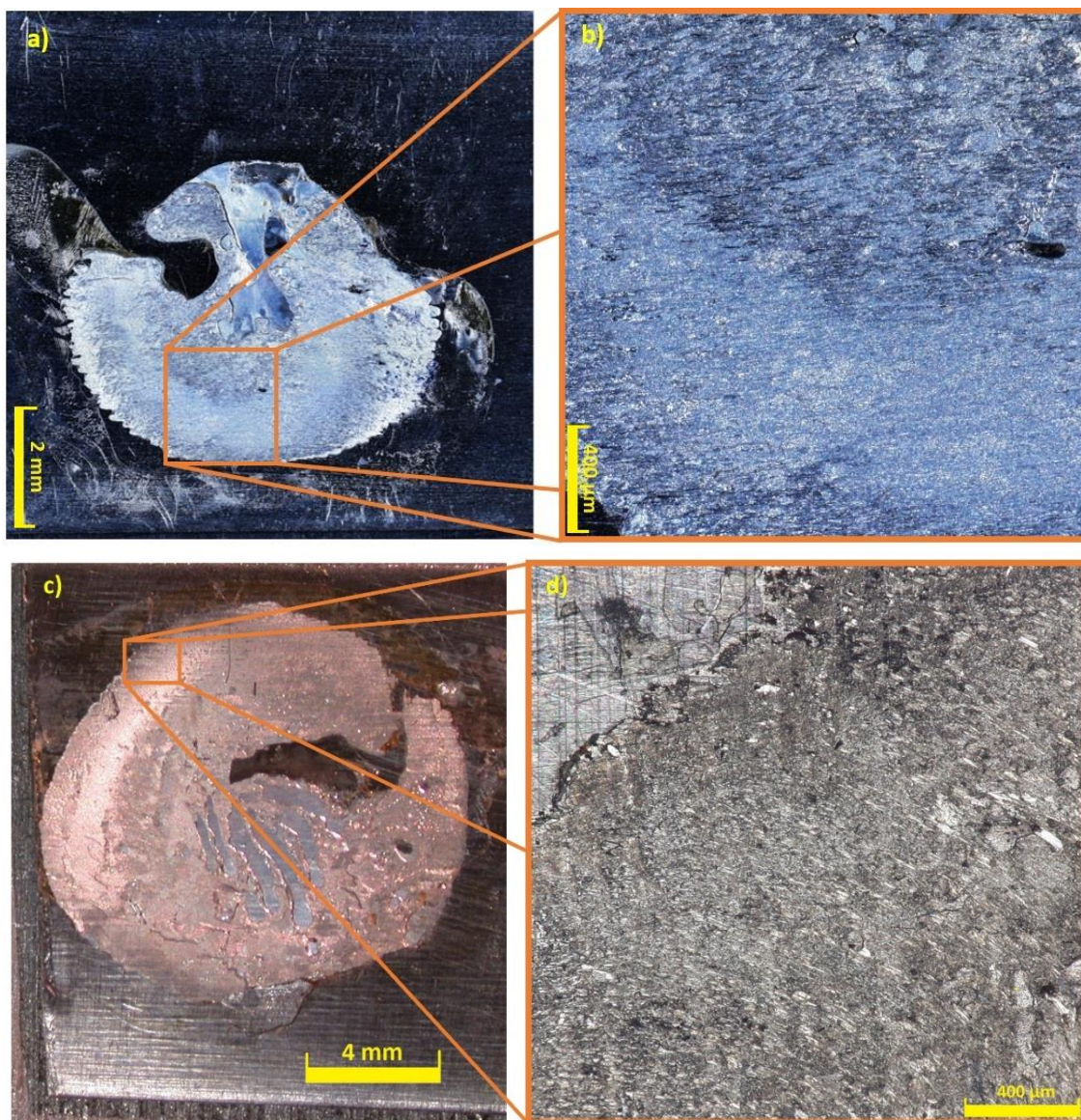
A forrasztott minták mechanikai tulajdonságainak meghatározására szakítópróbán estek át. A forrasztott kötések – az egész átfedési terület mentén kialakítottak kivételével – mindig a forraszanyag-rétegen belül törtek el, azaz határfelületi törés formájában. A szétszakított lemezek belső, kötésben érintett felületein visszamaradt, visszasilárdult forraszanyag morfológiája így megvizsgálhatóvá vált. A forraszanyag töretfelületeinek morfológiáját optikai mikroszkópiával jellemeztem.

Három morfológiai típust azonosítottam. Az *I típust* a 43. ábra szemlélteti Hilumin® (a, b) és DC01 (c, d) lemezek forrasztása esetén. Az ebbe a típusba tartozó forrasztott kötések megkülönböztető jellemzője a meg nem olvadt forraszanyag-maradványok jelenléte, amelyek éllelkel rendelkező, a kötési területen túlnyúló darabokként jelennek meg. Mivel ezek a szilárd darabok a felülethez lazán kötődött távtartóként viselkednek, az ebbe a morfológiai osztályba tartozó kötések várhatóan mind elektromos, mind mechanikai szempontból rossz minőségűek. Az ilyen morfológiával jellemezhető kötések vagy azért keletkeztek, mert a lézer teljesítménye nem volt elegendő a forraszanyag teljes megolvasztásához, vagy azért, mert a forraszanyag túl messze kilógott a lézerrel melegített zónából. A szilárd maradványokon túl az visszasilárdult forraszanyag néhány nagyobb 0,10-0,60 mm² és több kisebb, 0,01-0,10 mm² területű lyukat is tartalmazott. Ezek a gőz- vagy gázbuborékok, amelyek a teljes kötési terület kb. 10-15%-át fedték le, a két lemez közötti olvadt forraszanyag-rétegben ragadtak a visszasilárdulás során. Amint azt később, a 4.1.2.3 fejezetben látni fogjuk, a három típus közül az ebbe a morfológiai kategóriába tartozó kötések a legrosszabbak mind elektromos, mind mechanikai értelemben.

A lyukak méretének és számának növekedésével növekszik a minta elektromos ellenállása és csökken a mechanikai szilárdsága. Ezért a jobb kötési tulajdonság elérése érdekében a legkisebb lyuk területet magába foglaló kötésekkel kell elérni. A 44. ábra a következő morfológiai típust (*II. típus*) szemlélteti Hilumin® (a, b) és DC01 (c, d) minták esetén. A *II. morfológia* típus az alkalmazott lézerteljesítményhez ideális mennyiségű forraszanyaggal előállított kötésekre jellemző. Itt a forraszanyag egyenletesen oszlik el a kötendő felületen, amint az a nagyított képen látható. Ezek a kötések sem mentesek a kisebb lyukaktól, azonban a lyukak sűrűsége és mérete is jelentősen kisebb az *I. típushoz* képest: tipikusan 1-2 darab 0,001 és 0,05 mm² közötti területű lyuk található 1 mm² teljes kötési területen. Ebben a *II. típusú* morfológiai típusban a kötési területnek csak néhány százalékát teszik ki a lyukak. Várhatóan a legalacsonyabb ellenállás és a legnagyobb mechanikai szilárdság mellett ez az optimális forrasztási morfológia, amelyre törekedni kell.

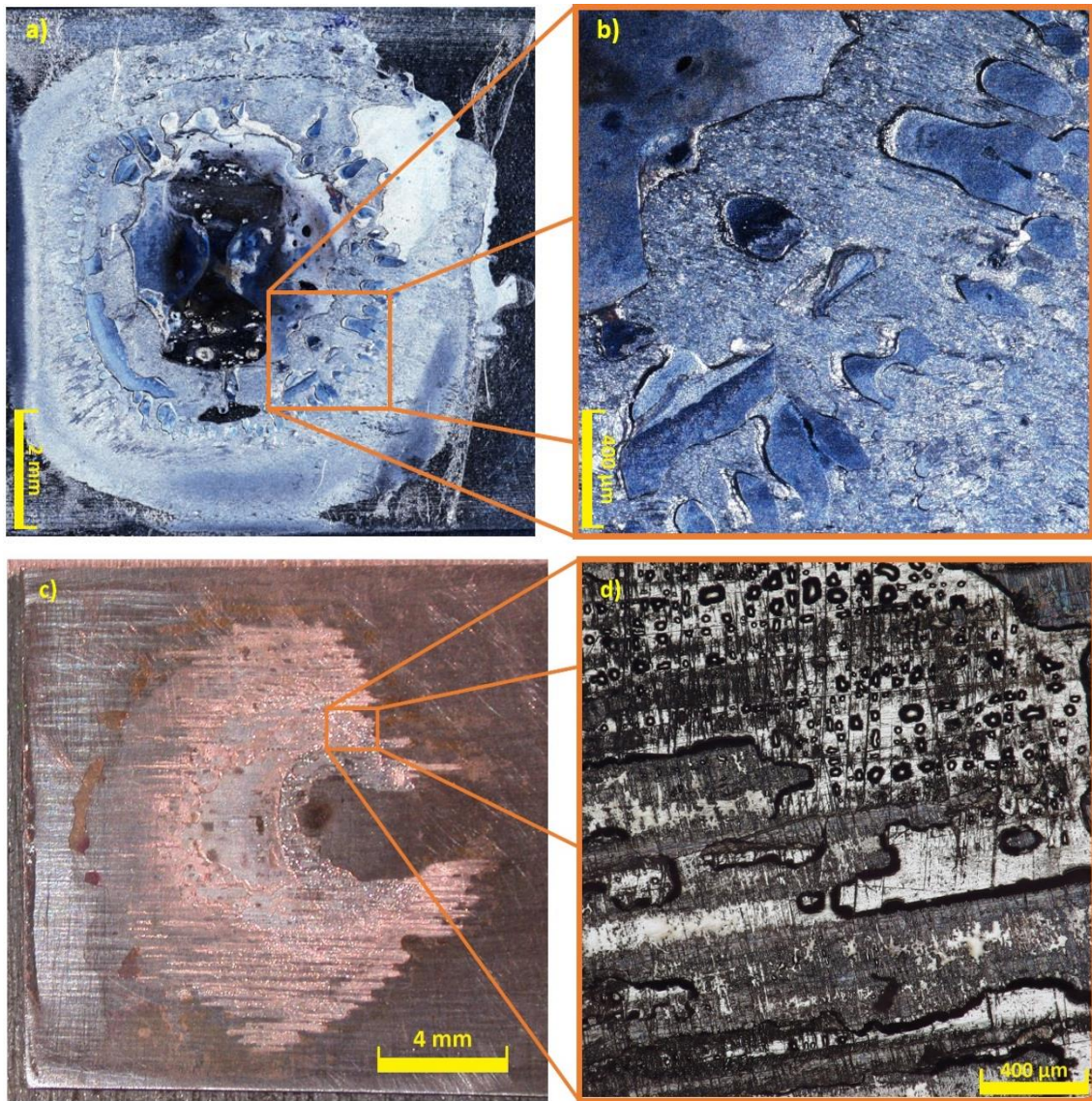


43. ábra: Az I. morfológia típus: a) Egy 80 W-on 5 s alatt $3,2 \text{ mm}^3$ ($5,0 \text{ mm} \times 4,0 \text{ mm} \times 0,16 \text{ mm}$) forrasztanyaggal forrasztott Hilumin[®] minta kötési régiója és b) egy nagyított kép, amely a nem megolvadt forrasztanyagdarab jobb alsó szélét mutatja némi visszaszilárdult forrasztanyaggal együtt. A forrasztanyagmentes területek sötétkézzel jelennek meg, míg a világoskék területek a felső Hilumin[®] lap kötött oldalán maradt forrasztanyagot jelölik. Hasonló ábra látható DC01-es minták esetén is c) a teljes kötési régióról, és d) ennek egy nagyított részéről (paraméterek: 120 W lézerteljesítmény, 5 s besugárzási idő, és $8,0 \text{ mm}^3$) [A1, A2].



44. ábra: A II. morfológia típus: a) Egy 80 W-on 5 s alatt $1,6 \text{ mm}^3$ ($5,0 \text{ mm} \times 2,0 \text{ mm} \times 0,16 \text{ mm}$) forraszanyaggal forrasztott Hilumin® minta kötési régiója és annak b) egy nagyított részlete. A forraszanyagmentes területek sötétkékkel jelennek meg, míg a világoskék területek a felső Hilumin® lap kötött oldalán maradt forraszanyagot jelölik. Hasonló ábra látható DC01-es minták esetén is c) a teljes kötési régióról, és annak d) egy nagyított részletéről (paraméterek: 120 W lézerteljesítmény, 5 s besugárzási idő, és $4,8 \text{ mm}^3$) [A1, A2].

A harmadik morfológiai típusra (*III. típus*) a 45. ábrán mutatok példát. Ez a típus akkor jelenik meg, ha az ideálisnál kevesebb forraszanyaggal, vagy ha az adott forraszanyag mennyiségéhez képest túl nagy lézerteljesítménnyel hozunk létre kötést. A nagyított képen világoskék színnel jelenik meg az effektív kötési terület, amely jellemzően a teljes kötési terület 1 mm^2 -én belül 20-30 darab, $0,001$ és $0,1 \text{ mm}^2$ közötti méretű lyukat tartalmaz Hilumin® minták esetén. A DC01-es minták esetén a lyukak száma 70-100 darab a kötési terület 1 mm^2 -én, nagyságuk szintén $0,001$ és $0,1 \text{ mm}^2$ között változott. Következésképpen a lyukak a kötés teljes területének a $\sim 15\text{-}30 \%$ -át foglalják el mindkét lemez esetén.



45. ábra: A III. morfológia típus: a) Egy 80 W -on 5 s alatt $0,4\text{ mm}^3$ ($5,0\text{ mm} \times 0,5\text{ mm} \times 0,16\text{ mm}$) forrasztanyaggal forrasztott Hilumin[®] minta kötési régiója és abból b) egy nagyított kép. A forrasztanyagmentes területek sötétkékkel jelennek meg, míg a világoskék területek a felső Hilumin[®] lap kötött oldalán maradt forrasztanyagot jelölik. Hasonló ábra látható DC01-es minták esetén is c) teljes kötési régióról, és annak d) egy nagyított részletéről (paraméterek: 120 W lézerteljesítmény, 5 s besugárzási idő, és $1,6\text{ mm}^3$) [A1, A2].

Mivel a lyukak jelenléte károsnak bizonyult mind a kötések elektromos, mind a mechanikai tulajdonságaira nézve, a morfológiai vizsgálat tanulsága az, hogy az optimális kötési tulajdonságok eléréséhez olyan lézerteljesítmény - besugárzási idő tartományban kell dolgozni, amelyben az lyukak mennyisége minimális, és elkerülhető a forrasztanyag nem megolvadt maradványainak megjelenése is. Más szóval, a kötési stratégiának arra kell törekednie, hogy a forrasztanyag teljes térfogatát megolvassza, annak jelentős elpárolgása nélkül. Azt a lézerteljesítmény – besugárzási idő ablakot, ahol a teljes olvadás (*II. típus*) megvalósul, s így a legjobb elektromos és mechanikai

jellemzőkkel rendelkező kötéseket eredményezi, a IV.1.3.1. A megmunkálási ablak fejezetben adom meg.

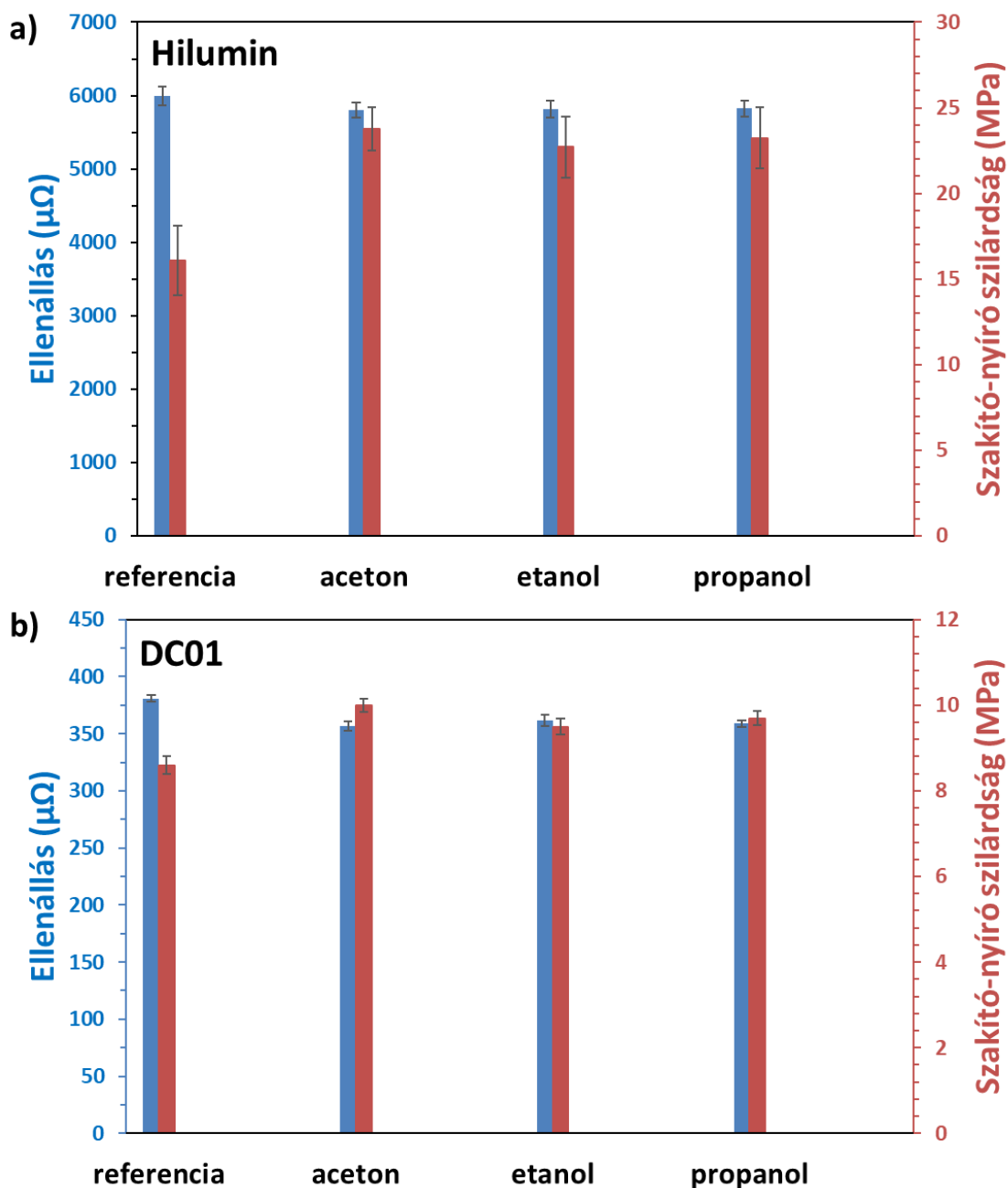
T1.1. *Összefoglalva tehát: a lézerforrasztott lemezpárok szétszakítását követően, a töretfelületek optikai mikroszkópos vizsgálatával megmutattam, hogy 1) a törés minden esetben a forrasztóanyag rétegben következett be, és 2) a töretfelületek megjelenése alapján a kötések három morfológiai típusát azonosítottam.*

A leghomogénebb, egyszersmint a legkevesebb buborékot tartalmazó – általam II. típusként azonosított – morfológiát, amely a forrasztóanyag teljes térfogatának tökéletes átolvasztásával érhető el, Hilumin® lemezpárok esetén 1,6 mm³ forrasztóanyag 80 W-on 5 másodpercig tartó besugárzásával, míg DC01 lemezpárok esetén 4,8 mm³ forrasztóanyag és 120 W lézerteljesítmény mellett, 5 s besugárzási idővel valósítottam meg [A1, A2].

IV.1.2. A kötések tulajdonságainak optimalizálása a folyamatparaméterekkel

IV.1.2.1. Lemezek kémiai tisztításának hatása

A felület tisztaságának a forrasztott kötések tulajdonságaira gyakorolt hatásának vizsgálata érdekében összehasonlítottam egy előkezelés nélkül forrasztott referencia minta tulajdonságait az azonos lézerteljesítménnyel azonos ideig készített, acetonnal, etanollal és propanollal előtisztított lemezekkel készült mintákéval. A lézerforrasztott kötés elektromos és mechanikai jellemzőit a 46. ábrán mutatom be a) Hilumin® és b) DC01 minták esetén. A 80 W-os, 5 másodperces besugárzással, 1,6 mm³ forrasztóanyag térfogattal előállított Hilumin® referencia mintán $(5990 \pm 127) \mu\Omega$ ellenállást és $(13,2 \pm 2,0)$ MPa szakító-nyírószilárdságot mértem. A 120 W-os, 5 másodperces besugárzással, 4,8 mm³ forrasztóanyag térfogattal előállított DC01-es minták referencia értéke $(381 \pm 3) \mu\Omega$ és $(8,6 \pm 0,2)$ MPa volt. Az oldószeres tisztítás minden esetben a tulajdonságok javulásához vezetett. A három reagens hatása között nem volt jelentős különbség: a lemezek a három vizsgált szerves oldószer bármelyikében történő öblítése az ellenállás csökkenését eredményezte, ami a szakító-nyíró szilárdság növekedésével járt együtt. Nem meglepő módon, a húzó-szakító szilárdság mindkét anyagpárnál jelentősen javult, míg az elektromos ellenállást – a Hilumin® esetén látványosan – kevésbé befolyásolta a kémiai tisztítás. Az acetonos tisztítás a Hilumin® esetén $(5805 \pm 101) \mu\Omega$ -ot és $(23,8 \pm 1,2)$ MPa-t, míg a DC01-re $(357 \pm 4) \mu\Omega$ -ot és $(10,0 \pm 0,2)$ MPa-t eredményezett. A mérési hibák csökkenése azt jelzi, hogy a kémiai előtisztítás konzisztensebb mintafelületet biztosított. Mivel ezek a statisztikailag szignifikáns javulások meggyőzőek voltak, a továbbiakban ismertetett összes kísérletet a DC01 és Hilumin® lemezek acetonos előtisztításával végeztem.

