



Neumann János Egyetem
Műszaki és Informatikai
Kar

Elektromosan vezető ragasztástechnológia járműipari fejlesztése

Development of Electrically Conductive
Adhesive Technology for the Automotive
Industry

Polyák Kamill
I48AYR

Tajti Ferenc - Tanszéki Mérnök
Dr. Berczeli Miklós - Egyetemi Adjunktus

2024

Tartalomjegyzék

1.	BEVEZETÉS A VEZETŐKÉPES RAGASZTÓK VILÁGÁBA:	8
2.	VEZETŐ RAGASZTÓK TÍPUSAI	10
2.1.	IZOTROPIKUS VEZETŐ RAGASZTÓK (ICA-K)	10
2.2.	ANIZOTROPIKUS VEZETŐ RAGASZTÓK (ACA-K)	11
3.	AZ ELEKTROMOSAN VEZETŐ RAGASZTÓK ÖSSZETEVŐI	12
3.1.	EGY-, ILLETVE KÉTKOMPONENSŰ RAGASZTÓK	12
3.1.1.	Kétkomponensű Ragasztók	12
3.1.2.	Egykomponensű ragasztók	12
3.2.	MÁTRIXANYAGOK	13
3.2.1.	Epoxi Mátrix	13
3.2.2.	ETPU Mátrix	13
3.2.3.	Thermoplasztikus Polimerek	13
3.3.	A VEZETŐ SZEMCSÉK, RÉSZECSKÉK GEOMETRIÁJA	14
3.3.1.	Pehely (flake) alakú részecskék	14
3.3.2.	Gömb alakú részecskék	16
3.3.3.	Szál, rúd alakú vezetők	17
3.4.	A VEZETŐ SZEMCSÉK ANYAGA	18
3.4.1.	Ezüst	18
3.4.2.	Réz	19
3.4.3.	Arany	19
3.4.4.	Ón	20
3.4.5.	Nikkel	20
3.4.6.	Platina és Palládium	21
3.4.7.	Szén nanocsövek (Carbon Nanotubes, CNT)	22
3.4.8.	Nanolemezek és Grafén	23
4.	A TÉRHÁLÓSÍTÁS HATÁSA AZ ELEKTROMOSAN VEZETŐ RAGASZTOTT KÖTÉS TULAJDONSÁGAIRA	24
4.1.	TÉRHÁLÓSÍTÁS DEFINÍCIÓJA ÉS JELENTŐSÉGE	24
4.2.	A TÉRHÁLÓSÍTÁS HATÁSA A HŐÁLLÓSÁGRA	24
4.3.	A MAGAS HŐMÉRSÉKLET ELŐNYEI A TÉRHÁLÓSÍTÁS SORÁN	24
5.	AZ ÖSSZESZORÍTÁSI ERŐ HATÁSA AZ ELEKTROMOS ELLENÁLLÁSRA	26
5.1.	A RAGASZTÓANYAG VISELKEDÉSE ÉS A SZEMCSÉK ALAKVÁLTOZÁSA	26
5.2.	FELÜLETEK KÖZELEDÉSE ÉS A KONTAKTELLENÁLLÁS CSÖKKENÉSE:	26
5.3.	AZ ÖSSZENYOMÁSI ERŐ ALKALMAZÁSÁRA VONATKOZÓ AJÁNLÁSOK:	27
5.4.	A RAGASZTOTT KÖTÉS HOSSZÚ TÁVÚ STABILITÁS:	27
6.	A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSEI	28
7.	A KÍSÉRLETI ANYAGOK ÉS ELJÁRÁSOK LEÍRÁSA, JELLEMZÉSE	29
7.1.	FELHASZNÁLT ALAPANYAGOK	29
7.1.1.	Hidegen hengerelt réz lemez	29
7.1.2.	próbatestek geometriája	30
7.1.3.	Loctite Ablestik 2902 ragasztó	30
7.2.	A RAGASZTOTT KÖTÉSEK LÉTREHOZÁSÁNAK MÓDSZERE	31
7.2.1.	A ragasztóanyag feljuttatása a felületre	31
7.2.2.	A kötések összeszorítása	32
7.2.3.	Hőkezelés	33
7.3.	AZ ELEKTROMOSAN VEZETŐ RAGASZTOTT KÖTÉSEK VIZSGÁLATAI	34
7.3.1.	A ragasztott kötések ellenállásmérése	34
7.3.2.	Pásztázó Elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálatok	35
7.3.3.	A ragasztás szakítószilárdságának, nyírószilárdságának meghatározása	36