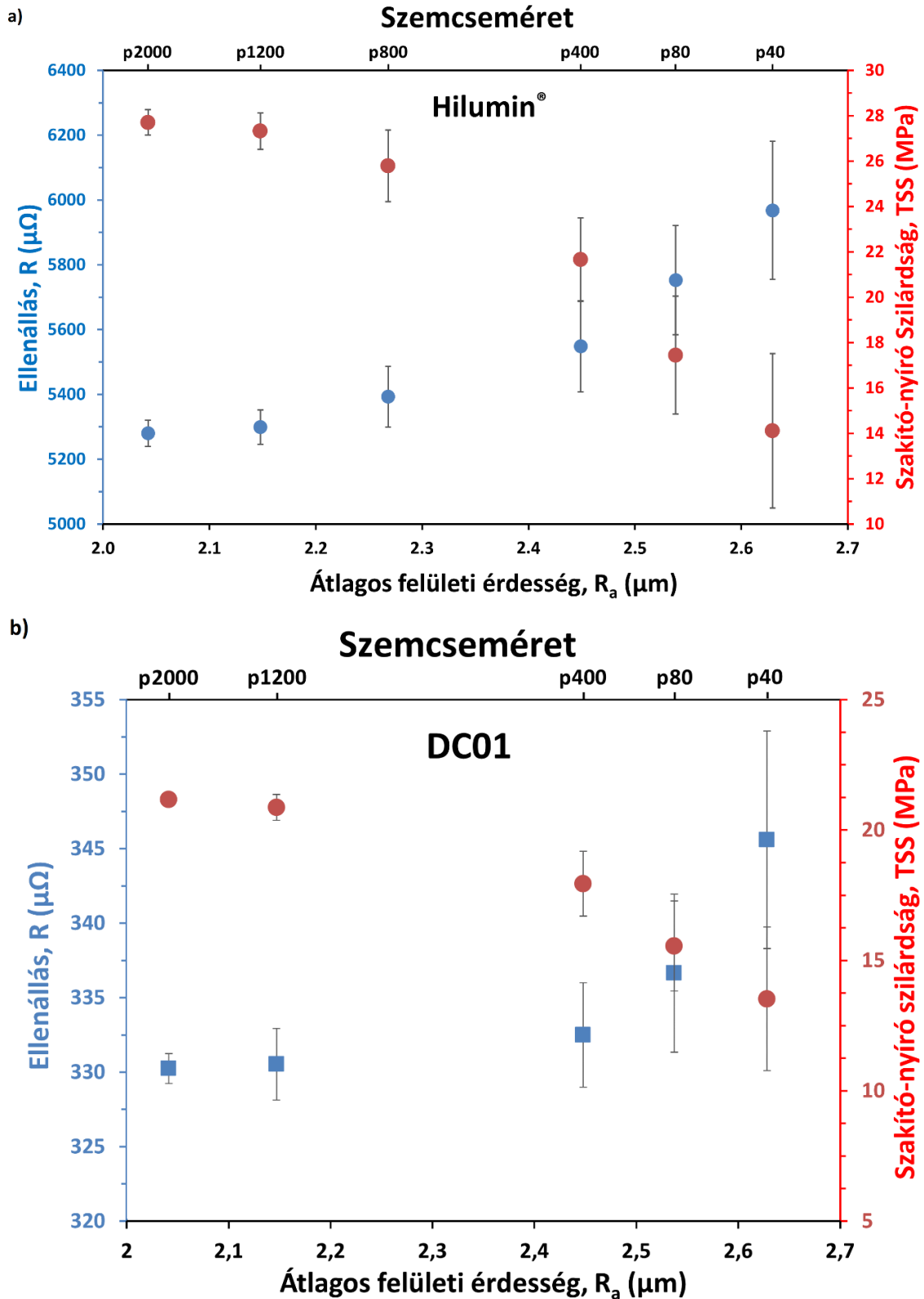


46. ábra: A három különböző kémiai előtisztítás használatának hatása a) DC01 és b) Hilumin[®] minták esetén (5 db minta, 95 % szignifikancia szint)

IV.1.2.2. A lemezek mechanikai érdesítésének hatása

A kötendő fémlamezek érdessége – azok kötésben résztvevő felületének nagyságán és kémiai tisztaságán keresztül – szintén hatással lehet a lézerforrasztott kötés elektromos és mechanikai tulajdonságaira. A felület érdességének a forrasztott kötések tulajdonságaira gyakorolt hatásának vizsgálata érdekében összehasonlítottam öt különböző szemcseméretű csiszolópapírral megcsiszolt lemezpár összeforrasztásával készült minta elektromos és mechanikai tulajdonságait. A 47. ábrán a forrasztott minta

elektromos ellenállása, és a szakító-nyíró szilárdsága látható az átlagos felületi érdesség, R_a , függvényében.



47. ábra: A lézerrel forrasztott a) Hilumin® és b) DC01 lemezek elektromos ellenállása (kék) és szakító-nyíró szilárdsága (piros) az átlagos felületi érdesség (R_a) függvényében ($P_{Hilumin}=80\text{ W}$, $P_{DC01}=120\text{ W}$, és $t=5\text{ s}$) [A1, A2].

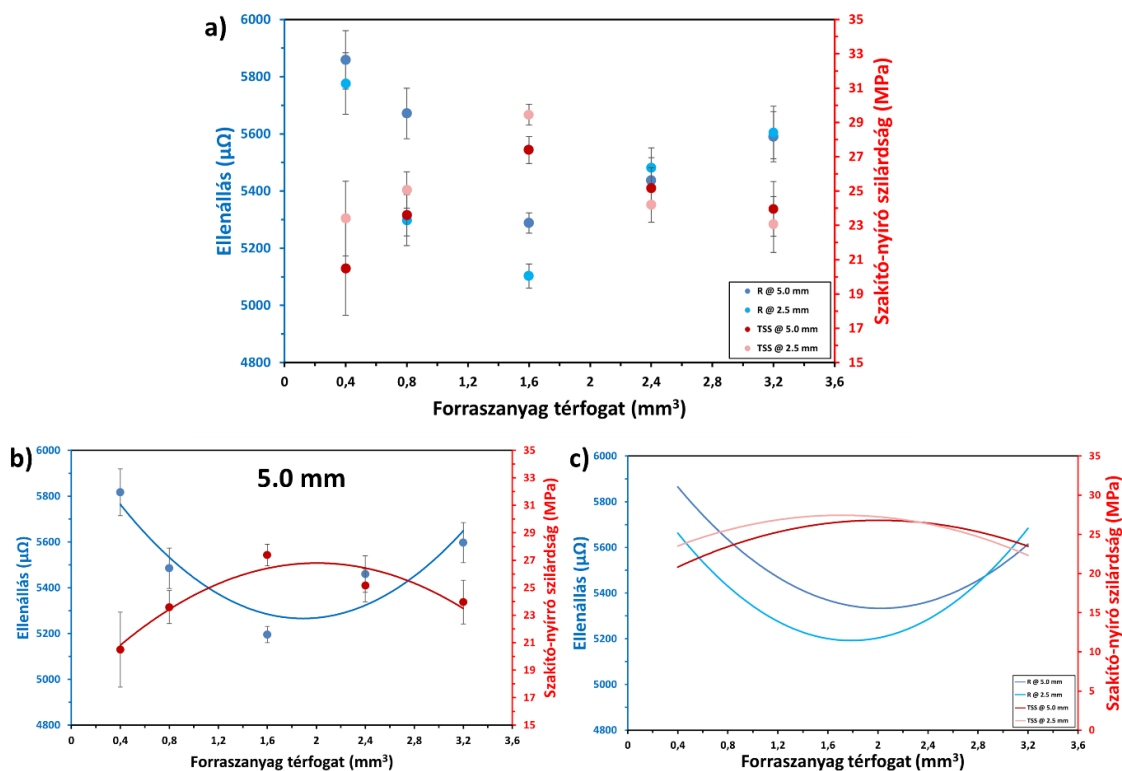
Mind az elektromos ellenállás mind a szakító-nyírószilárdság folyamatosan és monoton módon javul a szemcseméret csökkenésével mindkét lemez esetén. A javulás üteme a p40-p800 tartományban jelentős, majd p1200 szemcseméret alatt lelassul. A Hilumin[®] minták esetén a felületkezelés nélkül mért megfelelő értékekhez képest az ellenállás 11,9 %-kal (5280 ± 40) $\mu\Omega$ -ra csökkent, a szakító-nyíró szilárdság pedig 1,7-szeresére javult, amivel elérte a ($27,7 \pm 0,6$) MPa értéket. A DC01-es lemezeknél ez a javulás 14,4 % volt az ellenállás esetén: (330 ± 1) $\mu\Omega$, és 2,5-szeresére javult a szakító-nyíró szilárdság: ($21,2 \pm 0,2$) MPa. Jól látható, hogy az elektromos ellenállást kevésbé befolyásolja a mechanikai érdesítés, mint a szakító-nyírószilárdságot. A javulási tendencia mellett, a grafikonokon az is látható, hogy a finomabb papírokkal csiszolt fémfelületeken mért elektromos és mechanikai jellemzők kisebb szórást (akár 10x javulás is elérhető) mutatnak, ami technológiai szempontból szintén előnyös.

Finomabb szemcseméretű papírokkal történő csiszoláskor kisebb érdességű felület jön létre, azaz több, kisebb szélességű és magasságú hegy/árok jellemzi a csiszolt felületet. Ennek következtében a kötési felület megnő, ez pedig javítja a forrasztott kötés elektromos és mechanikai viselkedését, kisebb ellenállást és erősebb (mechanikai) kötést jelent. Ennek a javulásnak az üteme fokozatosan lassul, mivel a finomabb felület nedvesítése az olvadt forrasztanyaggal egyre nehezebbé válik [149]. Esetünkben ez az effektus a p1000-es szemcseméret körül következik be. Mindenesetre a csiszolópapírral történő kezelés értékes előkezelési eszköz a lézerforrasztott kötések elektromos ellenállásának csökkentése és mechanikai szilárdságának növelése, valamint ezen jellemzők változékonyságának csökkentése céljából. Ezeket az eredményeket figyelembe véve a továbbiakban az acetonos öblítést kiegészítettem az összekötni tervezett lemezfelületek p1200-as csiszolópapírral történő átcsiszolásával [A1, A2].

IV.1.2.3. A forrasztanyag mennyiségének és méretének hatása

A forrasztanyag mennyiségének hatását a kötések ellenállására és szakító-nyírószilárdságára a téglalap alakú forrasztanyag-lemez geometriai méreteinek és térfogatának változtatásával vizsgáltam. Tíz különböző méretű, téglalap alakú forrasztanyagdarabbal végzett kísérleteim azt mutatták, hogy a kötés minősége függ ezek térfogatától és téglalapok oldalarányától is.

A 0,16 mm x 5,0 mm keresztmetszetű forrasztanyag-lemezek hosszát a Hilumin[®] minták esetén 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 és 4,0 mm között változtattam, ami a forrasztanyag térfogatának 0,40 mm³ és 3,20 mm³ közötti változásának felel meg. A forrasztanyag geometria hatásának ellenőrzése érdekében egy másik mintasorozatot is készítettem 0,16 mm x 2,5 mm keresztmetszetű és 1,0 és 8,0 mm között változó hosszúságú forrasztanyag lemezekkel, ezzel biztosítva az azonos vizsgált forrasztanyag-térfogattartományt.



48. ábra: a) A 0,16 mm vastagságú forrasztanyagokkal elért kötések elektromos ellenállása (kék) és szakító-nyírószilárdsága (piros) 80 W lézerteljesítmény és 5 s besugárzási idő használata esetén. Sötétebb szimbólumok 5,0 mm széles, míg a világosabb szimbólumok 2,5 mm széles forrasztanyag lemezekkel készült minták adatai. b) Az 5 mm széles forrasztanyag lemezekkel készült minták tulajdonságainak trendjei. c) A két különböző forrasztanyag térfogathoz tartozó sorozat trendjei [A2].

A 48. ábrán bemutatott eredmények szerint az elektromos ellenállás a forrasztanyag-térfogat növelésével kb. 1,6 mm^3 -ig javult, míg ezt követően romlott. A szakító-nyírószilárdság ugyanennél a térfogatnál látványos emelkedés után eléri a maximális értékeket, majd csökken. A sötét és világos szimbólumokkal ábrázolt, azonos térfogatú forrasztanyag-párokat összehasonlítva látható, hogy 1,6 mm^3 -ig a 2,5 mm széles lemezekkel készült kötések jobb elektromos és mechanikai tulajdonságokat biztosítanak, míg ezen határérték felett a tendencia megváltozik, amint az a 48. ábrán is látható. A magyarázat: 1,6 mm^3 -ig a 2,5 mm hosszú forrasztanyag lemezek teljes keresztmetszete a 4,5 mm átmérőjű lézerfolton, azaz a lézerrel fűtött zónán belül marad, míg nagyobb forrasztanyag-térfogatoknál a forrasztanyag lemezek egy része túlnyúlik a megvilágított területen kívülre. Ezek a peremterületek nem olvadnak meg. A szilárd maradványok rontják a kötés minőségét, ahogy ezt a viselkedést már 4.1.1.5. Morfológia vizsgálatok fejezetben bemutattam. Az 1,6 mm^3 forrasztanyag-térfogat használatával előállított két kötés közül a keskenyebb, azaz a 0,16 mm x 2,5 mm x 4,0 mm geometriájú kötés rendelkezik alacsonyabb ellenállással ($5102,8 \pm 42,1$) $\mu\Omega$ és magasabb szakító-nyíró szilárdsággal ($29,5 \pm 0,6$) MPa azért, mert ebben az esetben a forrasztanyag lemez teljes mértékben a kivilágított területen belül marad [A2].

A DC01-es minták esetében hasonló trendet figyeltem meg. Ott a 120 W

lézerteljesítménnyel és 5 s besugárzási idővel készült minták esetén az optimális forrasztóanyag mennyiség a 4,8 mm³ volt [A1].

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

- *megmutattam, hogy az összeforrasztandó lemezek megfelelő előtisztításával maximum 5%-os javulás érhető el mind a Hilumin[®] mind a DC01 lézerforrasztott lemezpárok elektromos és mechanikai tulajdonságaiban, úgy, hogy az acetonnal, etanollal vagy propanollal végzett kémiai tisztítási módok között nincs szignifikáns különbség.*

- *Bebizonyítottam, hogy a felületi érdesség változtatásának jelentős hatása van a lézerforrasztott lemezpárok elektromos és mechanikai tulajdonságaira. Az átlagos felületi érdesség, R_a 2,63 -ról 2,04 mikrométerre csökkenése a Hilumin[®], illetve a DC01 lemezpárok ellenállásában 11,9, illetve 14,4 %-os, míg szakító-nyíró szilárdságukban 1,7, illetve 2.5-szeres javulást eredményez.*

- *A forrasztóanyag mennyiségét állandó lézer teljesítmény, 80 W, és besugárzási idő, 5 s mellett 0,40 mm³-től 3,20 mm³-ig változtatva bebizonyítottam, hogy létezik optimális forrasztóanyagmennyiség. A vizsgált teljesítmény – idő pár esetén a 1,6 mm³ térfogatú forrasztóanyag adta mind elektromos mind mechanikai szempontból a legjobb kötést.*

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

IV.1.3. A kötések tulajdonságainak optimalizálása a lézeres folyamat paraméterekkel

IV.1.3.1. A megmunkálási ablak

A forrasztásnál a legfontosabb paraméter a kötés során a lemezpárba juttatott energia. Ez az energia a használt kísérleti elrendezésben kényelmesen hangolható a lézerteljesítmény és/vagy a besugárzási idő szabályozásával. A megmunkálási ablakon azt a lézerteljesítmény-idő síkon kijelölt területet értjük, ahol kötéseket tudunk létrehozni. Ezaz esetben a 5-200 W-os lézerteljesítmény és 2-20 s besugárzási idő tartomány volt, amelyben a Hilumin[®], illetve DC01 lemezek forrasztását 2,0 x 5,0 x 0,16 mm³, illetve 5,0 x 5,0 x 0,16 mm³ térfogatú forrasztóanyaggal végeztem.

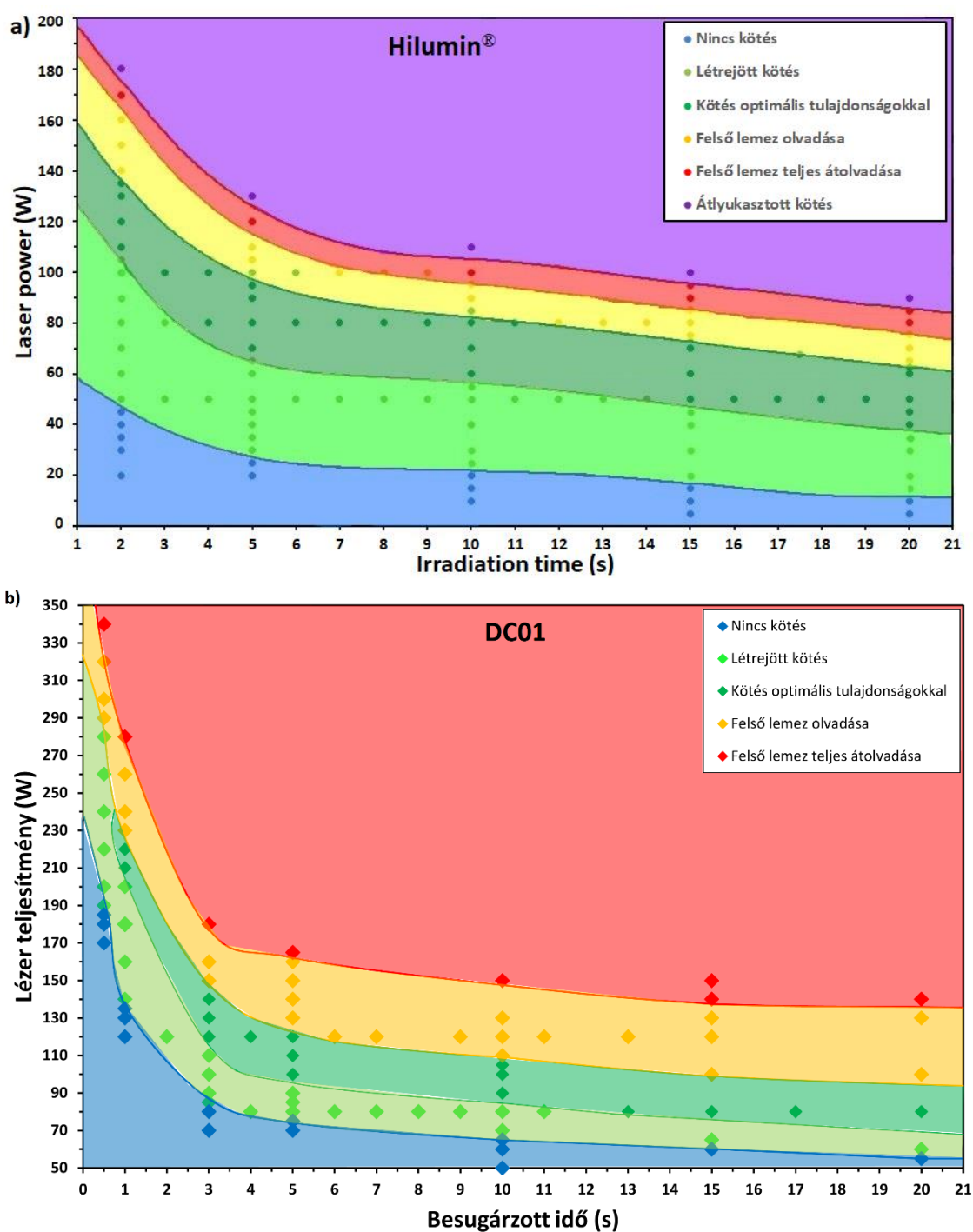
A mintában bekövetkező változások alapján hat kategóriát különböztettem meg, amelyeket a 49. ábrán különböző színekkel jeleníték meg. A kék zóna azt a területet

jelöli, ahol nem sikerült kötést létrehozni. A kék és a világoszöld területek közötti határvonal határozza meg tehát a kötés kialakulásának küszöbértékeit a lézerteljesítmény-besugárzási idő párra. A világoszöld pontokat tartalmazó területen belül még nem megolvadt forraszanyagot tartalmazó kötések jöttek létre, míg a sötétzöld zóna azt a területet jelölik, ahol a forraszanyag teljes megolvadása a legjobb tulajdonságokkal rendelkező kötések hozza létre. A sárga zóna azokat a lézerteljesítmény-besugárzási idő párokat tartalmazza, amelyek – a kötés kialakulása mellett – már a felső kötendő lemez felső felületének helyi megolvadását is okozzák. A lézerteljesítmény további növelése az összekötendő fémlemezek fokozatos átolvadásához vezetett: a piros pontokkal jelölt régióban már lyukat fúrtam a felső lemezbe, míg a piros-lila határvonal fölött a kialakult lyuk az alsó kötendő lemezt is elérte. A sárga-piros határvonal így egy új hibrid kötési mechanizmus (hegesztés és forrasztás együtt) megjelenését jelzi, amely azonban már nem tartozik a jelen dolgozat vizsgálati körébe. Az utóbbi két zóna a bonyolult folyamatok a kötés tulajdonságainak rossz reprodukálhatóságához is vezetett.

A kötés típusok megjelenési sorrendje minden megmunkálási idő esetén azonos. A különböző típusokhoz azokra egyedileg jellemző elektromos és mechanikai viselkedés tartozik. Látható, hogy a szomszédos régiók közötti küszöb teljesítmény értékek csökkennek a besugárzási idő növelésével. A Hilumin[®] minták 2,0x5,0x0,16 mm³ forraszanyaggal történő kötése esetén a kötéskezési küszöbérték monoton nő 15 és 30 W között a besugárzási idő csökkenésével ~5 s-ig. 5 s után a növekedés üteme felgyorsul. 2 s besugárzási időnél 45 és 50 W közötti lézerteljesítmény szükséges a kötések létrehozásához. A besugárzási idő csökkenésével minden tartomány kiszélesedik és nagyobb lézerteljesítmény felé tolódik, bár mindegyik eltérő mértékben. Az elektromos és mechanikai szempontból legjobb kötések 2 s-os besugárzási idő esetén 105 W-135 W, míg 20 s esetén 40 W-65 W beeső lézerteljesítmény tartományban jönnek létre. A tendenciák a DC01-es lemezek kötésekor is hasonlóak, az abszolút értékek az anyagi jellemzők és a méretek különbözősége miatt mások. A DC01-es lemezek kötésekor az elektromos és mechanikai szempontból legjobb teljesítmény tartomány a 210-220 W 2 s besugárzási idő esetén, és 60-95 W 20 s esetén.

T1.3. *Tézisszerűen összefoglalva: a feltérképezett lézerteljesítmény – besugárzási idő megmunkálási paraméter ablakban 6 zónát különböztettem meg: amelyekben az adott lézerteljesítmény-besugárzási idő pár hatására 1) a lemezpárok között nem jön létre kötés, 2) kötés alakul ki, 3) a kötés optimális tulajdonságokkal rendelkezik, 4) még mindig jó kötés kialakulása mellett a felső lemez felső felülete megolvad, 5) a lézernyaláb a felső lemez átolvasztásával abba lyukat fúr, míg 6) a kötés középső zónájában a lyukképződés az alsó lemezt is eléri. Igazoltam, hogy ez a hat zóna minden besugárzási időnél ugyanabban a teljesítmény sorrendben jelenik meg [A1, A2].*

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



49. ábra: A kialakult kötéskategóriák a megmunkálási ablakban a) Hilumin® és b) DC01 lemezek homogén kötése esetén. A mérési eredményeket ábrázoló pontok a megfelelő lézerteljesítmény-besugárzási idő párokhoz tartozó kötési típusokat, míg a vonalak a régiók közötti becsült határvonalakat jelölik [A1, A2].

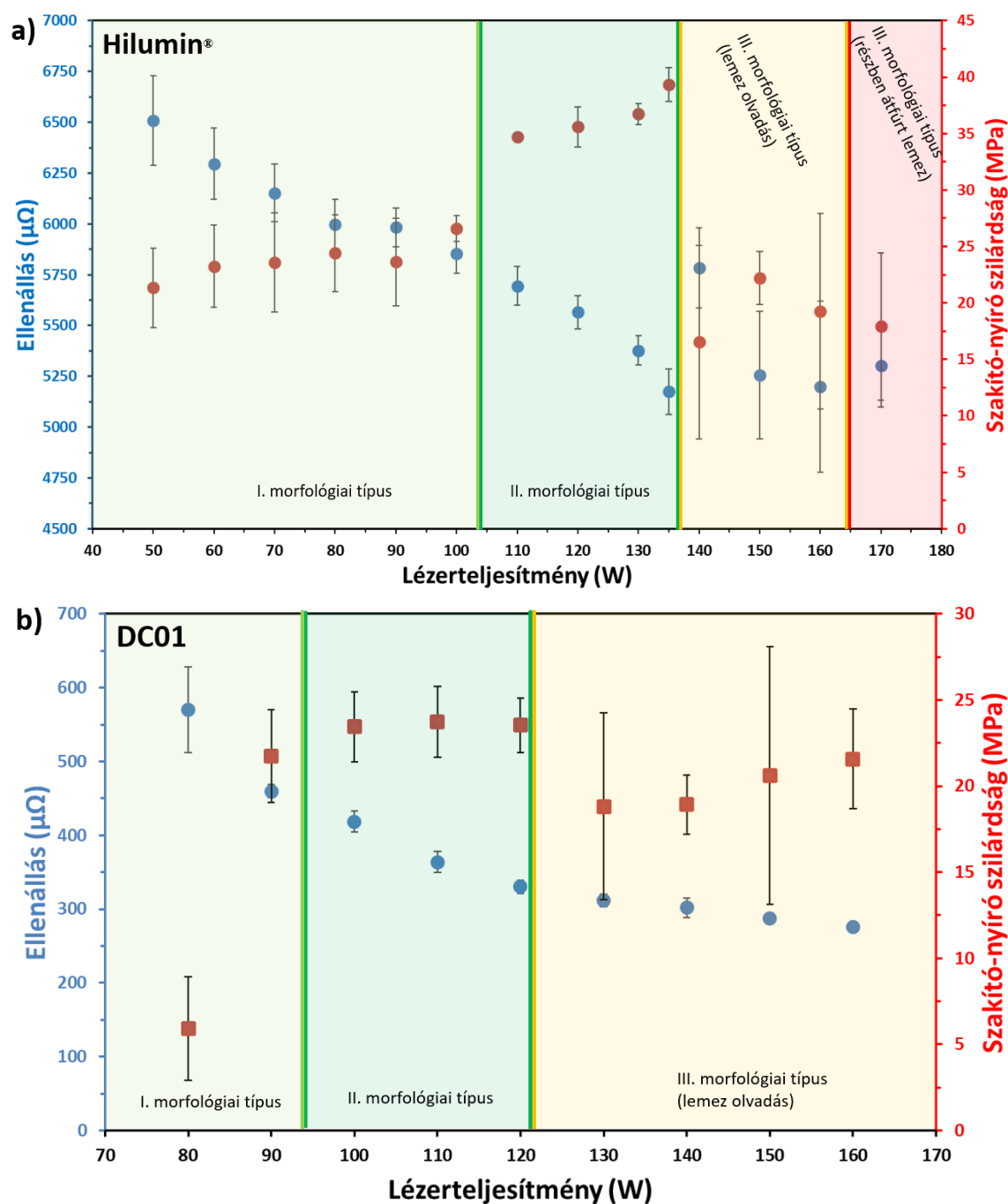
IV.1.3.2. A lézerteljesítmény hatása

A lézerteljesítménynek a kötések elektromos és mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatását 2 és 20 s között öt különböző besugárzási idő esetén vizsgáltam. Mivel

a tendenciák minden besugárzási időnél azonosak voltak, a megfigyelt tendenciákat egy besugárzási időnél szemléltetem. A legrövidebb megmunkálási időhöz tartozó teljesítménysorozatra esett a választásom, amely gyártási szempontból is optimális. Ez egyébként Hilumin[®] esetén 2 s, míg DC01 esetén 5 s sorozat volt. Továbbá a legkisebb hőhatás itt éri a rendszert a vizsgált tartományban sorozataim közül. Amennyiben alsó határként azt a legkisebb lézerteljesítményt definiáljuk, amely kötés létrejöttét eredményezi, míg a felső határként azt, amely már a felső lemezt átolvasztja, az adott besugárzási idő esetén az a lézerteljesítmény-ablak, amelyen belül kötést tudunk létrehozni Hilumin[®], illetve DC01 lemezek között, 50-160 W, illetve 80-160 W (49. ábra). Ezekben a teljesítménytartományokban mindhárom, a 4.1.1.5. Morfológia vizsgálatok fejezetben részletesen bemutatott morfológiai típus megjelenik: Hilumin[®] lemezek kötése esetén az 50-105 W, míg DC01 esetén a 80-95 W lézerteljesítmény tartományban előállított kötések morfológiája *I. típusú*, ahol a kötés a forraszanyag nem teljes olvadásával együtt alakul ki. Az optimális jellemzőkkel rendelkező *II. típusú* morfológia Hilumin[®] kötések esetén 105 és 138 W között, míg DC01-es kötések esetén 95 és 125 W között fordult elő. A *III. típusú* morfológia három kötéskategóriában is megjelenik: a felső lemez felületi (sárga zóna), teljes olvadásával (piros zóna), és ezen túl az átlukasztott lemezzel (lilla zóna) járó kötések. Hilumin[®] lemez esetén 140 W, míg DC01 esetén 130 W lézerteljesítmény már elegendő volt a besugárzott lemez legfelső felszínének megolvasztásához. A teljesítmény további növelése kiterjedtebb és mélyebb olvadást eredményez, ami végül lyukfűráshoz is vezetett Hilumin[®] minták esetén 170 W-nál, DC01-es minták esetén pedig 250 W-nál és afölött. Azt, hogy a kötések elektromos ellenállása és szakító-nyíró szilárdsága hogyan változik a lézerteljesítmény függvényében, a kötéskategóriák közötti határokat is tartalmazó 50. ábrán mutatom be.

Hilumin[®] minták esetén az elektromos ellenállás $(6510 \pm 221) \mu\Omega$ -ról $(5174 \pm 111) \mu\Omega$ -ra csökken a teljesítmény 50 W-ról 135 W-ra történő növelésével, ami kb. 20 %-os javulás. A javulással párhuzamosan az ellenállás abszolút hibája is csökken, 130 W-nál $\pm 70 \mu\Omega$ körüli értékre. Az I. morfológiai típusnak nagyobb a hibája, mint a II. típusnak. Ezen két típuson belül a hiba nem függ a teljesítménytől. Praktikusan ugrás van itt is az I.-és-II. határon úgy, mint a II.-és-III határon. A két ugrás között pedig az a különbség, hogy az első kisebb mértékű, mint a második. A lézerteljesítmény további növelése az ellenállás hirtelen történő növekedését okozza: 140 W-nál az ellenállás $(5784 \pm 198) \mu\Omega$ -ra ugrik. A vezetőképesség e váratlan romlása a felső fémlap részleges megolvasztásának következménye: az olvadás látens hője a forraszanyagot fűtő energia szempontjából veszteségeként jelenik meg, ami rosszabb kötést eredményez. A fémek szilárd állapotban körülbelül 1,5-2,3-szor több áramot vezetnek, mint olvadék formájában, mivel a kristályos (vagy polikristályos) szerkezetben az anyagok szabályos elrendeződése lehetővé teszi a fonon alapú vezetést, míg a folyékony fémek rendezetlen szerkezete nagyobb ellenállást, azaz alacsonyabb vezetőképességet okoz. Továbbá a fém olvasztása után visszaszilárdult anyag rendezetlenebb szerkezete dominál, ami az elektromos ellenállás emelkedését okozza. A lézerteljesítmény 160 W-ig történő további növelése a Hilumin[®] forrasztott minták megnövekedett ellenállása nagyobb

szórással is jár együtt, amely $430\ \mu\Omega$ körüli abszolút hibákban jelenik meg, ami kb. háromszor nagyobb, mint az optimális teljesítménytartományban megfigyelt hibatartomány. Az összeforrasztandó DC01 lemezek nagyobb vastagsága/tömege miatt $170\ \text{W}$ -nál még nem érjük el ezt a küszöb teljesítmény tartományt. A mért ellenállás értékek monoton csökkennek: $(551\pm 21)\ \mu\Omega$ -ról $(283\pm 6)\ \mu\Omega$ -ra csökkent és a kísérleti hiba is csökkent $3,3\ \%$ -ra. Ellenben azok mechanikai tulajdonságával, hiszen az a küszöb érték felett rosszabb lesz.



50. ábra: Szakító-nyírószilárdság (piros) és elektromos ellenállás (kék) a lézerteljesítmény függvényében 2 s besugárzási időnél a) Hilumin® minták, és b) 5 s-nál DC01-es minták esetén. A kísérleti hibát három különálló mérés alapján

határoztam meg. A színek a 49. ábrán bemutatott morfológiai kategóriákat jelölik [A1, A2].

A szakító-nyírószilárdság hasonló viselkedést mutat mindkét lemez esetén. Amikor a lézer teljesítményét 50 W-ról 135 W-ra növeljük Hilumin[®] minták esetén, a szakító-nyírószilárdság (21,3±3,4) MPa-ról (39,3±1,5) MPa-ra javul, ami több mint 45 %-os növekedést jelent. A kísérleti hiba 110 W közelében a legkevesebb: 0,3 MPa. DC01-es minták esetén a javulás akár négyszeres is lehet, hiszen (5±2,5) MPa-ról (24±1,5) MPa-ra változott. A kísérleti hiba 120 W közelében volt a legkevesebb: 1,5 MPa. A küszöbteljesítmény elérésével hirtelen változás következik be: ellenállásban növekedést tapasztaltam mindkét lemez esetén és a szakító-nyíró szilárdság (16,5±8,5) MPa és (17±4,5) MPa értékre csökken, Hilumin[®] és DC01 lemez esetén ez. További lézerteljesítmény növelés egy adott szilárdsági értékekhez nagy hibával konvergál.

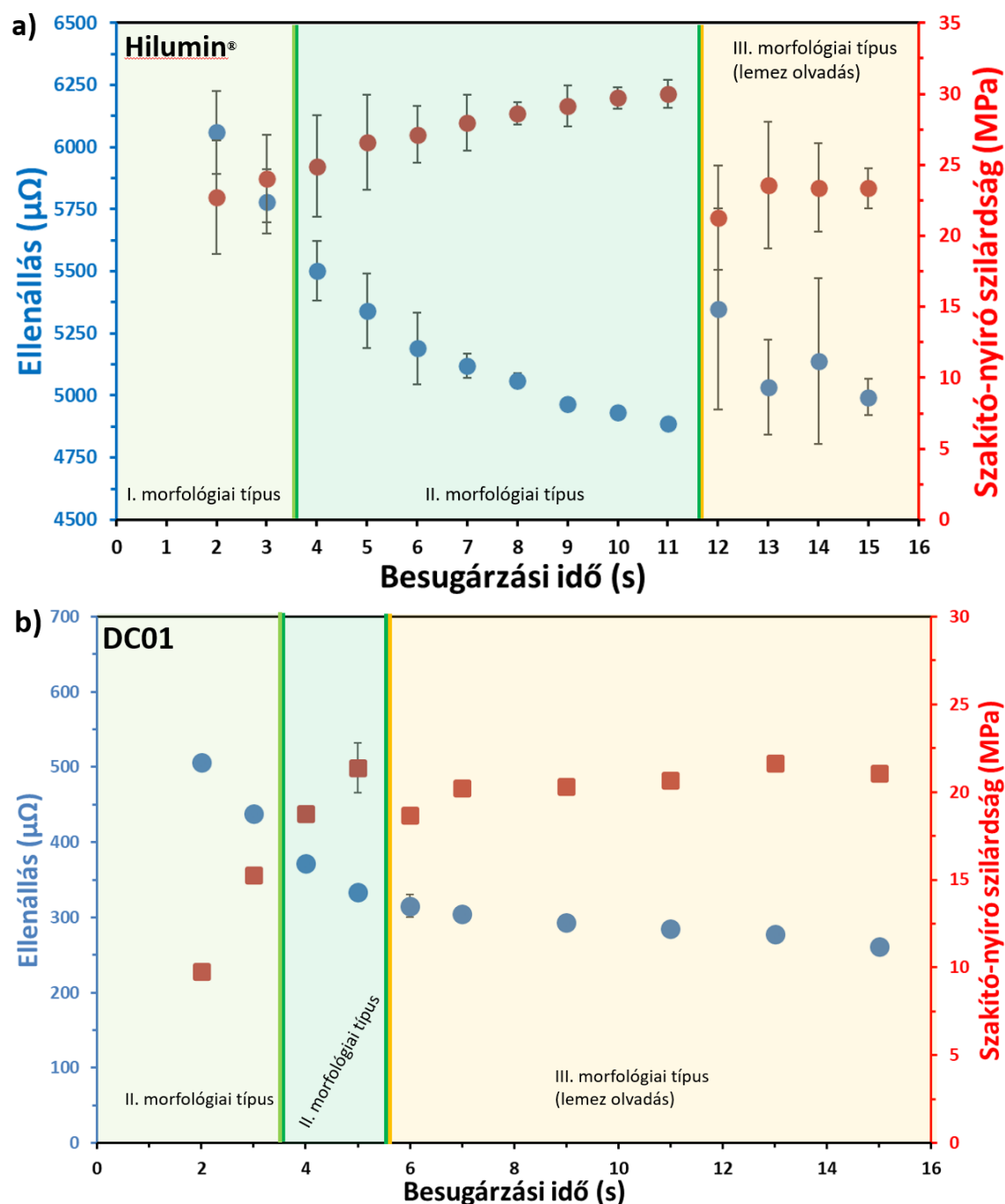
A 135 W lézerteljesítményű forrasztás 2 s besugárzási idővel, közvetlenül a lézersugárral szemben lévő Hilumin[®] lemez olvadásának kezdetét megelőzően a legjobb elektromos és mechanikai tulajdonságokkal rendelkező kötéseket eredményezi. Ez a teljesítmény-besugárzási időpár DC01 fémlemezek kötésekor 120 W, 5 s. Mindkét anyagpárra van optimális megmunkálási tartomány, és ennek eléréséig azonos viselkedés figyelhető meg (lásd 49. ábra sötét zöld zónája).

IV.1.3.3. A besugárzási idő hatása

A besugárzási idő hatását a lézerforrasztott minták tulajdonságaira három különböző lézerteljesítményen vizsgáltam sebességsorozatot, nevezetesen 50, 80 és 100 W-on Hilumin[®] és 80,100 és 120 W-on DC01 lemezpárok esetén. Az 51. ábrán a minták elektromos ellenállásának és szakító-nyírószilárdságának viselkedését mutatom be a besugárzási idő függvényében 2 s-tól 15 s-ig 80 W-on Hilumin[®] és 120 W-on DC01 esetén. Ebben a paramétertartományban mindhárom korábban említett morfológiai típus megfigyelhető: az *I. típus* 2 és 3 s, a *II. típus* 4 és 7 s között, a *III. típus* pedig 11-től 15 s-ig jelenik meg. Az utóbbi 11 s-tól 15 s-ig terjedő tartományban részben megolvadt felső Hilumin[®] lapokkal rendelkező minták készültek. DC01-es minták esetén 2-3 s, 4-5 s és 5 s felett volt a különböző morfológiai típus besugárzási idő tartománya. A Hilumin[®] és DC01 *II. morfológiai típusú* mintái markánsan eltérő időszélességű ablakban jelentek meg, ez a különböző teljesítmény nagyság miatt lehetséges, ami pedig a különböző vastagságú lemezek miatt van.

A Hilumin[®] lemezpár esetén a besugárzási idő 2 s-ról 11 s-ra tartó növelésével az ellenállás (6059±167) μΩ-ról (4887±18) μΩ-ra csökken, ami kb. 19 %-os javulás. Az ellenállás abszolút hibája a 8-11 s időtartományban a legkisebb. A besugárzási idő 12 s-re (besugárzási időküszöb) való növelése az ellenállás hirtelen növekedését okozza (4887±18) μΩ-ról (5350±405) μΩ-ra, ami a megvilágított Hilumin[®] lap részleges megolvadásának a következménye, ami ugyanaz a viselkedés, ami a lézerteljesítménysorozatban is megfigyelhető volt (50. ábra). A besugárzási idő 15 s-ra növelésével az ellenállás a minimálisához közeli értékre áll vissza, bár a korábbinál nagyobb kísérleti

hibával. A DC01-es minták esetén ez a viselkedés nem látható, hasonlóan a teljesítmény sorozatnál megfigyelthez, valószínűleg a lemez vastagsága miatt ehhez nagyobb lézerteljesítmények irányába kellett volna még elmennem. A DC01-es minták ellenállása a 2 -nál mért $(510 \pm 18) \mu\Omega$ -ról 15 s-os besugárzás esetén $(280 \pm 8) \mu\Omega$ -ra csökkent, ami 45 %-os javulást jelent. Továbbá az abszolút kísérleti hiba is csökkent 1,9 %-ra.



51. ábra: Szakító-nyírószilárdság (piros) és elektromos ellenállás (kék) a besugárzási idő függvényében 80 W lézerteljesítménynél a) Hilumin® minták, és b) 120 W-on DC01-es minták esetén. A kísérleti hibát három különálló mérés alapján határoztam meg. A színek a 49. ábrán bemutatott morfológiai kategóriákat jelölik [A1, A2].

A Hilumin[®] minták esetén, miközben a besugárzási időt 2 s-ról 11 s-ra növeljük, a szakító-nyírószilárdság $(22,7 \pm 4,0)$ MPa-ról $(30,0 \pm 0,9)$ MPa-ra nő, fokozatosan csökkenő szórással, ami a középérték kb. 24 %-os javulásának felel meg. A 11 s-os "küszöböt" átlépve ismét hirtelen változás következik be: 12 s-nál a szakító-nyírószilárdság $(21,3 \pm 3,6)$ MPa értékre csökken vissza. 11 s-ig tartó besugárzási idő után a szakító-nyírószilárdság értékek 22-23 MPa körül szórnak, nagy hibával. A DC01-es minták esetén az besugárzási időküszöb 5 s volt. Addig növekedett a minta szakító-nyírószilárdsága $(10 \pm 5,1)$ MPa-ról $(22,5 \pm 0,9)$ MPa-ra, majd az után 20 MPa körül szórt, nagyobb hibával. Tehát mindkét lemezanyagra hasonló viselkedést figyeltünk meg, természetesen különböző abszolút értékek mellett, amelyeket a lemezanyag jellemzői meghatározzák [A1, A2].

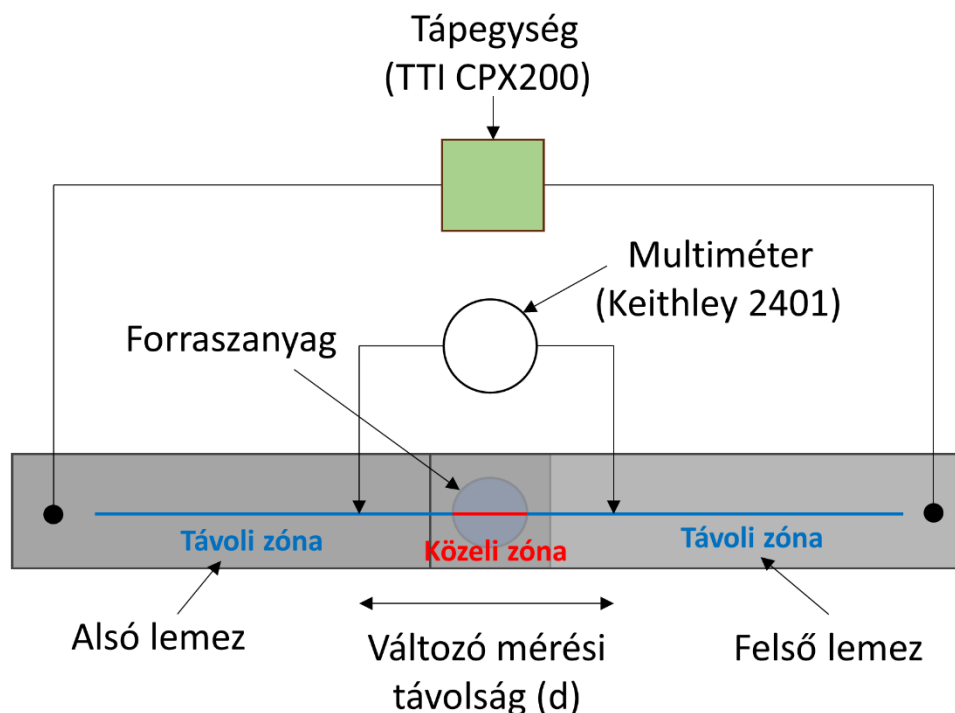
T1.4. *Az 4.1.3.2 és 4.1.3.3 alfejezetekben leírt, rögzített besugárzási idők mellett az alkalmazott lézerteljesítményt, illetve állandó lézerteljesítmény mellett a besugárzási időket változtatva elért eredményeimet összefoglalva: feltérképeztem a lézerforrasztott Hilumin[®] és DC01 lemezpárok elektromos ellenállásának és szakító-nyíró szilárdságának e két folyamatparamétertől való függését. Kísérletileg igazoltam, hogy mind a teljesítmény, mind a besugárzási idő növelése javítja a kötés elektromos és mechanikai tulajdonságait, illetve csökkenti azok szórását, mindaddig, amíg az adott teljesítmény-besugárzási idő páros nem eredményezi a felső lemez megolvadását. Megállapítottam, hogy ezen olvadási küszöbhez tartozó energianál nagyobb energiájú megmunkálás esetén a kötés mindkét tulajdonsága ugrásszerűen romlik, és mind az elektromos ellenállás, mind pedig a szakító-nyíró szilárdság szórása megnő. [A1, A2]*

IV.2. Egy új közelítés a kötés elektromos viselkedésének leírására: mérés és modellezés