8.	AZ ELÉRT EREDMÉNYEK ÉS AZOK KIÉRTÉKELÉSE.....	38
8.1.	A RAGASZTOTT KÖTÉSEK ELEKTROMOS ELLENÁLLÁSA ÉS MECHANIKAI SZILÁRDSÁGA A SZORÍTÓERŐ FÜGGVÉNYÉBEN	38
8.2.	A RAGASZTOTT KÖTÉSEK ELEKTROMOS ELLENÁLLÁSA ÉS MECHANIKAI SZILÁRDSÁGA AZ ALKALMAZOTT HŐKEZELÉS FÜGGVÉNYÉBEN.....	44
9.	ÖSSZEFOGLALÁS	48
10.	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	50
	ÁBRAJEGYZÉK	51
	IRODALOMJEGYZÉK	52

1. Bevezetés a Vezetőképes Ragasztók Világába:

A vezetőképes ragasztók kétfunkciós szerepükkel kitűnnek a hagyományos rögzítési technikák közül, ezek olyan speciális anyagok, amelyek képesek biztosítani az elektromos áram átvitelét a ragasztott felületek között, miközben egy erős és tartós kötést alakítanak ki. Az elmúlt években a technológiai fejlődés következtében ezek a ragasztók fontos szerepet játszanak számos iparágban, különösen az elektronikában és az autóiparban, ahol az alkatrészek súlycsökkentése, miniatürizálása, a költséghatékonyasága lett az egyik fő szempont, valamint egyszerűbb szerelési folyamatok kerültek előtérbe, mindemellett nőtték a környezeti fenntarthatóság iránti igények [1], [2], [3], [4].

A vezetőképes ragasztók összetételük miatt képesek vezetni az áramot. Az áramvezető képesség eléréséhez olyan vezető fémeket és anyagokat tartalmaznak, mint az ezüst, a réz, a nikkel vagy bizonyos karbonalapú anyagok, mint a grafit és a szén nanocsövek. Ezek a fémrészecskék egy kötőanyag-mátrixba, többnyire polimerekbe ágyazódnak, amelyek a mechanikai stabilitásért. A fémrészecskék biztosítják az elektromos összeköttetést a ragasztott felületek között, míg a polimer mátrix adhéziós kapcsolatot hoz létre a felületek között, így az anyag elektromosan vezető, mégis rugalmas és mechanikailag stabil marad [1], [2], [3], [4].

A hagyományos forrasztási eljárásokkal szemben, amelyek magas hőmérsékleten működnek, a vezetőképes ragasztók különösen előnyösek a hőérzékeny alkatrészek esetében, mivel alacsonyabb hőmérsékleten is használhatók. Ez nemcsak a hőre érzékeny komponensek védelme miatt előnyös, hanem csökkenti az energiafogyasztást, és ezáltal hozzájárul a fenntarthatóbb gyártási folyamatok kialakításához. Ezenkívül környezetbarát alternatívát jelentenek a hagyományos forrasztáshoz képest, hiszen nem igényelnek rákkeltő vagy mérgező anyagokat, amelyeket a forrasztóanyagok gyakran tartalmaznak [1], [2], [3], [4].