IV.2.1. A kötések elektromos viselkedése: mérés

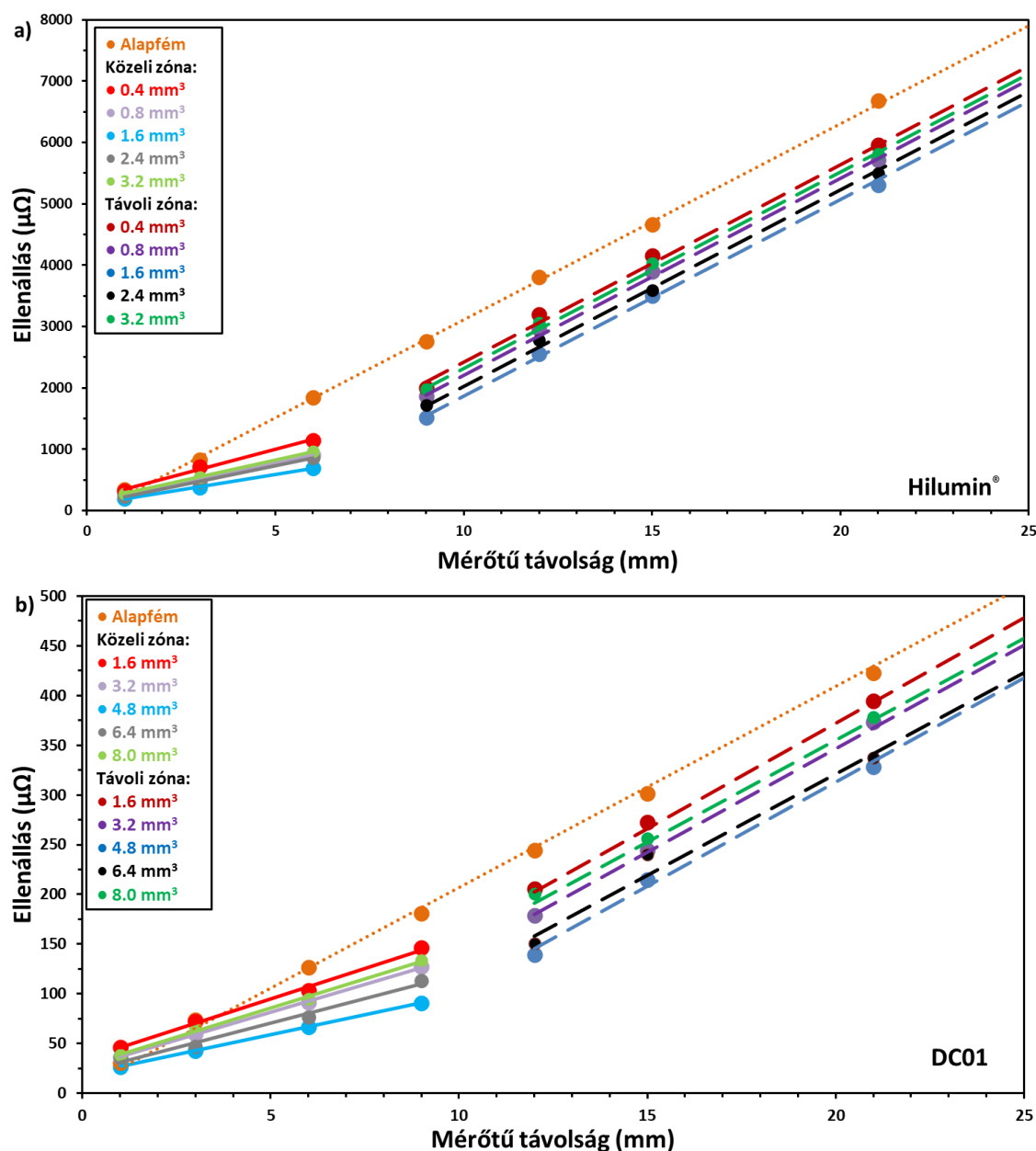
A kötés ellenállásának a minta teljes ellenállására gyakorolt hatásának megfigyelésére alapos vizsgálatra volt szükség, hiszen a teljes ellenállás részben a lemezellenállásokból, részben pedig a forrasz ellenállásából tevődik össze. Ehhez az ellenállás (R) változását a két feszültség mérőtű közötti térbeli távolság függvényében követtük nyomon (a továbbiakban: mérőtű távolság, d), az eddig használt egy 21 mm-en rögzített mérőtű távolság használata helyett. Majd megnéztük ezen görbék milyen információt adnak a rendszer (eredő) ellenállását adó komponensek ellenállásairól.

A mért $R(d)$ görbék már ránézésre mutatják, hogy két különböző viselkedésű tartomány különíthető el (lásd az 52. ábra), attól függően, hogy a feszültségmérő tűk egymáshoz közel, vagy távol voltak. Szintén általános megfigyelés, hogy az ellenállás mindkét zónában leírható volt egy lineáris függvénnyel, amelyek paraméterei (meredeksége és tengelymetszete) azonban eltérnek a kis és nagy mérőtű távolságoknál. Az egyenes meredeksége és tengelymetszete szintén függenek olyan kísérleti körülményektől is, mint pl. a forraszanyag mennyisége. A két zóna határa jól korrelál a kötési terület szélével, azaz azzal a peremmel, amelyen belül a kötendő lemezek szétválasztása után viasszilárdult forraszanyagot találtunk a lemezekben. A távoli zónában (az 52. ábra kék vonalakkal jelölve) a mérőtűk a kötési terület átmérőjénél nagyobb távolságban helyezkedtek el, míg a közeli zóna (az 52. ábra piros vonallal jelölve) esetén a d mérőtű távolság kisebb volt a kötési terület átmérőjénél.



52. ábra: Közeli- és távoli zóna a mérési elrendezésben

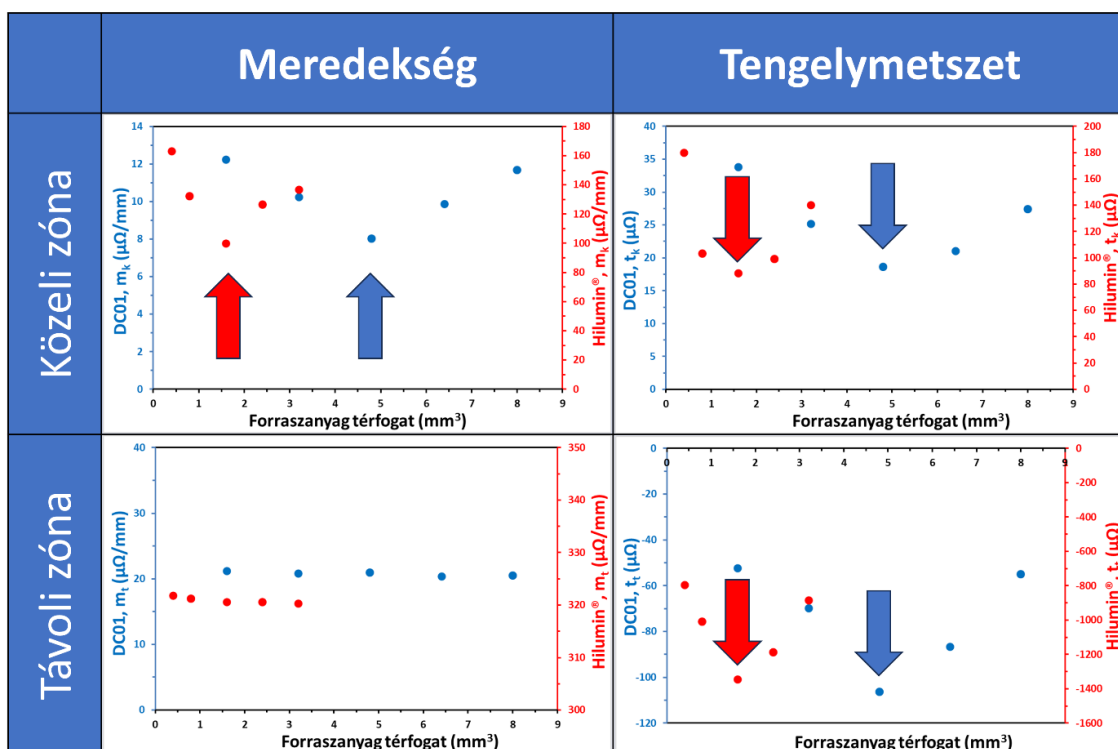
Az 53. ábrán a közeli és a távoli zónát folytonos és szaggatott vonalakkal különböztettem meg. A Hilumin® és DC01 kötések esetében a mért teljes ellenállás a feszültségmérő tűk távolságának függvényében több különböző forrasztanyagtérfogat mennyiség mellett látható az 53.a) és az 53.b) ábrán. A DC01 minták 120 W lézerteljesítménnyel 5 s besugárzási idő mellett, míg a Hilumin® minták 80 W lézerteljesítménnyel és 5 s besugárzási idő mellett készültek. Az ábrán – narancssárga színnel – feltüntettem a lemezanyagon mért ellenállásokat is, amikor is egyetlen lemez (azaz forrasztás nélküli) ellenállását mértem a tűtávolság függvényében.



53. ábra: Lézerforrasztott minták ellenállása a feszültségmérő tűk távolságának függvényében különböző mennyiségű forrasztanyagok esetén a) Hilumin® és b) DC01 lemezpárok esetében [A3].

Mindkét lemezanyagból készült sorozat hasonló tendenciákat mutat, ezért a tendenciákat a DC01 sorozat példáján mutatom be. A sorozat összes forrasztott mintájára igaz, hogy a lézerforrasztott minták ellenállása következetesen alacsonyabb, mint az alapfémé. Szintén jól látható az $R(d)$ görbék eltérő viselkedése a közeli és távoli zónákban. Mindkét zónán belül közel lineáris korreláció figyelhető meg az ellenállás és a feszültségmérő tűk távolsága között. Ez a linearitás a felhasznált forrasztóanyag mennyiségétől függetlenül fennáll. Továbbá minden $R(d)$ görbe megtörik 9 és 12 mm (DC01), illetve 6 és 9 mm (Hilumin[®]) között. Ezek a töréspontok a tényleges forrasztott kötési területhez hozzárendelhető átmérővel korrelálnak. Mindazonáltal lineáris függvények meredeksége és tengelymetszetei az alkalmazott forrasztóanyag mennyiségétől (térfogatától) függő mennyiségek, amint az az 54. ábrán látható. Megfigyelhető, hogy a forrasztóanyag térfogatától való függések nem követnek monoton trendet, hanem ezek a görbék kezdetben (kisebb forrasztóanyagmennyiségeknél) egyre távolodnak az alapfém $R(d)$ egyenesétől, azaz a forrasztóanyag mennyiségének növelésével egyre kisebb tengelymetszettel jellemezhetőek. Majd ez a tendencia az optimális forrasztóanyag-mennyiség elérése (az ábrán nyilakkal jelölve) után megfordul. Ez a viselkedés teljesen összhangban van a visszadermedt forrasztóanyag morfológiai változásával (ld. IV.1.2.3. alfejezet). Nevezetesen, hogy minden lézerteljesítmény - besugárzási idő párhoz létezik egy optimális forrasztóanyagmennyiség, ahol a forrasztóanyag teljesen megolvad, és olyan kötést eredményez, amely a leghomogénebb visszadermedt forrasztóanyagot adja, azaz amely a legkevesebb buborékkal és/vagy szilárd maradvánnyal rendelkezik. Ez az optimum 4,8 mm³ DC01 és 1,6 mm³ Hilumin[®] minták esetén, az alkalmazott lézer paraméterek mellett. Bár a tendenciák egybeesnek, a DC01 és a Hilumin[®] sorozat elektromos viselkedését leíró egyenesek paramétereinek értéke eltérő.

Összefoglalva: a mért ellenállás – mérési távolság függvények viselkedése alapján közeli és távoli zónákat különböztettem meg. Megmutattam, hogy ezek határát a kötési terület széle jelöli ki. Az ellenállás távolságfüggését mindkét zónában lineáris függvények írják le. Az egyenesek meredekségei a közeli zónában és a tengelymetszetek mindkét zónában érzékenyen változnak a forrasztóanyag mennyiségével, ami viszont nincs hatással a távoli zónabeli meredekségekre sem a Hilumin[®], sem a DC01 lemezpárok esetén. Ez azt jelzi, hogy míg az első három mennyiség a kötéshez kapcsolható, a távoli zónabeli meredekség a lemez anyagi minőségét jellemzi. Az, hogy a kötéshez kapcsolható három mennyiség hogyan változik a forrasztóanyag térfogatának függvényében, teljes összhangban van az 1.1. tézispontban leírt morfológiai képpel. [A3]

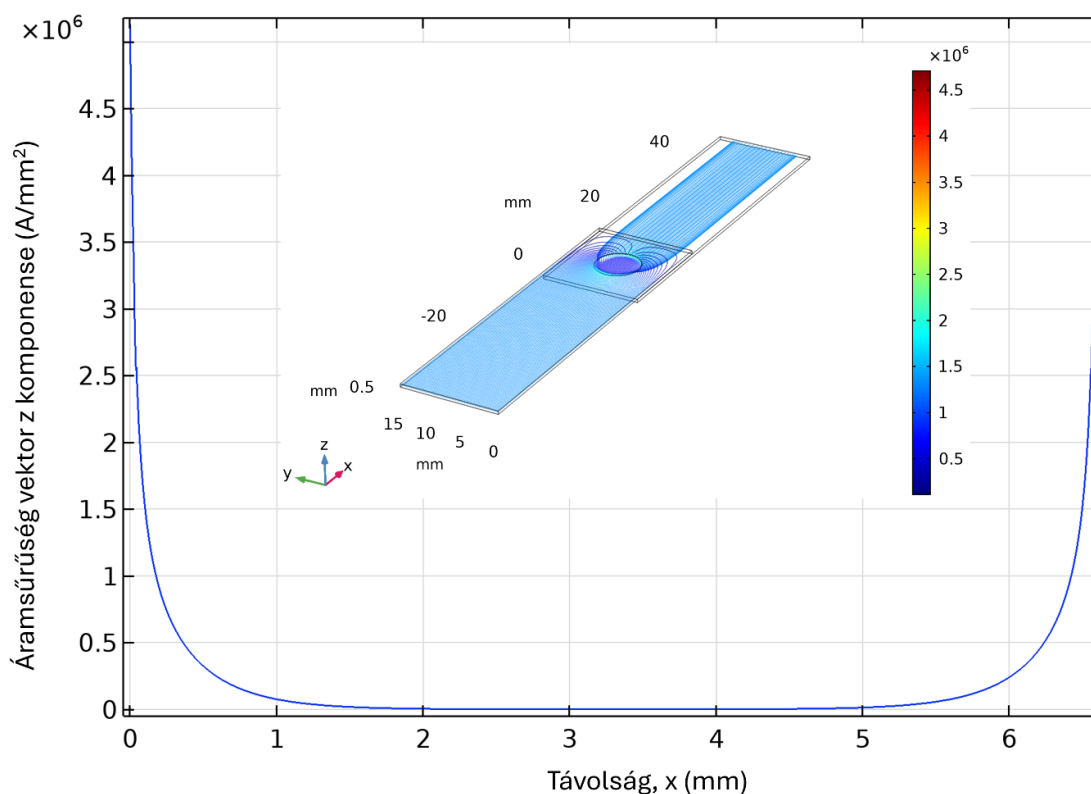


54. ábra: Az $R(d)$ egyenesek meredekségei és tengelymetszetei a távoli és közeli zónában a forraszanyag térfogatának függvényében a DC01 (kék) és Hilumin® (piros) lemezek kötése esetén. A nyilak az optimális forraszanyag-térfogatokat jelzik [A3].

T2.2. Összefoglalva: a mért ellenállás – mérési távolság függvények viselkedése alapján közeli és távoli zónákat különböztettem meg. Megmutattam, hogy ezek határát a kötési terület széle jelöli ki. Az ellenállás távolságfüggését mindkét zónában lineáris függvények írják le. Az egyenesek meredekségei a közeli zónában és a tengelymetszetek mindkét zónában érzékenyen változnak a forraszanyag mennyiségével, ami viszont nincs hatással a távoli zónabeli meredekségekre sem a Hilumin®, sem a DC01 lemezpárok esetén. Ez azt jelzi, hogy míg az első három mennyiség a kötéshez kapcsolható, a távoli zónabeli meredekség a lemez anyagi minőségét jellemzi. Az, hogy a kötéshez kapcsolható három mennyiség hogyan változik a forraszanyag térfogatának függvényében, teljes összhangban van az T1.1 tézispontban leírt morfológiai képpel. [A3]

IV.2.2. Az elektromos viselkedés modellezése

A numerikus szimulációk értékes eszközt jelentenek az összetett jelenségek tanulmányozásához és a rendszerek viselkedését eredményező folyamatok megértéséhez. Különösen igaz ez akkor, ha a kísérleti vizsgálatok kihívásba ütköznek. Ezért az anyagtulajdonságok és a forraszanyag geometriája hatásának átfogó vizsgálatához egy háromdimenziós végelelemes modellt fejlesztettem ki COMSOL Multiphysics® környezetben.

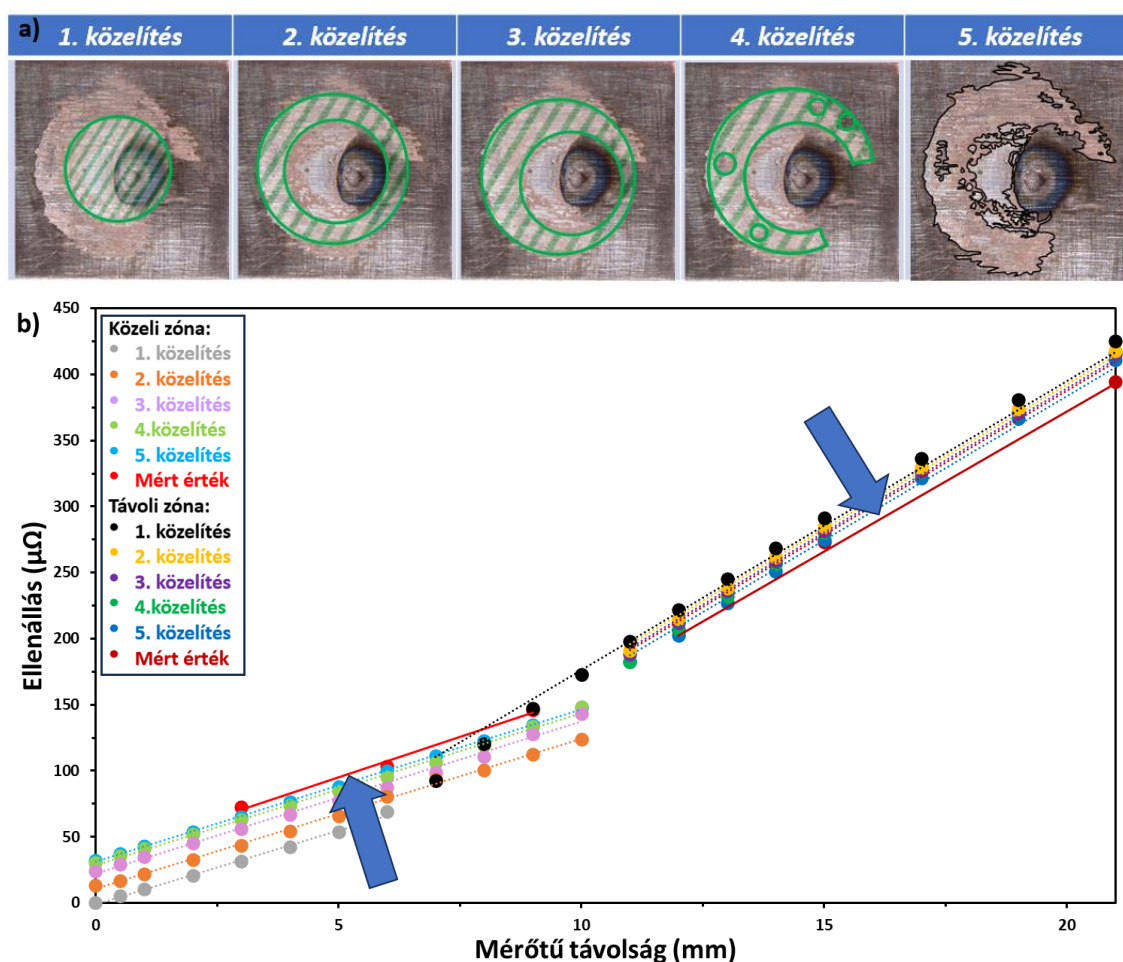


55. ábra: Az áramsűrűség-vektorok z komponense a forraszanyagban $y=7,5$ mm-es és $z=0,53$ mm-es metszetben. A beillesztett ábrán az áramsűrűség vektorok láthatóak a teljes mintán.

A modell érvényességének ellenőrzéséhez először az áramsűrűség-vektorok eloszlását határoztam meg a kötési területen belül egy tökéletes, homogén korong geometriájú forraszanyag modell esetén. A háromdimenziós COMSOL modellből kiderült, hogy az áram kb. 97%-a teljes kötési terület átmérőjének legkülső 10%-os részén folyik át (55. ábra). Ez a viselkedés összhangban van Brand és m társai eredményeivel, akik a forrasztott kötések egy egyszerűsített, *ellenálláshálózat*nak nevezett egyenértékű áramkörrel modellezve analitikusan, két dimenzióban számoltak ki [101].

A következőkben a visszaszilárdult forraszanyag $1,6 \text{ mm}^3$ térfogatú forraszanyag alakját négy lépésben közelítettem a mikroszkópos vizsgálatok során megfigyelt „valódi” alakhoz, és vizsgáltam az alak hatását a kötés szimulátelektromos ellenállására, úgy, hogy közben az effektív kötési területet állandóan tartottam. A négy közelítési lépés a következő volt: hengeres forraszanyag (1. közelítés), hengeres forraszanyag egy nagy – szimmetrikusan elhelyezett – lyukkal (2. közelítés), hengeres forraszanyag egy nagy lyukkal aszimmetrikus helyzetben (3. közelítés), és hengeres forraszanyag egy nagy és több kisebb aszimmetrikus lyukkal (4. közelítés) volt. Utolsó lépésben pedig egy konkrét kötés pontos geometriáját másoltam le 3D-ben egy CAD program segítségével az elszakított felületről készült optikai mikroszkópos kép alapján (5. közelítés). Ezt az öt modellt az 56.a) ábra, a segítségükkel szimulált $R(d)$ görbéket pedig az 56.b) ábra mutatja. Ezek a numerikus szimulációk az ellenállásnak a feszültségmérő tűk távolságától való lineáris függését visszaigazolják (összhangban az

56. ábrán bemutatott kísérleti viselkedéssel) mind a közeli, mind a távoli zónában. Az is látható, hogy minden $R(d)$ görbe 11 mm körül törik meg (kivéve az 1. megközelítésnél, ahol az átmérő 6,6 mm volt), ami megegyezik a forrasztanyag leírására használt határoló henger pontos átmérőjével. A mért és a szimulált $R(d)$ görbék között azonban eltérés is van: a számított R értékek kisebbek a mért értékeknél a közeli és nagyobbak a távoli zónában. Továbbá a visszasilárdult forrasztanyag geometriai hűségének finomítása (az 1-5. közelítésen keresztül) olyan szimulált ellenállás értékeket eredményez, amelyek alulról közelítik meg a mért ellenállás értékeket a közeli (folytonos vonalakkal ábrázolva), és felülről a távoli zónában (kék nyilakkal jelölve). A közelítések a közeli zónában nagyobb ellenálláskülönbségeket eredményeztek, mint a távoli zónában. Az is látszik, hogy a közeli és távoli zónákra jellemző tendenciák nem függenek a forrasztanyag geometriájától, azonban a geometria szerepe kulcsfontosságú az ellenállásértékek meghatározásának pontosságában.