A vezetőképes ragasztók alkalmazási területei rendkívül széleskörűek. Az elektronikában elsősorban olyan mikroelektronikai eszközöknél használják őket, ahol a vezetőképes ragasztók minimalizálják a helyigényt és csökkentik a szerelési időt. Példák közé tartoznak az integrált áramkörök rögzítése, kijelzők összeszerelése, LED-ek, napelemek és akkumulátorcellák csatlakoztatása, valamint a különféle érzékelők rögzítése. Az elektromos és hibrid járművek megjelenésével a vezetőképes ragasztók új alkalmazási lehetőségeket kínálnak az akkumulátorcsatlakozások és elektromos rendszerek integrációjában. Az autóiparban előnyt jelent a könnyű és rugalmas csatlakozások

használata, mivel ezek alacsonyabb tömeggel és egyszerűbb alkalmazással járnak, szemben a hagyományos csatlakozásokkal. A vezetőképes ragasztók orvosi eszközökben is alkalmazásra kerülnek, ahol apró és precíz összekapcsolásokra van szükség különösen érzékeny környezetben. Emellett az új generációs ragasztók, például a nanorészecske-alapú és grafén tartalmú ragasztók, nagy teljesítményű és hosszú élettartamú megoldásokat nyújtanak, amelyek egyre elterjedtebbek a jövőbeni fejlesztések során [1], [2], [3], [4]

Erre jó példa lehet egy esettanulmányt, amely bemutatja a **Master Bond EP75-1** vezetőképes ragasztót, amelyet egy biomarker detektor szenzorához használtak. Az EP75-1 egy grafén-alapú, kétkomponensű, elektromosan vezető epoxigyanta, amely mechanikai és elektromos csatlakozást biztosít. Az esettanulmány leírja, hogyan használták ezt a ragasztót egy papíralapú, rugalmas chemiresistor szenzor integrálásához, amelyet az emberi teljesítmény monitorozására (HPM) terveztek, például a kilélegzett levegőben található acetonszint mérésére, ami különösen hasznos lehet a diabétesz monitorozásában [5].

A következő esettanulmányban a Master Bond EP79 vezetőképes ragasztót használta a CERN ATLAS detektorában, a Faraday-ketrec csatlakozásainak lezárásához. Az ATLAS, a LHC egyik része, rendkívül érzékeny a külső elektromágneses zajokra, amelyek torzíthatják a részecske-detektor méréseit. A Master Bond EP79 ragasztót arra használták, hogy elektromosan vezető csatlakozásokat alakítsanak ki az ATLAS detektor egyes részei között, csökkentve az elektromágneses interferenciát, és biztosítva a megbízható, alacsony impedanciájú kapcsolatot [6].

Az EP79 kétkomponensű, alacsony zsugorodással rendelkező epoxigyanta, amelyet ezüstözött nikkel töltőanyaggal láttak el, így kiváló elektromos vezetőképességgel és mechanikai stabilitással bír. Az anyagot különösen alacsony hőmérsékleten való kötésre és nagy hőtürésségre optimalizálták, ami fontos szempont volt a CERN kutatói számára. Az ATLAS Faraday-kalitka így stabil maradt, és hozzájárult a detektor pontos mérési eredményeihez, többek között a Higgs-Boson felfedezésében [6].

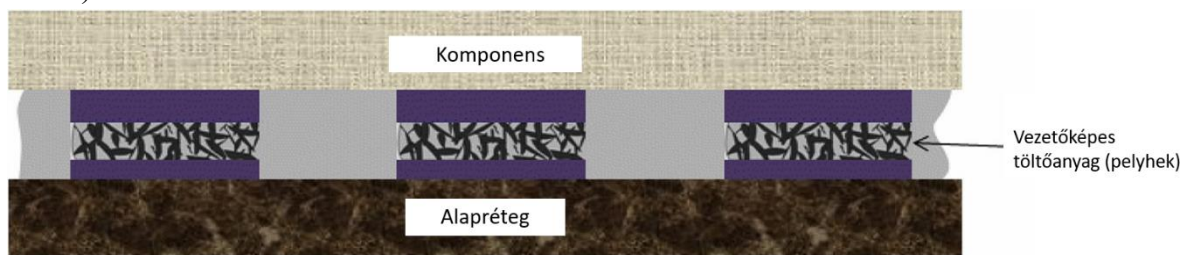
Ez az esettanulmány jó példa arra, hogyan alkalmazhatók a vezetőképes ragasztók extrém környezetben, ahol a megbízható elektromos kapcsolat és az alacsony impedancia kulcsfontosságúak [6].