56. ábra: a) a vissza-szilárdult forrasztanyag valós geometriájának öt különböző közelítésének szemléltetése, és b) a közelítések eredménye a mért adatsorral összehasonlítva (folytonos vonalak) [A3].

A közelítő modellekkel végzett numerikus szimulációk további finomításával azt is felismertem, hogy a forrasztanyag következő öt geometriai tulajdonsága szintén befolyásolja a rendszer elektromos viselkedését: a két lemez közötti, visszasilárdult forrasztanyag vastagsága ($t_{forrasz}$), az effektív kötési terület nagysága (A_{eff}), a lyukak

összterülete (A_{lyuk}), a teljes kötési terület nagysága (A_{teljes}), amely az effektív kötési és a lyukak területének összege, és végül a lyukak elhelyezkedése a teljes forrasztott területen belül. A következőkben ennek az öt paraméternek a közeli és távoli zónák $R(d)$ egyenesei paramétereire gyakorolt hatását mutatom be a két DC01 lemez 1,6 mm³ térfogatú forrasztóanyaggal történő összekötése esetén. Azért ezt az esetet választottam példának, mert a különböző térfogatú forrasztóanyaggal készült minták közül ez tartalmazza a legtöbb lyukat, ezért ez a legalkalmasabb a lyukak területének és eloszlásuk hatásának modellezésére. Ezen paraméterek hatásának meghatározására öt különböző esetet modelleztem:

- I. eset: A visszaszilárdult forrasztóanyag vastagságát változtattam, miközben a forrasztóanyag térfogatát állandónak tartottam ($t_{forraszt} = \text{változott}$, $V_{forraszt} = \text{állandó}$).
- II. eset: Az effektív kötési területet változtattam a lyukak jelenléte nélkül ($A_{eff} = \text{változott}$, $A_{lyuk} = 0$, $t_{forraszt} = \text{állandó}$).
- III. eset: A teljes kötési területet állandó értéken tartottam, míg az effektív kötési- és a lyukak területeinek arányát változtattam ($A_{teljes} = A_{eff} + A_{lyuk} = \text{állandó}$, $A_{lyuk}/A_{teljes} = \text{változó}$, $t_{forraszt} = \text{állandó}$).
- IV. eset: Az effektív kötési területet rögzítettem, míg a lyukak területét változtattam, ami egyébként a teljes kötési terület változását eredményezte ($A_{lyuk} = \text{változott}$, $A_{teljes} = \text{változott}$, $A_{eff} = \text{állandó}$, $t_{forraszt} = \text{állandó}$).
- V. eset: A lyukak térbeli eloszlását, azaz azok pozícióját változtattam a teljes kötési területen belül ($A_{teljes} = \text{állandó}$, $A_{lyuk} = \text{állandó}$, $t_{forraszt} = \text{állandó}$, $pos_{lyuk} = \text{változó}$).

IV.2.3. A forrasztott kötés jellemzőinek hatása az $R(d)$ függvényre

Annak érdekében, hogy meghatározzam a forrasztott kötések paramétereinek hatását az $R(d)$ függvények jellemzőire, a szimulált paramétereket -50% és +50% között változtattam az egyes paraméterek mért értékéhez képest (kivéve a V. esetet, hiszen ott az nem volt lehetséges). A 6. táblázat összefoglalja a forrasztott kötés minden egyes paraméterének kísérletileg mért értékét, valamint a hozzá tartozó szimulációs tartományt.

A szimulációs eredmények kiértékelésére a továbbiakban a százalékban kifejezett paraméterek minimumainak és maximumainak relatív változását használok, a következő egyenlet segítségével:

$$\delta = \frac{X_{max} - X_{min}}{X_{max}}, \quad (6)$$

ahol X a meredekségeket (m_t , m_k) vagy a metszéspontokat (t_t , t_k) jelöli a távoli és a közeli zónában. A relatív változáshoz hozzárendelt negatív vagy pozitív előjel azt jelzi, hogy amikor a szimulált paramétert (a mért érték -50%-áról +50%-ára) növeljük, a számított meredekségek távolodnak, vagy közelednek a mért értékhez.

Eset	Változtatott paraméter	Mért érték	Szimulált tartomány
I.	$t_{forrasz} [mm]$	0,047	0,023-0,070
II.	$A_{eff} [mm^2]$	34,212	17,106-51,318
III.	A_{lyuk}/A_{teljes}	0,630	0,315-0,945
IV.	$A_{teljes} [mm^2]$	91,562	45,781-137,343
V.	$pos_{lyuk} [mm]$	6,900	7,500-6,370

6. táblázat: A lézerrel forrasztott minta geometriai jellemzőit leíró öt paraméter mért értékei és szimulációs tartományai (kísérleti paraméterek: 120 W lézerteljesítmény, 5 s besugárzási idő, 1,6 mm³ forrasztanyag-térfogat).

A paraméterek változtatása minden egyes esetben monoton lineáris változást eredményezett. Így az ellenállás $R(d)$ távolságfüggése egy olyan lineáris függvény, amelyet a következő formában írunk le mind a közeli, mind a távoli zónára:

$$R_i(d) = m_i \cdot d + t_i, \quad (7)$$

ahol m_i az egyenes meredekségét, míg t_i tengelymetszetét jelöli. Az i index pedig t a távoli és k a közeli zóna esetében. A következőkben először a végeelem szimulációk révén a közeli, majd a távoli zónában megfigyelt viselkedéseket mutatom be az I.-V. esetekben.

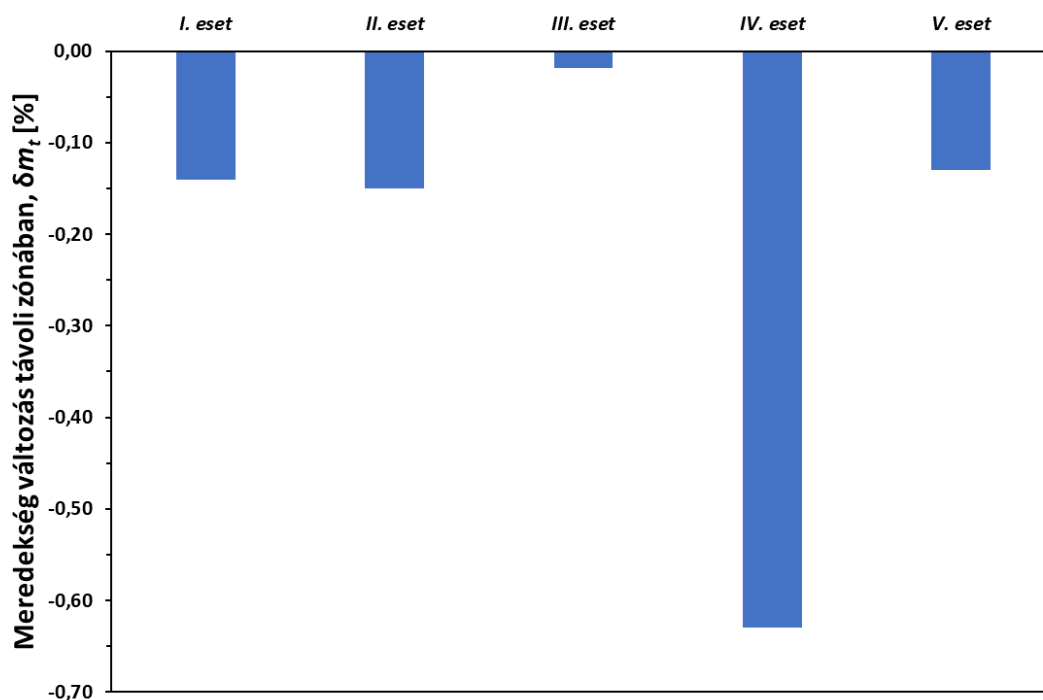
IV.2.3.1. Távoli zóna

A meredekségek relatív változását a távoli zónában az öt esetre az 57. ábra mutatja. Az, hogy a relatív változások relatíve alacsonyok (minden esetben 0,65%-nál kisebbek), azt mutatja, hogy a változtatott paraméterek egyike sem befolyásolja jelentősen a meredekséget a távoli zónában.

Korábban arra a következtetésre jutottunk az 54. ábra szerint, hogy a mért meredekség a távoli zónában minden forrasztanyagmennyiség esetén azonos, de a *DC01* és a *Hilumin*[®] minták között eltér. Emellett azt is megfigyeltük, hogy erre a mennyiségre nincs hatással az alkalmazott forrasztanyagmennyisége. Ezek a megfigyelések jól magyarázhatóak azzal, hogy a távoli zóna meredekségét a forrasztandó lemezek anyagának elektromos viselkedése határozza meg. Algebrai úton megmutatható, hogy:

$$m_{meas.} = \frac{R(d)}{d} = \frac{\rho_{lemez}}{A_{lemez}}, \quad (8)$$

ahol ρ_{lemez} a lemez fajlagos ellenállása, A_{lemez} a lemez áramirányra merőleges keresztmetszete.



57. ábra: A forrasztott kötés öt geometriai tulajdonsága $\pm 50\%$ -os változtatásának szimulált hatása a távoli zóna merekségére [A3].

Amint azt a 7. táblázatban megmutatom, különböző lemezpárok esetén a keresztmetszetek és az $R(d)$ egyenesek mért merekségei alapján meghatározott fajlagos ellenállás értékek szoros korrelációt mutatnak az irodalomban közölt értékekkel. Ebből arra következtettem, hogy az $R(d)$ görbék merekség a távoli zónában a kötendő lemez anyagának fajlagos ellenállásából és a lemez keresztmetszetéből a (8) egyenletnek megfelelően számolható.

Anyag	Vastagság (mm)	Mért merekség ($\mu\Omega/\text{mm}$)	Fajlagos ellenállás ($\mu\Omega$)	
			Számolt	Irodalmi érték [63, 150, 151]
DC01 acél	0.5	20.259	$1.62 \cdot 10^{-7}$	$1.60 \cdot 10^{-7}$
Rozsdamentes acél	0.5	22.543	$1.80 \cdot 10^{-7}$	$1.00\text{--}7.20 \cdot 10^{-7}$
Alumínium (99%)	1	1.717	$2.74 \cdot 10^{-7}$	$2.65 \cdot 10^{-7}$
Réz ötvözet (bronz)	1	4.144	$6.63 \cdot 10^{-7}$	$6.00\text{--}9.00 \cdot 10^{-7}$

7. táblázat: Az $R(d)$ görbék mereksége a távoli zónában a kötendő lemezek fajlagos ellenállásával korrelál [A3].

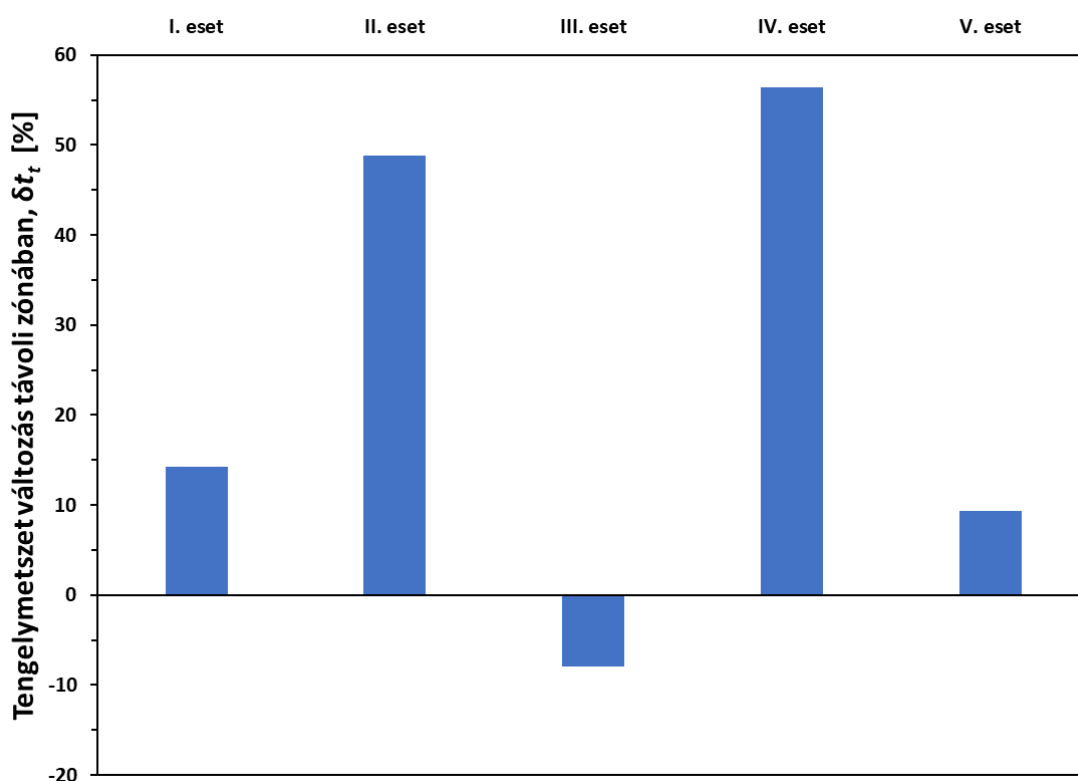
Ellenőriztem a lemezek keresztmetszetének hatását a távoli zóna $R(d)$ függvényeinek merekségére is. Ha a lemez szélességét megfelezttem, akkor a merekség kétszeresére nőtt. Ezért a távoli zónában a merekség, m_t a következő

képlettel írható le:

$$m_t = \rho_{DC01}/A_{DC01}, \quad (9)$$

ahol ρ_{DC01} a lemez anyagának fajlagos ellenállása, A_{DC01} pedig az összekötendő fémlemezek áramirányra merőleges keresztmetszete. Így végső konklúzióként megállapítottam, hogy a távoli zónában a meredekséget a kötendő lemezanyag fajlagos ellenállása és keresztmetszete határozza meg az (9) egyenlet szerint.

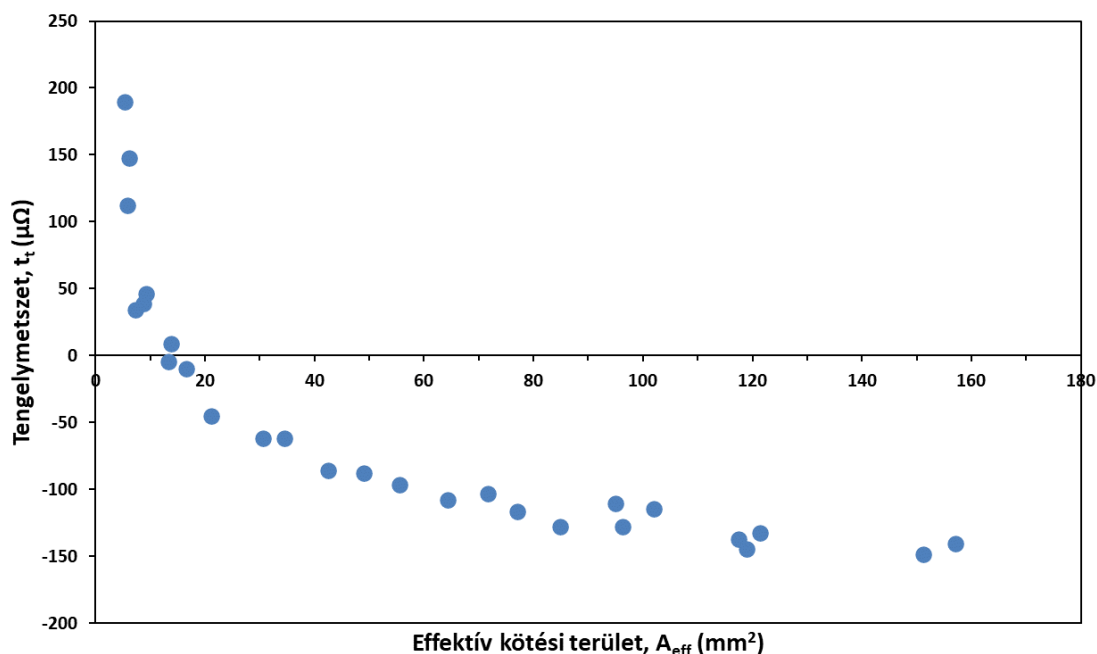
A szimulációknak a távoli zónában a tengelymetszetek viselkedésére vonatkozó, relatív változásokban kifejezett eredményeit az 58. ábrán mutatom be.



58. ábra: A forrasztott kötések öt geometriai tulajdonsága $\pm 50\%$ -os változtatásának hatása az $R(d)$ tengelymetszeteire a távoli zónában [A3].

A változások mértékének összehasonlításából látható, hogy a tengelymetszeteket a távoli zónában legmarkánsabban az effektív (*II. eset*) és a teljes kötési terület (*IV. eset*) határozza meg. E két paraméter ötször nagyobb hatással van a tengelymetszetre, mint a másik három paraméter bármelyike. A lemez és a lézerforrasztott minták 21 mm -en mért ellenállása közötti különbségekből számított tengelymetszetek az effektív kötési terület függvényében láthatók az 59. ábrán. A tengelymetszetek az effektív kötési terület növelésével csökkennek, és kb. 15 mm^2 kötési területnél megváltozik az előjelük. A csökkenés mértéke a $0\text{--}25\text{ mm}^2$ -es tartományon belül a legjelentősebb, a függvény 60 mm^2 felett ellaposodik, végül fokozatosan tart a kb. $-150\text{ }\mu\Omega$ tengelymetszet értékhez. Ezek az eredmények a modellszámításokkal összhangban az effektív kötési területtől való reciprok függést mutatnak, $(0,65\pm0,03)$ -as exponenssel, egészen annak ellaposodásáig:

$$t_t \approx A_{eff}^{-0.65}. \quad (10)$$



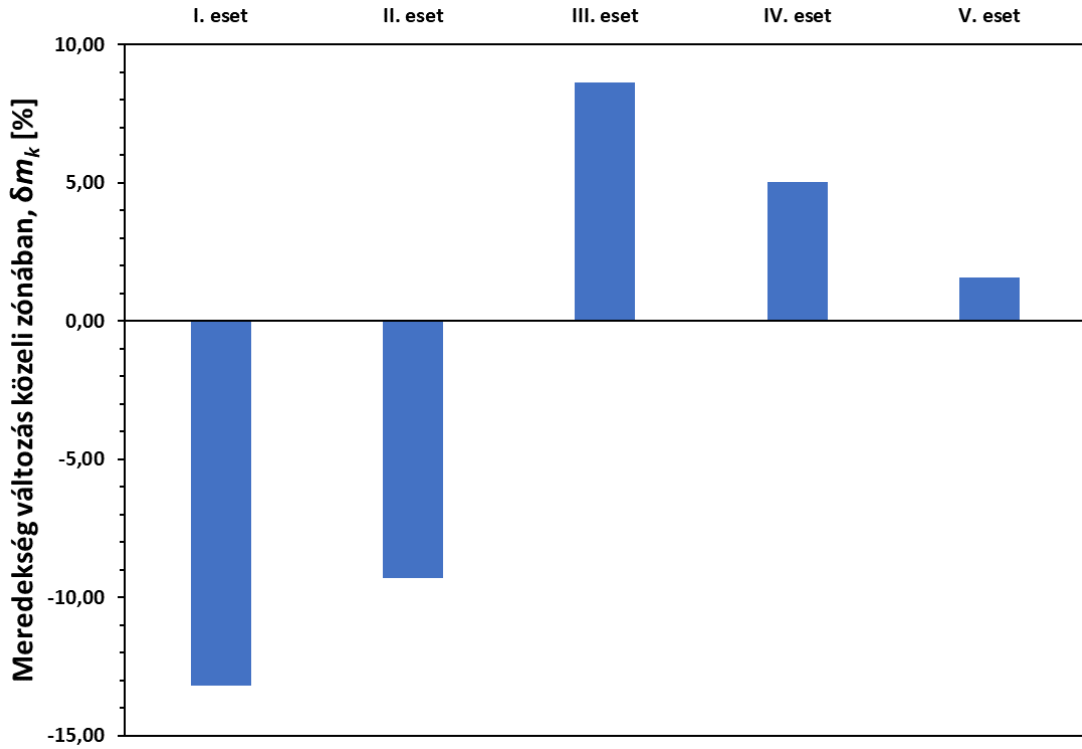
59. ábra: A mért $R(d)$ függvény tengelymetszetei különböző minták esetén a távoli zónában az effektív kötési terület függvényében (a feszültségsonda távolsága ebben az esetben 21 mm) [A3].

A lyukak térfogatának növelése (*III. eset*) ellentétes hatással van a tengelymetszetre, mivel az növeli a kötés ellenállását, amint azt már kísérletileg kimutattam a IV.1.2.3.fejezetben. Ez a tengelymetszet negatív relatív változásaként jelenik meg az 58. ábrán. A két fentebb részletezett hatás, amelyből egyébként az effektív kötési terület (*II. eset*) dominál, a teljes kötési terület (*IV. eset*) hatásában egyesül.

IV.2.3.2. Közeli zóna

Annak érdekében, hogy meghatározzam a visszaszilárdult forrasztanyag öt geometriai tulajdonságának hatását a közeli zóna meredekségére, a szimuláció során a paramétereket a távoli zónában már bemutatott módon változtattam. Az öt esetben megfigyelt relatív hatásokat a 60. ábra összegzi.

A közeli zónában a visszaszilárdult forrasztanyag minden egyes tulajdonságának megváltoztatása legalább egy nagyságrenddel nagyobb változást okozott, mint a távoli zónában. A vizsgált öt paraméter közül a lyuk terület (*III. eset*) pozitív (azaz közelebb kerül a mérték értékhez), a vastagság (*I. eset*) és az effektív kötési terület (*II. eset*) negatív módon (azaz távolabb kerül a mérték értéktől) befolyásolja a meredekséget. Ezek a változások azt jelentik, hogy a forrasztanyag hozzáadása alacsonyabb, míg a lyukak térfogata összességében magasabb ellenállást eredményez a közeli zónában.



60. ábra: A forrasztott kötés öt geometriai tulajdonságának $\pm 50\%$ -os változtatásának hatása az R(d) függvény meredekségére a közeli zónában [A3].

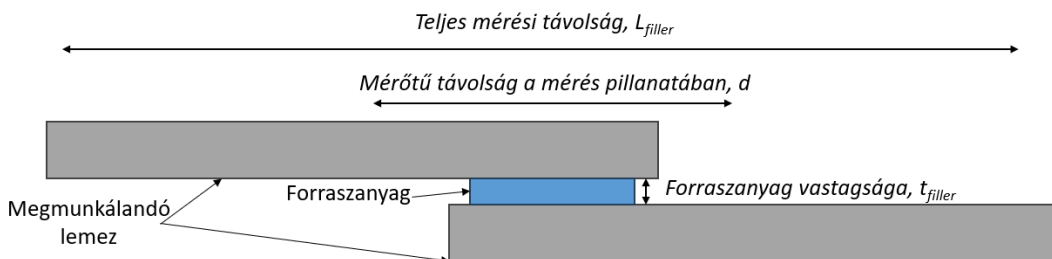
Ha párhuzamos kapcsolást feltételezünk a két lemez és a forrasztóanyag között [101], akkor:

$$m_k \approx \left(\frac{A_{DC01}}{c_1 \cdot \rho_{DC01}} + \frac{A_{eff}}{c_2 \cdot \rho_{forrasztó}} \right)^{-1}, \quad (11)$$

ahol $\rho_{forrasztó}$ a forrasztóanyag fajlagos ellenállása, c_1 a lemezek és c_2 a forrasztóanyag geometriájával összefüggő együtthatók (lásd 61. ábra):

$$c_1 \approx (L_{filler} - t_{filler}) - (L_{filler} - d) = d - t_{filler} \quad (12)$$

$$\text{és } c_2 \approx t_{filler}. \quad (13)$$

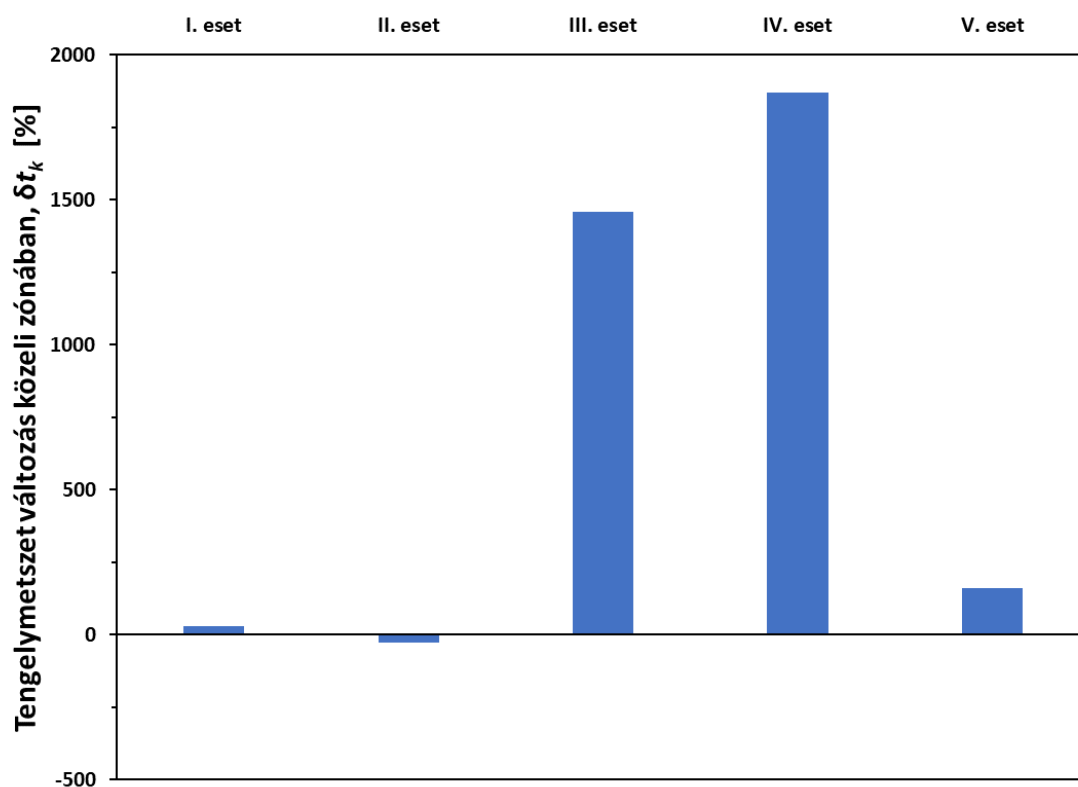


61. ábra: A kötés vázlata a c_1 és c_2 együtthatókat meghatározó mennyiségekkel

Bár formailag hasonló a távoli zónában érvényes (9) egyenlethez, a meredekségnek ez a (11) egyenlet szerinti meghatározása univerzálisabb, mivel egyesíti mind a fémlamezek, mind a forrasztóanyag hozzájárulását. A távoli zónában a

feszültségmérő tűk távolsága, d sokkal nagyobb, mint a forraszanyag vastagsága. Ebből adódóan $c_1 > c_2$, azaz a (11) egyenletben a meredekséget leíró második kifejezés elhanyagolható. Ezért a (11) egyenlet a meredekség általános definíciójának tekinthető, amely a közeli és a távoli zónára egyaránt érvényes, és a távoli zónában az (9) egyenletté egyszerűsödik.

A visszasilárdult forraszanyag geometriája öt releváns tulajdonságának a közeli zóna tengelymetszetére gyakorolt hatását 62. ábrán mutatom be.

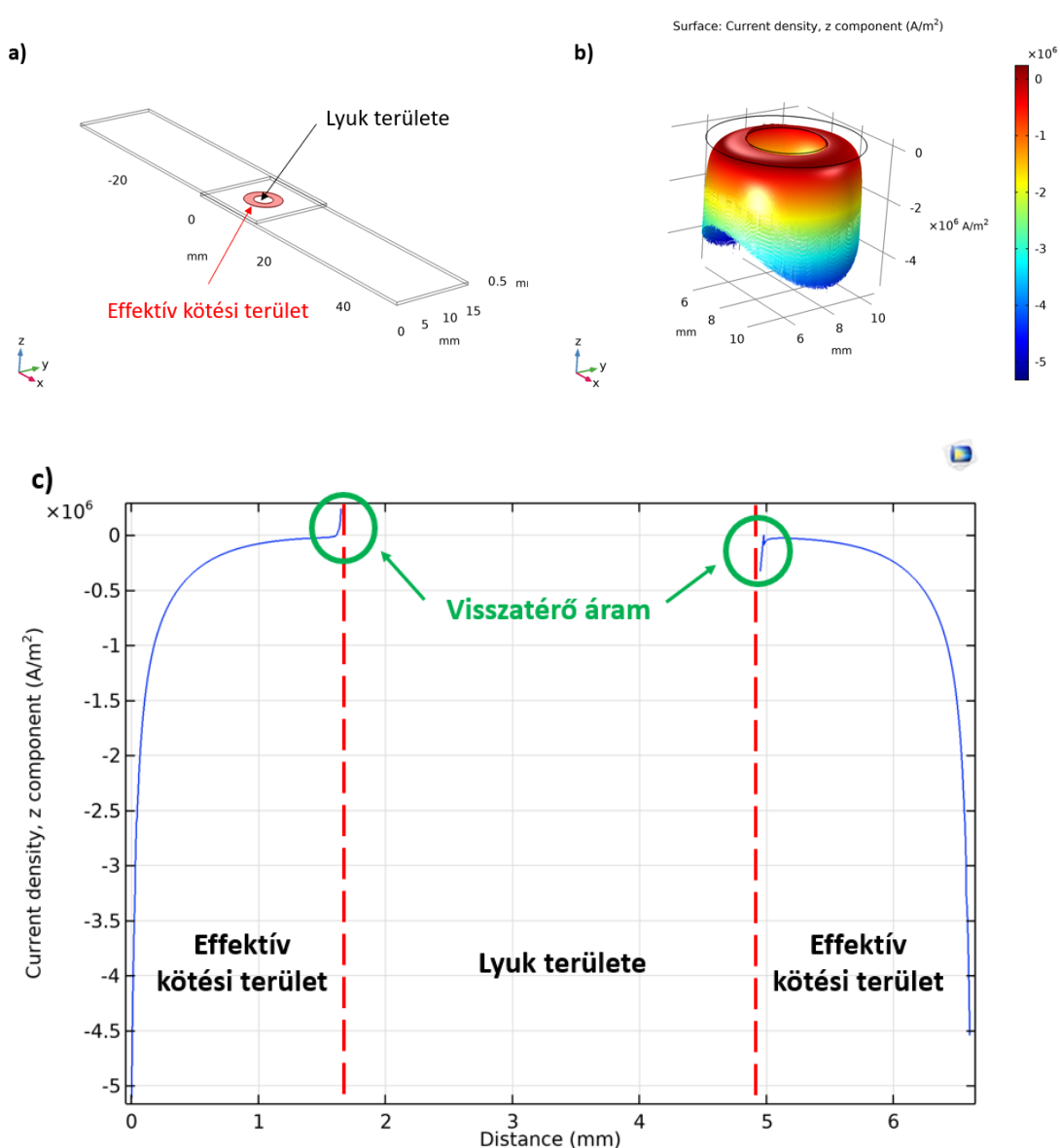


62. ábra: A forrasztott kötés öt geometriai tulajdonságának hatása a közeli zóna tengelymetszetére, ha a tulajdonságokat a mért adatokhoz képest $\pm 50\%$ -kal változtatjuk [A3].

A modellszámítások az *I.* és *II. esetben* nullához közeli metszéspontokat adnak, mivel ott a lyukak jelenlétét nem vesszük figyelembe, azaz $A_{void}=0$. Mivel ezekben az esetekben mind a minimumok, mind a maximumok kis abszolút számok, az *I.* és *II. esetben* a relatív változások is kicsik. A lyukak megjelenése a közeli zónában hatalmas változást okoz az $R(d)$ tengelymetszeteiben. A *III.* és *IV. esetben* a nagy maximumok közel nulla minimumokkal együtt a 62. ábrán látható relatív „nagy” változásokat eredményezik. A szimuláció során az áramvonalak vizsgálata megmagyarázta a forraszanyagon belüli lyukak jelenlétének óriási hatását, hiszen megfigyelhető volt, hogy minden egyes lyuk „visszatérő áram” forrásaként működik. A lyukak közelében a „visszatérő áram” hozzájárul az áram útjának meghosszabbodásához, ami az elektronoknak mind az acéllemezekkel, mind a forraszanyaggal való hosszabb kölcsönhatásához vezet. Következésképpen ellenállás növekedést tapasztalunk, ami jelentősen befolyásolja a mért ellenállás-mérési távolság viszonyt a közeli zónában.

Figyelemre méltó, hogy állandó lyuk mennyiség és eloszlás mellett az áramutak „meghosszabbodása” állandó marad, ezáltal független a mérési távolságtól (d). Az $R(d)$ függvény összefüggésében ez a jelenség tehát inkább a tengelymetszetet, mint a meredekséget befolyásolja. Ezt a hatást egyetlen lyuk környezetében a 63. ábrán szemléltetem. Az a) rész a modellt, míg a b) ábra az áramsűrűségvektor normáit, azaz nagyságát mutatja a forraszanyag réteg középső síkjában. A 63. ábrán, zöld körrel kiemelten, a visszatérő áramhoz tartozó áramsűrűség-értékek láthatóak a piros függőleges szaggatott vonallal jelzett lyuk kerülete mentén. A szimulált eredményekből következik, hogy a közeli zónában a lyuk területének függése a következő módon írható le:

$$i_n \approx A_{void}, \quad (14)$$



63. ábra: a) A piros gyűrűvel jelölt kötési terület és a lyuk helyzete. b) A visszatérő áram megjelenése a forraszanyagban lévő lyuk kerülete mentén 2D-ban $z=0,53$ mm-es metszetben, és c) 1D-ban az x tengely mentén $y=7,5$ mm-es metszetben [A3].

Az *V. esetben* mind a +, mind a - 50%-os értékek lyuk jelenléte mellett történt a szimuláció. Így a relatív változás nem olyan látványos a *III. és IV. esethez* képest, mindazonáltal a lyukak eloszlása szintén nagy hatással vannak a közeli zónában lévő tengelymetszetre.

T2.3. *A COMSOL Multiphysics rendszerben végzett numerikus modellezés hasznosnak bizonyult a kísérletileg nehezen vagy egyáltalán nem változtatható kísérleti paraméterek hatásának felderítésére. A modellszámítások lehetővé tették, hogy a forrasztóanyag vastagságának, az effektív és a teljes kötési területnek, valamint a teljes kötési területen belül a lyukak területének és elhelyezkedésének a kötés elektromos viselkedésére gyakorolt hatását függvények formájában adjam meg.*

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

A közeli és távoli zónához tartozó meredekségekre és tengelymetszetekre vonatkozó szimulációs eredményeim alapján megállapítottam, hogy a távoli zónában a $R(d)$ függvény meredeksége valóban anyagspecifikus, azt a lemezanyag fajlagos elektromos vezetőképességének és a lemez áramirányra merőleges keresztmetszetének hányadosa definiálja. A közeli zónában a meredekségek a forrasztóanyag mennyiségével korrelálnak, annak növelésével csökkennek. A közeli és a távoli zónában is érvényes összefüggést adtam meg a meredekség és a lemezek és a forrasztóanyag fajlagos ellenállása és keresztmetszete között.

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

V. ÖSSZEFOGLALÁS

A növekvő környezettudatosság hatására egyre nagyobb figyelmet kapnak a környezetbarát megoldások számos tudományterületen, így a járműfejlesztésben is [4]. Az elektromobilitás térnyerése kritikus a klímaváltozás elleni harcban és a közlekedésfejlesztésben. Ennek eredményeként alakultak ki az új hibrid és teljesen elektromos hajtásrendszerek, mint a hagyományos belső égésű motorok alternatívái [1, 2]. Az elektromos járművek energiaforrása az akkumulátorcsomagja, amelynek összeállításában, gazdaságossági és praktikussági szempontok miatt, kiemelt figyelmet kapnak a permanens kötéstechológiai eljárások. Ezek között a forrasztás, és különösen a lézeres forrasztás, mint elektromos értelemben kiváló kötések létrehozó technológia, vonzó alternatíva [41] testreszabhatósága, automatizálhatósága és egyszerű gyártási sorba integrálhatósága miatt [69].

A lézeres forrasztás rendkívül sok szabadsági fokkal és paraméterrel rendelkezik, így bár optimalizálása komplex feladat, egy megfelelően optimalizált lézeres forrasztási eljárás a paraméterek jelentős javulását eredményezheti az akkumulátorcsomagok alacsony szintjein, ami, különösen nagy számú cella esetén, összességében jelentős előrelépést eredményezhet a rendszer teljesítőképességében [105].

A lézeres forrasztás optimalizálása az akkumulátortechológiai alkalmazásokban izgalmas lehetőség, ugyanakkor jelentős kihívás. Ugyanis a lézerforrasztott kötések elektromos és mechanikai viselkedésének egyidejű vizsgálata viszonylag kevésbé kutatott terület. Nincsenek standardizált mérési módszerek vagy bevett eljárások a lézeres forrasztások elektromos és mechanikai tulajdonságainak együttes értékelésére. A konkurens kötési technikákkal elérhetőnél kisebb ellenállású, ugyanakkor megfelelő mechanikai szilárdsággal rendelkező kötések előállításának lehetőségeit és korlátait feltárni így inspiráló kutatási feladat [71, 72, 101].

V.1. Célkitűzések

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

Fel kellett tárjam a kapcsolatot a vizsgált paraméterek és a forrasztóanyagban ezek változtatásának hatására kialakuló morfológiai osztályok között, és fel kellett derítenem,

hogyan az egyes morfológiai osztályok és a folyamatparaméterek milyen elektromos és mechanikai viselkedést eredményeznek.

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

V.2. Eszközök és módszerek

A lézeres forrasztásokat egy 400W maximális teljesítményű szállézerrel (SPI SP-400C-0005: hullámhossz: 1071 nm, polarizálatlan, $M^2=1,08$) végeztem az általam megépített optikai rendszerben. Modellrendszerként az akkumulátor cellák burkolatának és saruinak anyagát képező, nikkelt bevonatú rozsdamentes acél, Hilumin[®], illetve DC01 lemezpárokat használtam. A forrasztásokat autogén módon, átlapoló kötési geometriában végeztem. Forrasztanyagként egy standard, ön alapú forrasztanyagot (Sn99,3Cu0,7) használtam, amit méretre szabott vékony lemez formájában helyeztem a két kötendő acéllemez közé. A lemezeket a megmunkálás alatt egy speciálisan erre a célra tervezett mintabefogóban rögzítettem.

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

V.3. Új tudományos eredmények

Az akkumulátor csomagot alkotó cellák kötését modelleztem a Li-ion akkucellák többségénél saruanyagként és burkolatként használt Hilumin[®], és DC01 lemezek lézeres forrasztásával, lap geometriában. Szisztematikusan változtatva a kísérleti (lemez tisztítás, felületi érdesség, forrasztanyag mennyiség) és a lézer (lézer teljesítmény, besugárzási idő) paramétereket feltérképeztem a lézerforrasztott

lemezpárok elektromos ellenállásának, szakító-nyíró szilárdságának és morfológiájának a folyamatparaméterektől való függését.

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

A leghomogénebb, egyszersmint a legkevesebb buborékot tartalmazó – általam II. típusként azonosított – morfológiát, amely a forraszanyag teljes térfogatának tökéletes átolvasztásával érhető el, Hilumin[®] lemezpárok esetén 1,6 mm³ forraszanyag 80 W-on 5 másodpercig tartó besugárzásával, míg DC01 lemezpárok esetén 4,8 mm³ forraszanyag és 120 W lézerteljesítmény mellett, 5 s besugárzási idővel valósítottam meg [A1, A2].

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

- megmutattam, hogy az összeforrasztandó lemezek megfelelő előtisztításával maximum 5%-os javulás érhető el mind a Hilumin[®] mind a DC01 lézerforrasztott lemezpárok elektromos és mechanikai tulajdonságaiban, úgy, hogy az acetonnal, etanollal vagy propanollal végzett kémiai tisztítási módok között nincs szignifikáns különbség.

- Bebizonyítottam, hogy a felületi érdesség változtatásának jelentős hatása van a lézerforrasztott lemezpárok elektromos és mechanikai tulajdonságaira. Az átlagos felületi érdesség, R_a 2,63 -ról 2,04 mikrométerre csökkenése a Hilumin[®], illetve a DC01 lemezpárok ellenállásában 11,9, illetve 14,4 %-os, míg szakító-nyíró szilárdságukban 1,7, illetve 2.5-szeres javulást eredményez.

- A forraszanyag mennyiségét állandó lézer teljesítmény, 80 W, és besugárzási idő, 5 s mellett 0,40 mm³-től 3,20 mm³-ig változtatva bebizonyítottam, hogy létezik optimális forraszanyagmennyiség. A vizsgált teljesítmény – idő pár esetén a 1,6 mm³ térfogatú forraszanyag adta mind elektromos mind mechanikai szempontból a legjobb kötést.

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

T1.3. A feltérképezett lézerteljesítmény – besugárzási idő megmunkálási paraméter ablakban 6 zónát különböztettem meg: amelyekben az adott lézerteljesítmény-besugárzási idő pár hatására 1) a lemezpárok között nem jön létre kötés, 2) kötés alakul

ki, 3) a kötés optimális tulajdonságokkal rendelkezik, 4) még mindig jó kötés kialakulása mellett a felső lemez felső felülete megolvad, 5) a lézernyaláb a felső lemez átolvasztásával abba lyukat fúr, míg 6) a kötés középső zónájában a lyukképződés az alsó lemezre is eléri. Igazoltam, hogy ez a hat zóna minden besugárzási időnél ugyanabban a teljesítmény sorrendben jelenik meg.

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

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

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

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

T2.2. A mért ellenállás – mérési távolság függvények viselkedése alapján közeli és távoli zónákat különböztettem meg. Megmutattam, hogy ezek határát a kötési terület széle jelöli ki. Az ellenállás távolságfüggését mindkét zónában lineáris függvények írják le. Az egyenesek meredekségei a közeli zónában és a tengelymetszetek mindkét zónában érzékenyen változnak a forrasztóanyag mennyiségével, ami viszont nincs

hatással a távoli zónabeli meredekségekre sem a Hilumin[®], sem a DC01 lemezpárok esetén. Ez azt jelzi, hogy míg az első három mennyiség a kötéshez kapcsolható, a távoli zónabeli meredekség a lemez anyagi minőségét jellemzi. Az, hogy a kötéshez kapcsolható három mennyiség hogyan változik a forrasztóanyag térfogatának függvényében, teljes összhangban van az T1.1 tézispontban leírt morfológiai képpel [A3].

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

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

A közeli és távoli zónához tartozó meredekségekre és tengelymetszetekre vonatkozó szimulációs eredményeim alapján megállapítottam, hogy a távoli zónában a $R(d)$ függvény meredeksége valóban anyagspecifikus (lásd a 2.2), azt a lemezanyag elektromos fajlagos vezetőképességének és a lemez áramirányra merőleges keresztmetszetének hányadosa definiálja. A közeli zónában a meredekségek a forrasztóanyag mennyiségével korrelálnak, annak növelésével csökkennek. A közeli és a távoli zónában is érvényes összefüggést adtam meg a meredekség és a lemezek és a forrasztóanyag fajlagos ellenállása és keresztmetszete között.

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

VI. SUMMARY

Due to the growing environmental awareness, environmentally friendly solutions are receiving increasing attention across various fields of science, including electric vehicle development [4]. The rise of electromobility is critical in the future of transportation as a tool in the fight against climate change. Consequently, new hybrid and fully electric propulsion systems emerge as alternatives to traditional internal combustion engines [1, 2]. The energy source of these vehicles is the battery pack, in the modules of which multiple cells are assembled together using preferentially permanent bonding. In pursuit of enhancing the electrical performance of battery packs, soldering, particularly laser soldering, emerges as an attractive option due to its ability to produce electrical connections superior to those obtained using concurrent technologies [41]. Additionally, easy automation, customization and integration into workflows make laser soldering a manufacturing technology worth of consideration [69].

Laser soldering is a process with numerous degrees of freedom and parameters. Accordingly, its optimization is a complex task. However, when properly optimized, laser soldering can boost the electrical performance of the modules, leading to significant improvement in the overall characteristics of the battery pack [105].

While posing significant challenges, optimization of laser soldering offers an appreciable potential in battery technology applications. Since critical electrical and mechanical aspects of the soldering process are relatively unexplored, including lack of standardized measurement methods of the electrical characteristics of the laser soldered couples, comprehensive evaluation of the possibilities and limits of laser soldering in production of bonds with electrical characteristics superior to those produced using concurrent technologies together with proper mechanical properties offers an inspiring research field. The results may lead to the simultaneous optimization of the bonds in terms of both electrical and mechanical performance, which is particularly important in battery technology [71, 72, 101].