2. Vezető Ragasztók Típusai

Az elektronikai szerelési technológiák fejlődése során két fő típusuk alakult ki, melyek különböző alkalmazási területeken és specifikációk mellett nyújtanak megoldásokat: az izotropikus vezető ragasztók (ICA-k) és az anizotropikus vezető ragasztók (ACA-k). Az alábbiakban részletesen bemutatásra kerülnek ezek a típusok, különös tekintettel szerkezeti sajátosságaikra és alkalmazási lehetőségeikre az elektronikai iparban.

2.1. Izotropikus Vezető Ragasztók (ICA-k)

Az izotropikus vezető ragasztók minden irányban vezetőképességet biztosítanak az elektromos töltések számára, tehát háromdimenziós, egyenletes vezetőképességet nyújtanak. Az ICA-k esetében a ragasztó mátrixában található vezető részecskék olyan mennyiségben vannak jelen, hogy az egymáshoz érve folyamatos, vezetőképés hálózatot képeznek (1. ábra).



1. ábra: Izotropikus Vezető Ragasztók (ICA) [2].

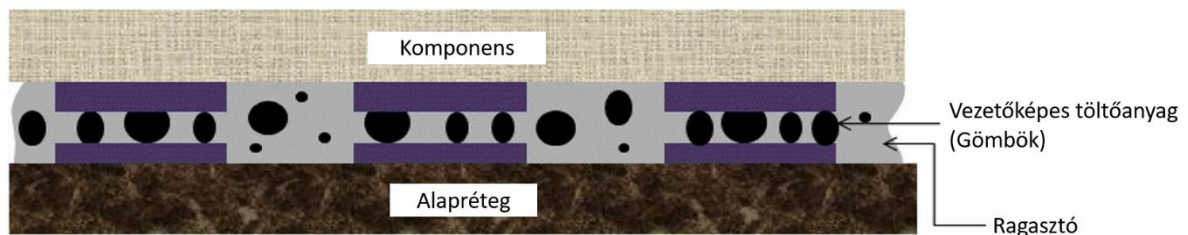
Használhatók elektronikai alkatrészek rögzítésére és vezetékek összekötésére: Az ICA-k alkalmasak olyan alkalmazásokhoz, ahol minden irányú vezetőképesség szükséges. Például áramköri alkatrészek csatlakoztatására, különösen műanyag és kerámia alapanyagoknál, ahol a forrasztás nem alkalmazható [1], [2], [3], [7], [8], [9], [10]. Finom áramköri kapcsolásokhoz: Az ICA-k használatának előnye, hogy kis geometriai pontosságú, finom és ultrafinom áramkörök esetén is jól alkalmazhatók, mivel precíz kijuttatást tesznek lehetővé [1], [2], [3], [7], [8], [9], [10].

Az ICA-k gyakran ezüst pelyheket tartalmaznak, amelyek biztosítják a magas vezetőképességet. Emellett epoxi alapú mátrixokat használnak, amelyek könnyen kezelhetők és jó tapadást biztosítanak. Az ICA-k számos előnye közé tartozik, hogy környezetbarát, alacsony hőmérsékleten feldolgozhatók, és többféle anyagra felvihetők, ami különösen előnyös az érzékeny elektronikai alkatrészek esetében [1], [2], [3], [7], [8], [9], [10].

2.2. Anizotropikus Vezető Ragasztók (ACA-k)

Az anizotropikus vezető ragasztók (ACA-k) egy irányban, tipikusan egy tengely mentén vezetnek, vagyis csak két szubsztrát közötti függőleges irányú elektromos kapcsolatot biztosítanak. Az ACA-k mátrixában a vezető töltőanyagok koncentrációja alacsonyabb, így a vezetőképesség csak a nyomás irányában jön létre. Ennek köszönhetően alkalmazásuk lehetővé teszi, hogy az egymással nem érintkező vezető részecskék miatt elkerülhető legyen az oldalsó rövidzár kialakulása (2. ábra) [1], [4], [10], [11], [12], [13], [14], [15].