VI.1. Objectives

In light of the aforementioned demand and motivation, the main objective of my work was to simultaneously optimize the electrical and mechanical properties of the laser soldered joints created in overlapped bonding geometry, using autogenous laser welding (where both strip materials were identical). To achieve this goal, I had to elucidate the effects of the pre-treatment of the metal sheets to be joined and the amount and the position relative to the laser beam of the solder material on the properties of the joints, as well as how the resistance and the tensile-shear strength of the laser soldered sheet pairs depended on the process parameters, namely laser power and irradiation time. Visualization and description of the morphologies of the molten solder material as appearing on the surface of the torn metal sheets after processing formed another task. Finally, the analysis of the results should lead to the identification of the relationship

between the electrical and mechanical characteristics of the joints formed and the observed morphological classes in the solder material, and the process parameters used.

Since the electrical resistance of the joints is of paramount importance in the battery technology, the measurement of the electrical properties of the joints produced by laser soldering needed special attention. The lack of accepted standards posed an extra motivation. The effect of the geometric characteristics of the formed joints on the resistance of the soldered sandwich was revealed through modelling. For this purpose, it was necessary to construct a realistic model that, after selecting the appropriate boundary conditions, helped in unravelling the underlying physics.

VI.2. Materials and methods

The laser soldering experiments were performed using a self-built laser welding system with a SPI SP-400C-0005 fiber laser, delivering 400 W maximum power at 1071 nm wavelength, with an unpolarized beam of $M^2=1.08$ quality, as the energy source. The measurements were conducted on nickel-coated stainless steel stripes, Hilumin[®], the material of the casing and tabs of battery cells. To generalize the results, all experiments were repeated using DC01 steel stripes. Laser soldering was performed in autogenous mode, i.e., the sheet materials to be soldered were identical, in overlapped bonding geometry. A standard tin-based solder (Sn99.3Cu0.7) was used as the solder material, placed in form of thin sheets between the two metal sheets to be bonded. The sandwiches were fixed in a specially designed sample holder during processing.

The focus of my research work was on the measurement of the electrical and mechanical characteristics of the laser soldered sandwiches. The electrical resistance of the joints was determined using a four-point probe, powered by a TTiCPX200 power supply and a Keithley 2401 voltage meter. Mechanical testing was conducted using a Tinius Olsen H5KT tensile testing machine. The morphology of the resolidified solder remained on the surfaces of the torn metal sheets was mapped using an Olympus DSX510 digital 3D microscope. The 2D and 3D images recorded were manually analysed using ImageJ software. Vickers microhardness measurements were performed using a Reichert microhardness tester. To simulate the effects of different solder geometries on the electrical properties of the joints and understand thereby the results of the electrical resistance measurements better, a physical model was created using Comsol software.

VI.3. New scientific results

Modelling the joining process of Li-ion cells that make up the battery pack, laser soldering experiments were performed on Hilumin[®], a commonly used material for producing the tabs and casing for most cells, and DC01sheet pairs in a lap joint geometry. By systematically mapping the effect of pre-treatment (sheet cleaning method, surface roughness, amount of solder) and the laser power and irradiation time, the dependence of the electrical resistance, tensile shear strength and morphology of the

soldered sandwiches on the process parameters was elucidated.

T1.1 Following the fracture of laser soldered sheet pairs, through optical microscopy of the torn surfaces I showed that 1) the fracture occurred in the solder layer in all cases, and 2) based on the appearance of the fractured surfaces I identified three morphological types of joints.

I realized that the most homogeneous morphology, that concomitantly exhibited the least number of gas bubbles trapped in the resolidified solder material, could be achieved by perfect melting of the entire volume of the solder. Bonds characterized by this morphology – coined as type II – were produced by irradiating 1.6 mm³ of solder at 80 W for 5 s for Hilumin[®] sheet pairs, and 4.8 mm³ of solder with 120 W laser power for 5 s for DC01 sheet pairs [A1, A2].

T1.2 Regarding the effects of varying experimental conditions on the electrical and mechanical properties of the joints formed by laser soldering in lap joined geometry:

- I have shown that with appropriate pre-cleaning of the metal sheets to be soldered, an improvement of up to 5% can be achieved in both the electrical and mechanical properties, for both the Hilumin[®] and DC01 sheet pairs, with no significant difference between the acetone, ethanol or propanol cleaning investigated.

- I have demonstrated that the surface roughness had a significant effect on the electrical and mechanical properties of the laser soldered sheet pairs. A reduction in the average surface roughness, R_a , from 2.63 to 2.04 micrometers resulted in 11.9 and 14.4 % decrease in the resistivity, and 1.7 and 2.5-fold increase in the tensile shear strength of the laser soldered Hilumin[®] and DC01 sheet pairs, respectively.

- By varying the volume of solder from 0.40 mm³ to 3.20 mm³ at a constant laser power of 80 W and irradiation time of 5 s I have demonstrated that there is an optimal solder volume. For the tested power-time pair, the solder volume of 1.6 mm³ yielded the best joints both in terms of electrical and mechanical performance.

Based on these results, I used acetone cleaning in all my experiments. Since I have shown that below an average surface roughness of $R_a=2.15\text{ }\mu\text{m}$, achieved by using p1200 polishing paper, further decrease in roughness no longer yields significant improvements, I used p1200 polishing paper during the pretreatment procedure for all experiments [A1, A2].

T1.3 In the laser power – irradiation time process parameter window mapped, I distinguished 6 zones: in which as a result of soldering with the particular laser power – irradiation time pair 1) no joint is formed between the pair of sheets, 2) a joint is formed, 3) the joint has optimal properties, 4) the upper surface of the upper plate melts

while a good joint is still formed, 5) the laser beam melts the upper plate and drills a hole in it, while 6) in the middle zone of the joint, the hole formation reaches the lower plate. I have verified that these six zones appear in the same power sequence for all irradiation times.

I have shown that among the three morphological types identified by the appearance of the fractured joint surfaces, the one with the most homogeneous molten material, containing the fewest trapped gas bubbles, due to perfect melting of the solder, shows the best electrical and mechanical characteristics [A1, A2].

T1.4 By varying the laser power at fixed irradiation times and the irradiation time at constant laser powers, I have measured the dependence of the electrical resistance and tensile shear strength of the laser soldered Hilumin® and DC01 sheet pairs on these two process parameters. I have experimentally demonstrated that an increase in both the laser power and irradiation time improves the electrical and mechanical properties of the joints and reduces the scatter in the data, as long as the given power–irradiation time pair does not result in melting of the top sheet. I have found that for laser soldering at energies higher than this melting threshold, both investigated properties of the joint deteriorate abruptly with an increase in the scatter in both the electrical resistance and the tensile-shear strength values [A1, A2].

Since due to geometric constraints the electrical resistance of a joint cannot be measured by itself, the electrical characterization of the laser soldered sheet pairs is a complex task. There is no accepted standard for the measurement method. My results, along with the introduction of an improved electrical resistance measurement method that eliminates the problems caused by the application of high currents, provided correlations between the electrical resistance of the sandwich and the volume, geometry and morphology of the solder that forms the joint, contributing to a better understanding of the complex processes involved.

T2.1 I have made the four-point resistance measurement method used for the characterization of the soldered sheet pairs self-controlled. Instead of calculating the electrical resistance from the single voltage drop at a constant, and necessarily high current value, a technique used exclusively up to now, I measured the voltage drop at several current values and derived the resistance value as the slope of the straight line that resulted from plotting the voltage drop as a function of current. By increasing the current during the measurement up to a value when the measured points still fitted the straight line perfectly, I managed to eliminate the error caused by the heating effect of high currents [A3].

T2.2 Based on the behaviour of the measured resistance – measurement distance functions, I distinguished between near and far zones. I have shown that the boundary of these is marked by the edge of the soldered area. The resistance – distance functions

in both zones are described by straight lines. The slopes of the straight lines in the near zone and the intercepts in both zones vary sensitively with the amount of solder, however this has no effect on the slopes in the far zone for either the Hilumin[®] or DC01 sheet pairs. This indicates that, while the first three quantities are related to the joint, the slope in the far zone is a measure of the material quality of the sheets to be soldered. The variation of the three quantities related to the joint as a function of the volume of solder is fully consistent with the morphological picture described in thesis statement T1.1. [A3].

T2.3 Numerical modelling in COMSOL Multiphysics environment proved to be useful for exploring the effects of experimental parameters that are difficult or impossible to change experimentally. Numerical simulations with approximate models have shown that the following five geometrical properties of the solder material influence its electrical behaviour: the thickness of the resolidified solder material between the two sheets, the effective joint area, the total area of the holes, the total joint area, actually the sum of the effective joint area and the total area of the holes, and finally the distribution of the holes within the entire soldered area.

In order to gain insight on how the geometry of the resolidified solder material affects the electrical behaviour, it was fundamental to realize that in the continuous joint areas about 97% of the current flows through the outer 10% rim, while each hole acts as a source of "return currents".

Based on my simulation results for the near and far zone slopes and intercepts, I have found that the slope of the function $R(d)$ in the far zone is material specific indeed (cf. 2.2), being defined by the ratio of the electrical conductivity of the sheet material to the cross section of the sheet perpendicularly to the direction of current flow. In the near zone, the slopes correlate with the amount of solder material, decreasing with increasing solder volume. I have formulated the correlation between the slope and the specific resistance and cross section of the sheets and the solder material which remains valid in both the near and far zones.

My calculations revealed that the intercepts in the far zone showed a reciprocal dependence on the effective joint area with an exponent of 0.65. Their variation indicates how the contribution of the resistance of the solder material to the resistance of the soldered sheet pair varies. On the other hand, the behaviour of the intercepts in the near zone is dominated by the holes remaining in the solder: the intercepts vary in proportion to the total area of the holes. In short, the intercepts in both zones carry information about how and to what extent the geometry of the solder joint affects its resistance. [A3]

VII. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm témavezetőmnek, Dr. Geretovszky Zsoltnak a rengeteg munkát és szakmai támogatást amit doktori tanulmányaim során biztosított. Hálás vagyok a széleskörű látásmódjáért és tudásáért, amelyből nagyon sok ragadt rám, továbbá a kritikus és precíz munkaszemléletéért, amely inspirált engem. Az egyetemi éveim alatti szakmai fejlődésem nagyban neki köszönhető.

Ahogyan Dr. Szörényi Tamásnak is, akinek szintűgy mérhetetlen hálával tartozom a témavezetői szintű ellátott feladataiért a doktori tanulmányaim teljes ideje alatt. Tamás akár szabadidejét is feláldozva adott szakmai, de emberi értelemben is felbecsülhetetlen mértékű támogatást és segítséget, amelyek a doktori tanulmányaim befejezése szempontjából elengedhetetlenek voltak. Mélységes hálával tartozom neki ezért az elkötelezettségért, amivel vezetett végig a kutatóvá válás útján.

Köszönettel tartozom Dr. Vass Csabának, aki BSc és MSc tanulmányaim során vezetett be a kutatómunka rejtelseibe. Köszönöm neki, hogy a doktori tanulmányok elkezdésére bátorított, amelyek kezdeti szakaszában segített az irodalomfeldolgozásban, illetve a méréstechikák kidolgozásában.

Köszönöm Kopniczky Juditnak, hogy minden segítséget megadott nekem a profilométeres és az elektronmikroszkópos mérésekhez.

Óriási köszönet Horváth Gábornak, PhD-társamnak és immáron kedves barátomnak, akivel együtt éltük át a doktori kutatómunka minden örömét és kihívását. Minden lehetséges módon támogattuk egymás doktori munkáját. Nem is kívánhattam volna tőle jobb társat a doktori tanulmányaim során.

Kifejezném továbbá köszönetemet a Bolyai épület 223-as számú PhD szobájában jelenleg vagy korábban tevékenykedő összes ember felé, akik hozzájárultak a kellemes hangulat és barátságos munkakörnyezet kialakításához és fenntartásához. Külön kiemelném közülük barátaimat, Bíró Pétert, H. Kovács Bálintot, és Tankó Szilárd Lázárt.

Köszönöm az Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék további munkatársainak a támogató és nyugodt munkahelyi légkört.

Köszönöm a Tatabányai EDUTUS egyetemnek, hogy a doktori tanulmányaim elején biztosították számomra a 400W-os anyagmegmunkáló SPI szállézerüket és az ahhoz tartozó kiegészítő eszközöket.

Köszönettel tartozom ezen kívül az ELI-ALPS-nak és a SoliVac Kft.-nek is, hogy támogatást nyújtottak a doktori tanulmányaim alatt.

Nem lehetek elég hálás családomnak és barátaimnak, hogy mindig ott voltak nekem, hogy támogattak és bátorítottak egész életem során. Különösen köszönöm édesanyámnak, Körmöczi Izabellának, édesapámnak, Körmöczi Tibornak, és húgomnak, Körmöczi Krisztinának folyamatos támogatásukat, segítségüket és türelmüket. Ők voltak azok, akik mindig meghallgattak, és bátorítottak arra, hogy folytassam a nehéz időszakokban is. Ez a disszertáció nem készülhetett volna el

nélkülük.

Végül, de nem utolsó sorban köszönettel tartozom egykori fizika tanárainknak, Pálinkó Margitnak és Bordás Árpádnak, akik lelkesítő és elkötelezett hozzáállása a fizika iránt nemcsak inspirált engem, hanem segített abban is, hogy fejlesszem tudásomat és érdeklődésemet ezen a területen.

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 integrálásuk a mérnökképzésbe” pályázat.

VIII. PUBLIKÁCIÓS LISTA

A tézispontok alapjául szolgáló tudományos közlemények:

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

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

[A3] **Andor Körmöczi**, Gábor Horváth, Tamás Szörényi, Zsolt Geretovszky, „Combined experimental and numerical modelling of the electrical behaviour of laser soldered steel sheets”, Journal of Advanced Joining Processes, [under review], **IF(2022): 4,1**

Egyéb publikációk:

[E1] G. Horváth, **A. Körmöczi**, T. Szörényi and Zs. Geretovszky: Improvement of electrical and mechanical properties of laser welded lap joints via dimensional optimization, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 130, 1843–1854 (2024), **IF(2022): 3,4**

[E2] 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), MTMT: 33789432, **IF(2022): 2,1**

[E3] 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), MTMT: 31617096, **IF(2022): 0,3**

[E4] **A. Körmöczi**, G. Horváth, T. Szörényi and Zs. Geretovszky: Lézeres kötések elektromos ellenállásának jellemzése, „A nemzeti összetartozás jegyében.” Tanulmányok a doktori és posztdoktori képzésben résztvevő, külföldi magyar egyetemi hallgatók online PhD-konferencia előadásaiából., 13(2), 245-258 (2021), MTMT: 32095230

[E5] **A. Körmöczi**, G. Horváth, T. Szörényi and Zs. Geretovszky: On the electrical resistance of laser joined metal sheets, Kvantumelektronika 2021: IX. Szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről, 125-131 (2020), MTMT: 31880988

[E6] G. Horváth, **A. Körmöczi**, T. Szörényi and Zs. Geretovszky: The effect of seam geometry on properties of laser welded nickel coated stainless steel stripes, Kvantumelektronika 2021: IX. Szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről, 74-80 (2020), MTMT: 31880972

[E7] **A. Körmöczi**, G. Horváth, T. Szörényi and Zs. Geretovszky: Laser assisted filler based joining technologies for battery assembly in aviation, Abstract Book of International Symposium on Sustainable Aviation 2019 (ISSA-2019), 62 (2019), MTMT: 32694866

[E8] G. Horváth, **A. Körmöczi**, T. Szörényi and Zs. Geretovszky: Laser welding and its implementation in the assembly of hybrid aircraft battery packs, Abstract Book of International Symposium on Sustainable Aviation 2019 (ISSA-2019), 63 (2019), MTMT: 32694909

[E9] G. Horváth, **A. Körmöczi**, Cs. Vass, Zs. Geretovszky: Lézeres kötéstechológiák alkalmazása elektromos és hibrid hajtású rendszerek akkumulátoraiban, Kvantumelektronika 2018: VIII. Szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről, (2018), MTMT: 3426016

[E10] **A. Körmöczi**, G. Horváth, Cs. Vass, Zs. Geretovszky: A repülőgépiparban használható akkumulátor cellák és azok kötése, Repüléstudományi Közlemények (1997-TŐL), 29(3), 39-53 (2017), MTMT: 3333040

[E11] G. Horváth, **A. Körmöczi**, Cs. Vass, Zs. Geretovszky: Laser joining in aviation: making the battery packs of the electric drivetrain., Repüléstudományi Közlemények (1997-TŐL), 29(3), 71-84 (2017), MTMT: 3333043

Konferencia előadások és posztetek:

[K1] **A. Körmöczi**, G. Horváth, T. Szörényi and Zs. Geretovszky: Lézeres kötések elektromos ellenállásának jellemzése, „A nemzeti összetartozás jegyében.” Tanulmányok a doktori és posztdoktori képzésben résztvevő, külföldi magyar egyetemi hallgatók online PhD-konferencia előadásaiból., előadás, (2021)

[K2] **A. Körmöczi**, G. Horváth, T. Szörényi and Zs. Geretovszky: On the electrical resistance of laser joined metal sheets, Kvantumelektronika 2021: IX. Szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről, előadás, (2021)

[K3] **A. Körmöczi**, G. Horváth, T. Szörényi and Zs. Geretovszky: Laser assisted filler based joining technologies for battery assembly in aviation, International Symposium on Sustainable Aviation 2019, előadás, (2019)

[K4] G. Horváth, **A. Körmöczi**, Cs. Vass, Zs. Geretovszky: Lézeres kötéstechológiák alkalmazása elektromos és hibrid hajtású rendszerek akkumulátoraiban, Kvantumelektronika 2018: VIII. Szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről, poszter, (2018)

[K5] **A. Körmöczi**, G. Horváth, Cs. Vass, Zs. Geretovszky: A repülőgépiparban használható akkumulátor cellák és azok kötése, Repüléstudományi Közlemények (1997-TŐL), előadás, (2017)

[K6] Csaba Vass, **Andor Körmöczi**, Béla Hopp, „Two dimensional numerical modeling of TWIN-LIBWE for submicrometer grating fabrication in fused silica”,

Fizikus vándogyűlés, poszter, (2016)

[K7] Csaba Vass, Andor Körmöczi, Béla Hopp, „Two dimensional numerical modeling of TWIN-LIBWE method for interpretation of submicrometer grating fabrication in fused silica”, COLA 2015, International Conference on Laser Ablation 2015, poszter, (2015)

IX. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] IEA, „Electric vehicles,” IEA, [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/transport/electric-vehicles>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
- [2] Markets and markets, „EV market report,” Markets and markets, [Online]. Available: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/electric-vehicle-market-209371461.html>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
- [3] I. Gál, I. Jakovics, G. Bicsák, Á. Veress, J. Rohács és D. Rohács, „Conceptual design of a small 4-seater aircraft with hybrid propulsion system,” in *IFFK*, Budapest, 2017.
- [4] Európai Parlament, „Európai klímarendelet,” Európai Parlament, [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/hu/article/20190926STO62270/mit-jelent-a-karbonsemlegesseg-es-hogyan-erheto-el-2050-ig>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
- [5] Markets and markets, „Li-ion battery market report,” Markets and markets, [Online]. Available: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/lithium-ion-battery-market-49714593.html>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
- [6] F. I. f. S. a. Innovation, Alternative Battery Technologies Roadmap 2030+, Karlsruhe, Germany: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, 2023.
- [7] P. Mandade, M. Weil, M. Baumann és Z. Wei, „Environmental life cycle assessment of emerging solid-state batteries: A review,” *Chemical Engineering Journal Advances*, kötet 13, szám 1, p. 100439, 2023.
- [8] H. Kühnelt, F. Mastropierro, N. Zhang, S. Toghyani és U. Krewer, „Are batteries fit for hybrid-electric regional aircraft?,” in *IOP Publishing Ltd*, Barcelona, Spain, 2023.
- [9] S. S. Lee, T. H. Kim, S. J. Hu, W. Cai és J. Abell, „Joining Technologies for Automotive Lithium-Ion Battery Manufacturing: A Review,” in *ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Pennsylvania, USA, 2010.
- [10] M. Yoshio, R. J. Brodd és A. Kozawa, *Lithium-Ion Batteries: Science and Technologies*, New York: Springer, 2009.
- [11] Battery Univesity, „Comparison Table of Secondary Batteries,” Battery Univesity, [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-107-comparison-table-of-secondary-batteries>. [Hozzáférés dátuma: 06 02 2024].
- [12] Battery University, „Summary Table of Lead-based Batteries,” Battery University, [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-214-summary-table-of-lead-based-batteries>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
- [13] Battery University, „Summary Table of Lithium-based Batteries,” Battery University, [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
- [14] Battery University, „Lithium-polymer,” Battery University, [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-206-lithium-polymer>.

- substance-or-hype. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
- [15] Battery University, „Summary Table of Nickel-based Batteries,” Battery University, [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-215-summary-table-of-nickel-based-batteries>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
 - [16] Battery University, „Summary Table of Alternate Batteries,” Battery University, [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-217-summary-table-of-alternate-batteries>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
 - [17] Battery University, „Summary Table of Future Batteries,” Battery University, [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-218-summary-table-of-future-batteries>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
 - [18] epec, „<https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>,” epec Engineered Technologies, [Online]. Available: <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
 - [19] Battery Power, „Energy Density Comparison of Silver-Zinc Button Cells with Rechargeable Li-Ion and Li-Polymer Coin and Miniature Prismatic Cells,” Battery Power, [Online]. Available: <https://www.batterypoweronline.com/articles/energy-density-comparison-of-silver-zinc-button-cells-with-rechargeable-li-ion-and-li-polymer-coin-and-miniature-prismatic-cells/>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
 - [20] InsideEVs, „Tesla's 4680-Type Battery Cell Teardown: Specs Revealed,” InsideEVs, [Online]. Available: <https://insideevs.com/news/598656/tesla-4680-battery-cell-specs/>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
 - [21] Battery University, „How do Lithium Batteries Work?,” Battery University, [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-204-how-do-lithium-batteries-work>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
 - [22] F. Wu, J. Maier és Y. Yu, „Guidelines and trends for next-generation rechargeable lithium and lithium-ion batteries,” *Chemical Society Reviews*, kötet 5, szám 49, pp. 1569-1614, 2020.
 - [23] G. dos Reis, C. Strange, M. Yadav és S. Li, „Lithium-ion battery data and where to find it,” *Energy and AI*, kötet 5, p. 100081, 2021.
 - [24] Q. Li, Y. Yang, X. Yu és H. Li, „A 700 W·h·kg⁻¹ Rechargeable Pouch Type Lithium Battery,” *Chinese Physics Letters*, kötet 40, szám 4, p. 048201, 2023.
 - [25] New Atlas, „Chinese scientists push lithium batteries up to a record 711 Wh/kg,” New Atlas, [Online]. Available: <https://newatlas.com/energy/highest-density-lithium-battery/>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
 - [26] Battery University, „Types of Battery Cells,” Battery University, [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-301a-types-of-battery-cells>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
 - [27] epec, „Pros and cons of lithium prismatic cells vs cylindrical cells,” epec Engineered Technologies, [Online]. Available: <https://blog.epectec.com/pros-and-cons-of-lithium-prismatic-cells-vs-cylindrical-cells>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].

- [28] Panasonic, *NCR18650B cell datasheet*, 2024.
- [29] LGChem, *INR18650 MJ1 Datasheet*, LGChem, 2024.
- [30] Sony, *US18650VTC6 datasheet*, Sony, 2024.
- [31] Panasonic, *NCR26650A satasheet*, Panasonic, 2024.
- [32] Energig, *EC-TN26650HP Datasheet*, Energig, 2024.
- [33] Samsung, *INR21700-50E Datasheet*, Samsung, 2024.
- [34] DNKPower, „All Things You Need to Know about 21700 Battery,” DNKPower, [Online]. Available: <https://www.dnkpower.com/teslas-mass-production-21700-battery/>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
- [35] Panasonic, *NCA103450*, Panasonic, 2024.
- [36] LGChem, *ICP103450 Datasheet*, LGChem, 2024.
- [37] A123, *A123 20Ah Prismatic Pouch Cell Datasheet*, A123, 2024.
- [38] Farasis, *25Ah Prismatic Pocu Cell Datasheet*, Farasis, 2024.
- [39] Valuates Reports, „Global 18650 Lithium Battery Sales Market Report 2023,” Valuates Reports, [Online]. Available: <https://reports.valuates.com/market-reports/QYRE-Auto-12P9298/global-18650-lithium-battery>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
- [40] ISO Standard, „ISO 12405-4:2018,” ISO Standard, [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/71407.html>. [Hozzáférés dátuma: 26 02 2024].
- [41] M. Zwicker, M. Moghadam, W. Zhang és C. Nielsen, „Automotive battery pack manufacturing – a review of battery to tab joining,” *Journal of Advanced Joining Processes*, kötet 1, p. 100017, 2020.
- [42] L. Shui, F. Chen, A. Garg, X. Peng, N. Bao és J. Zhang, „Design optimization of battery pack enclosure for electric vehicle,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, kötet 58, pp. 331-347, 2018.
- [43] S.-K. Hong, B. I. Epureanu és M. P. Castanier, „Parametric reduced-order models of battery pack vibration including structural variation and prestress effects,” *Journal of Power Sources*, kötet 261, pp. 101-111, 2014.
- [44] J. H. Lee, H. M. Lee és S. Ahn, „Battery dimensional changes occurring during charge/discharge cycles—thin rectangular lithium ion and polymer cells,” *Journal of Power Sources*, kötet 1, összesen: 2119-121, pp. 833-837, 2003.
- [45] J. Constable és C. Sahay, „Electrical resistance as an indicator of fatigue,” *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, kötet 15, szám 6, pp. 1138-1145, 1992.
- [46] N. Zhao, W. Li, W. W. Cai és J. A. Abell, „A Fatigue Life Study of Ultrasonically Welded Lithium-Ion Battery Tab Joints Based on Electrical Resistance,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, p. 136, 2014.
- [47] P. Taheri, S. Hsieh és M. Bahrami, „Investigating electrical contact resistance losses in lithium-ion battery assemblies for hybrid and electric vehicles,” *Journal of Power Sources*, kötet 196, szám 15, pp. 6525-6533, 2011.
- [48] M. Fleckenstein, O. Bohlen, M. A. Roscher és B. Bäker, „Current density and state of charge inhomogeneities in Li-ion battery cells with LiFePO₄ as cathode material due to temperature gradients,” *Journal of Power Sources*, kötet 196, szám 10, pp. 4769-4778, 2011.

- [49] N. Yang, X. Zhang, B. Shang és G. Li, „Unbalanced discharging and aging due to temperature differences among the cells in a lithium-ion battery pack with parallel combination,” *Journal of Power Sources*, kötet 306, pp. 733-741, 2016.
- [50] Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, G. Chu, J. Sun és C. Chen, „Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery,” *Journal of Power Sources*, kötet 208, pp. 210-224, 2012.
- [51] Samsung, *INR18650-25R 2014 Datasheet*, Samsung, 2024.
- [52] C. Campestrini, P. Keil, S. F. Schuster és A. Jossen, „Ageing of lithium-ion battery modules with dissipative balancing compared with single-cell ageing,” *Journal of Energy Storage*, kötet 6, pp. 142-152, 2016.
- [53] L. Saw, Y. Ye és A. Tay, „Electrochemical–thermal analysis of 18650 Lithium Iron Phosphate cell,” *Energy Conversion and Management*, kötet 75, pp. 162-174, 2013.
- [54] J. Qiu, „Corrosion in Microelectronics,” in *ASM HANDBOOK: Corrosion: Environments and Industries*, ASM International, 2006.
- [55] Q. Zhao, X. Liu, H. Wang, Y. Zhu, Y. An, D. Yu és J. Qi, „Research Progress in Corrosion Protection Technology for Electronic Components,” *Metals*, kötet 13, szám 9, 2023.
- [56] M. Braunovic, „Power connectors,” in *Electrical Contacts: Principles and Applications*, Montréal, Canada, CRC Press, 2017, pp. 231-374.
- [57] R. S. Timsit, „Electrical contact resistance: Fundamental principles,” in *Electrical Contacts: Principles and Applications*, Toronto, Canada, CRC Press, 2017, pp. 3 - 112.
- [58] A. Das, D. Li, D. Williams és D. Greenwood, „Joining Technologies for Automotive Battery Systems Manufacturing,” *World Electric Vehicle Journal*, kötet 9, szám 2, p. 22, 2018.
- [59] T. Solchenbach, P. Plapper és W. Cai, „Electrical performance of laser braze-welded aluminum–copper interconnects,” *Journal of Manufacturing Processes*, kötet 16, szám 2, pp. 183-189, 2014.
- [60] Wieland-Werke AG, *Strip for connectors datasheet*, Wieland-Werke AG, 2024.
- [61] TATA Steel, „HILUMIN® ultra-clean nickel-plated steel,” TATA Steel, [Online]. Available: <https://www.tatasteeleurope.com/engineering/products/electro-plated/hilumin-ultra-clean-nickel-plated-steel>. [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [62] TATA Steel, *Hilumin Datasheet*, TATA Steel, 2024.
- [63] European Standards, *EN 10139:2016 DC Steel standard*, European Standards, 2016.
- [64] Matmatch, *DC04 steel properties*, Matmach, 2016.
- [65] Thyssen Krupp, *DC seeries steel properties*, Thyssen Krupp, 2024.
- [66] L. Szabó, *Nem oldható kötések alkalmazása, szerszámai, technológiája*, Budapest: Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, 2011.
- [67] C. L. Jenney és A. O’Brien, *Welding Handbook*, AWS, 2019.
- [68] J. Dr. Gáti és M. Dr. Kovács, *Kötéstechnológia*, Budapest: BME, 2006.
- [69] R. V. Nanditta és N. B. Rahul, „Review on Comparative Study of Various

- Automotive Cell Joining Techniques and Challenges,” in *IEEE*, India, 2022.
- [70] C. Kún, Szegecskötések fajtái, szerelése, szerszámai, munkabiztonsági előírásai, Budapest: Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, 2011.
 - [71] J. F. Ready, *LIA Handbook of Laser Materials Processing*, Magnolia Publishing Inc., 2001.
 - [72] K. Ferjutz és J. R. Davis, *ASM Handbook Vol6 Welding, Brazing and Soldering*, ASM, 1993.
 - [73] K. Weman, *Welding Processes Handbook*, Woodhead Publishing, 2003.
 - [74] M. J. Brand, P. A. Schmidt, M. F. Zaeh és A. Jossen, „Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances,” *Journal of Energy Storage*, kötet , pp. 7-14, 2015.
 - [75] J. Godek, „Joining lithium-ion batteries into packs using small-scale resistance spot welding,” *Wlding International*, kötet 27, szám 8, pp. 612-622, 2013.
 - [76] S. C. Helzer és H. B. Cary, *Modern Welding Technology*, Pearson, 2004.
 - [77] W. A. Bowditch, K. E. Bowditch és M. A. Bowditch, *Modern Welding*, 13th Edition, G-W Publisher, 2024.
 - [78] P. A. Schmidt, T. Pauleser és M. F. Zaeh, „Optimisation of Weld Seam Configurations Using a Genetic Algorithm,” *Procedia CIRP*, kötet 25, pp. 393-399, 2014.
 - [79] B. Mehlmann, A. Olowinsky, M. Thuilot és A. Gillner, „Spatially Modulated Laser Beam Micro Welding of CuSn6 and Nickel-plated DC04 Steel for Battery Applications,” *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, kötet 9, szám 3, pp. 276-281, 2014.
 - [80] H. Pantsar, E. Dold, J. Gabzdyl, E. Kaiser, T. Hesse, M. Kirchhoff és B. Faisst, „New welding techniques and laser sources for battery welding,” in *SPIE LASE*, California USA, 2018.
 - [81] J. Helm, I. D. von Bayer, A. Olowinsky és A. Gillner , „Influence of the surface properties of the connector material on the reliable and reproducible contacting of battery cells with a laser beam welding process,” *Welding in the World*, kötet 63, pp. 1221-1228, 2019.
 - [82] J. Helm, A. Schulz, A. Olowinsky, A. Dohrn és R. Poprawe , „Laser welding of laser-structured copper connectors for battery applications and power electronics,” *Welding in the World*, kötet 64, pp. 611-622, 2020.
 - [83] R. L. O'Brien, *Jefferson's WELDING ENCYCLOPEDIA*, AWS, 1997.
 - [84] J. Devine, „Ultrasonic Welding,” in *Welding Fundamentals and Processes*, ASM International, 2011.
 - [85] J. Zhao, H. Li, H. Choi, W. Cai, J. A. Abell és X. Li, „Insertable thin film thermocouples for in situ transient temperature monitoring in ultrasonic metal welding of battery tabs,” *Journal of Manufacturing Processes*, kötet 15, szám 1, pp. 136-140, 2013.
 - [86] H. Li, H. Choi, C. Ma, J. Zhao, H. Jiang, W. Cai, J. A. Abell és X. Li, „Transient Temperature and Heat Flux Measurement in Ultrasonic Joining of Battery Tabs Using Thin-Film Microsensors,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, kötet 135, szám 5, p. 051015, 2013.
 - [87] N. M. Raj, L. A. Kumaraswamidhas, P. K. Nalajam és S. A. Vendan , „Studies

- on Electro Mechanical Aspects in Ultrasonically Welded Al/Cu Joints,” *Transactions of the Indian Institute of Metals*, kötet 71, pp. 107-116, 2017.
- [88] N. M. Raj, L. A. Kumaraswamidhas, S. A. Vendan és P. K. Nalajam , „Investigations on Resistance Behavior at the Interface of Ultrasonically Welded Dissimilar Al/Cu Joints,” *Silicon*, kötet 11, pp. 1717-1723, 2019.
- [89] M. E. McGovern, T. J. Rinker és R. C. Sekol, „Assessment of Ultrasonic Welds Using Pulsed Infrared Thermography,” *Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*, kötet 2, szám 1, 2019.
- [90] S. Choi, G. Zhang, T. A. Fuhlbrigge és S. Nidamarthi, „Vibration analysis in robotic ultrasonic welding for battery assembly,” in *IEEE*, Woburn USA, 2012.
- [91] B. Kang, W. Cai és C.-A. Tan, „Dynamic Stress Analysis of Battery Tabs Under Ultrasonic Welding,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, kötet 136, szám 4, 2014.
- [92] S. Lee, T. Kim, W. Cai és J. Abell, „Parasitic vibration attenuation in ultrasonic welding of battery tabs,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, kötet 71, pp. 181-195, 2014.
- [93] H. K. Charles, „Advanced Wire Bonding Technology: Materials, Methods, and Testing,” *Materials for Advanced Packaging*, pp. 131-198, 2017.
- [94] J. Straubel, D. Lyons, E. Berdichevsky, S. Kohn és R. Teixeira, „Battery pack and method for protecting batteries”. USA Szabadalom száma: US7671565B2, 2010.
- [95] A. E. Barton, „Energy Storage Systems”. USA Szabadalom száma: WO/2018/134,704, 2018.
- [96] S. Kohn, G. Berdichevsky és B. Hewett, „Tunable frangible battery pack system”. USA Szabadalom száma: US7923144B2, 2011.
- [97] C. Rouff, „A closer look at wire bonding,” *CHARGED Electric Vehicles Magazine*, 2016.
- [98] T. Cain, *Soldering and Brazing Handbook for Home Machinists*, Fox Chapel Publishing, 2022.
- [99] N. Ismail, N. Atiqah, A. Jalar, M. A. Bakar, R. A. A. Rahim, A. G. Ismail, A. A. Hamyah és L. K. Keng, „A systematic literature review: The effects of surface roughness on the wettability and formation of intermetallic compound layers in lead-free solder joints,” *Journal of Manufacturing Processes*, kötet 83, pp. 68-85, 2022.
- [100] K. Ferjutz és J. R. Davis, *ASM Handbook Vol. 6 Welding, Brazing and Soldering*, ASM International, 1993.
- [101] M. Brand, E. Kolp, P. Berg, T. Bach, P. Schmidt és A. Jossen, „Electrical resistances of soldered battery cell connections,” *Journal of Energy Storage*, kötet 12, pp. 45-54, 2017.
- [102] M. Brand, P. Berg, E. Kolp, T. Bach, P. Schmidt és A. Jossen, „Detachable electrical connection of battery cells by press contacts,” *Journal of Energy Storage*, kötet 8, pp. 69-77, 2016.
- [103] G. Becker, „From Soldering Iron to Laser A Review of Soldering Methods for Surface Mounting,” *Microelectronics International*, kötet 4, pp. 22-27, 1987.

- [104] S. Nothdurft, A. Springer, S. Kaierle, J. Ross és M. Stonis, „Laser soldering and brazing of steel-aluminum sheets for tailored hybrid tubes,” *Journal of Laser Applications*, kötet 28, szám 2, 2016.
- [105] H. Kastler és K. Menzl, „Effective Battery Design and Integration of Cylindrical Cells for High Power Application,” *Proceedings of CTI SYMPOSIUM 2019*, kötet 1, pp. 283-293, 2019.
- [106] Kreisler Electric, „Battery module and battery system,”. Germany Szabadalom száma: Patent EP3096372A1, 2021.
- [107] F. Lerra, A. Ascari és A. Fortunato, „The influence of laser pulse shape and separation distance on dissimilar welding of Al and Cu films,” *Journal of Manufacturing Processes*, kötet 45, pp. 331-339, 2019.
- [108] T. A. Mai és A. C. Spowage, „Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel–kovar, copper–steel and copper–aluminium,” *Materials Science and Engineering: A*, kötet 374, szám 1-2, pp. 224-233, 2004.
- [109] W. Shi, W. Wang. és Y. Huang, „Laser micro-welding of Cu-Al dissimilar metals,” *Int J Adv Manuf Technol.*, kötet 85, pp. 185-189, 2016.
- [110] M. Schmidt és M. Weigl, „Laser-Bonding in High Power Electronics,” *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, kötet 5, szám 3, pp. 242-247, 2010.
- [111] Y. Li, C. Chen, R. Yi és Y. Ouyang, „Review: Special brazing and soldering,” *Journal of Manufacturing Processes*, kötet 60, pp. 608-635, 2020.
- [112] D. Krishnaja, M. Cheepu és D. Venkateswarlu, „A Review of Research Progress on Dissimilar Laser Weld-Brazing of Automotive Applications,” *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, kötet 330, pp. 1-16, 2018.
- [113] I. Bunaziv, O. M. Akselsen, X. Ren és B. Nyhus, „A Review on Laser-Assisted Joining of Aluminium Alloys to Other Metals,” *Metals*, kötet 11, pp. 1-40, 2021.
- [114] A. Das, R. Beaumont, I. Masters és P. Haney, „Macro-Modelling of Laser Micro-Joints for Understanding Joint Strength in Electric Vehicle Battery Interconnects,” *Materials*, kötet 14, szám 13, p. 3552, 2021.
- [115] Matmatch, „EN 10139 Grade DC01 work hardened (C390),” Matmatch, [Online]. Available: <https://matmatch.com/materials/minfm36312-en-10139-grade-dc01-work-hardened-c390>. [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [116] FELDER GMBH Löttechnik, *Datasheet of lead free solder*, FELDER GMBH Löttechnik, 2024.
- [117] FELDER GMBH Löttechnik, *Lötpaste ISO-Flux "E" Safety data sheet*, FELDER GMBH Löttechnik, 2024.
- [118] Wolf, *TS 500 Forrasztó gyanta Datasheet*, Wolf, 2024.
- [119] S. Lasers, „SP-400C-0005 Datasheet,” SPI Lasers, [Online]. Available: <https://www.laserresale.com/?fa=app.view&it=6252>. [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [120] Thorlabs, „S130C - Slim Photodiode Power Sensor,” Thorlabs, [Online]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=S130C>. [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [121] Aim TTi, *TTi EX355P Datasheet*, Aim TTi, 2024.
- [122] NI, „LabVIEW,” NI, [Online]. Available:

- <https://www.ni.com/en/shop/labview.html>. [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [123] Thorlabs, *LA1464-B - N-BK7 Plano-Convex Lens Datasheet*, Thorlabs, 2024.
- [124] C. Carsac, J. Uner és M. Theriault, „Inert Soldering With Lead-Free Alloys: Review And Evaluation,” *IPC SMTA Council APEXSM 2001*, 2001.
- [125] A. Baated, J. Jiang, K. S. Kim, K. Sukanuma, S. Huang és B. Jurcik, „Sn–Ag–Cu Soldering Reliability as Influenced by Process Atmosphere,” *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, kötet 33, szám 1, pp. 38 - 43, 2009.
- [126] C. Gonçalves, H. Leitão, C. S. Lau, J. C. Teixeira, L. Ribas, S. Teixeira, M. F. Cerqueira és F. Macedo, „Wetting behaviour of SAC305 solder on different substrates in high vacuum and inert atmosphere,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, kötet 26, pp. 5106-5112, 2015.
- [127] SMC, „Flow Meter PF2A751-F04-67-M Datasheet,” SMC, [Online]. Available: <https://www.smc-pneumatics.com/PF2A751-F04-67-M.html> . [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [128] SZTE, „Hitachi S-4700 téremissziós pásztázó elektronmikroszkóp,” Hitachi , [Online]. Available: https://titan.physx.u-szeged.hu/~fesem/Hitachi%20S-4700_spec.pdf. [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [129] SZTE, „Röntec QX2 energiadiszperzív mikroanalitikai rendszer (EDS),” Röntec, [Online]. Available: https://titan.physx.u-szeged.hu/~fesem/R%C3%B6ntec%20QX2_spec.pdf. [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [130] Olympus, „DSX510 3D Optical microscope Datasheet,” Olympus, [Online]. Available: [https://www.olympus-ims.com/en/microscope/dsx510/#!/cms\[focus\]=cmsContent14118](https://www.olympus-ims.com/en/microscope/dsx510/#!/cms[focus]=cmsContent14118). [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [131] ISO Standards, „ISO 21920-2:2021 Standard,” ISO Standards, [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/72226.html>. [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [132] Olympus, „Profile method of Olympus DSX510 optical microscope,” Olympus, [Online]. Available: [www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!/cms\[focus\]=007](http://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!/cms[focus]=007). [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [133] M. Z. Yahaya és A. A. Mohamad, „Hardness testing of lead-free solders: A review,” *Soldering & Surface Mount Technology*, kötet 29, szám 4, pp. 203-224, 2017.
- [134] S. Amares és B. Tchari, „Effect on Shear Strength and Hardness Properties of Tin Based Solder Alloy, Sn-50Bi, Sn-50Bi+2%TiO₂ Nanoparticles,” *Advanced Materials Research*, kötet 1159, pp. 54-59, 2020.
- [135] ISO Standards, *ISO 6507-1:2023 Standard*, ISO Standards, 2023.
- [136] Reichert, „Reichert Microscopes Datasheet,” Reichert, [Online]. Available: https://shwiki.federation.edu.au/index.php/Reichert_Microscopes. [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [137] Tinius Olsen, „Tinius Olsen H5KT Datasheet,” Tinius Olsen, [Online]. Available: <https://www.atecorp.com/products/tinius-olsen/h5kt>. [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].

- [138] ISO Standards, „ISO:6892-1:2019 Standard,” ISO Standards, [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:6892:-1:ed-3:v1:en>. [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [139] N. Scotchmer, AWS Recommended practices for resistance welding, AWS, 2000.
- [140] IEC, „IEC 60228 Standard,” IEC, [Online]. Available: https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60228%7Bed3.0%7Den_d.pdf. [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [141] R. Mingesz, „Alacsony ellenállások mérése,” SZTE, [Online]. Available: <https://www.inf.u-szeged.hu/~mingesz/alacsony-ellenallasok-merese/>. [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [142] P. A. Schmidt, M. Schweier és M. F. Zaeh, „Joining of lithium-ion batteries using laser beam welding: electrical losses of welded aluminum and copper joints,” in *31st International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics.*, 2012.
- [143] Aim TTI, „TTI CPX200 Datasheet,” Aim TTI, [Online]. Available: <https://www.testequipmenthq.com/datasheets/TTI-CPX200-Datasheet.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 29 02 2024].
- [144] Keithley, „Keithley 2400 Standard Series SMU,” Keithley, [Online]. Available: <https://www.tek.com/en/products/keithley/source-measure-units/2400-standard-series-sourcemeter>. [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [145] COMSOL, „COMSOL Multiphysics 5.5,” COMSOL, [Online]. Available: <https://www.comsol.com/product-download/5.5/windows>. [Hozzáférés dátuma: 28 02 2024].
- [146] ASTM, *ASTM A240/A240M-23 Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications*, ASTM, 2023.
- [147] C.-J. Jiang, X. Zou, X. Xue és W. Wang, „Welding procedure Research of ASTM B708 R05252 tantalum sheets,” in *Journal of Physics: Conference Series*, China, 2020.
- [148] M. Eroğlu, „Effect of nickel with chromium on microstructure and toughness of heat affected zone in low carbon steel,” *Science and Technology of Welding and Joining*, kötet 7, szám 4, pp. 217-223, 2002.
- [149] P. Rous és F. Steiner, „Effect of surface finish and roughness on the mechanical strength of solder joints,” *46th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, pp. 1-5, 2023.
- [150] W. M. Haynes, *CRC Handbook of Chemistry and Physics (95th ed.)*, Boca Raton, USA: CRC Press, 2015.
- [151] R. A. Serway, *Principles of Physics (2nd ed.)*, London: Fort Worth, 1998.
- [152] J. F. Ready, *LIA Handbook of Laser Materials Processing*, Magnolia Publishing Inc., 2001.