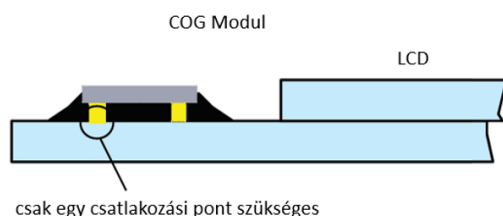
Az ACA-k fő alkalmazási területei:



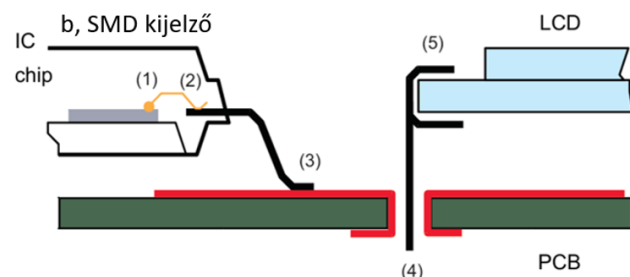
2. ábra: Anizotropikus Vezető Ragasztók (ACA) [2].

- LCD modulok és lapkák csatlakoztatása: Mivel az ACA-k kizárólag a Z-irányban biztosítanak vezetőképességet, ideálisan használhatók olyan finom csatlakozásokhoz, mint a chip-on-glass (COG) technológiákban alkalmazott összeköttetések, ahol csupán csak egy ragasztott csatlakozási pont szükséges, szemben a hagyományos (SMD) kijelzővel, ahol több csatlakozási pont szükséges (3. ábra).

a, COG LCD modul



csak egy csatlakozási pont szükséges



SMD kijelzők esetében öt csatlakozási pont szükséges:

- (1) és (2) huzal a chip és az IC lábai között,
- (3) forrasztás a nyomtatott áramkörti lapkához,
- (4) és (5) csatlakozási pont a PCB és az LCD között.

3. ábra: a) a COG modul alkalmazása, b) SMD kijelző alkalmazása

- Finom illesztési kapacitás: Az ACA ragasztók vezető részecskéinek különleges elrendezése miatt alkalmasak olyan alkalmazásokhoz is, ahol rendkívül finom illesztések szükségesek, így elkerülhető a hagyományos forrasztás által okozott hőkárosodás. Az ACA ragasztók gyakran gömb alakú fém részecskéket tartalmaznak, például arany vagy ezüst bevonatú műanyag, vagy üveggyöngyöket, amelyek képesek deformálódni a nyomás hatására, ezáltal növelve a kontaktfelületet. Ennek eredményeként jó elektromos vezetőképesség és alacsony ellenállás érhető el a két összekötött felület között [1], [4], [10], [11], [12], [13], [14], [15].

3. Az elektromosan vezető ragasztók összetevői

3.1. Egy-, illetve Kétkomponensű ragasztók

Az egy- és kétkomponensű ragasztók széles körben alkalmazott anyagok a mindennapi és ipari ragasztási feladatokban. Az egykomponensű ragasztók előre elkészített, közvetlenül használható anyagok, amelyek a környezet hatására (például hő, nedvesség) térhálósodnak, így gyors és egyszerű megoldást nyújtanak. A kétkomponensű ragasztók viszont két külön anyagból állnak – egy gyanta és egy keményítő –, amelyeket használat előtt kell összekeverni. E keverés indítja el a térhálósodási folyamatot, ami nagyobb szilárdságú, tartósabb kötést eredményez, ideálissá téve őket a nagy szilárdságot igénylő alkalmazásokhoz[1], [2], [7], [16], [17].

3.1.1. Kétkomponensű Ragasztók

A kétkomponensű epoxigyanta alapú ragasztók rendkívül stabilak és nagy hőmérsékleti tartományban működnek, így különösen előnyösek az elektronikai alkalmazásokban, ahol magas hőállóság és alacsony kontaktellenállás szükséges. A kétkomponensű rendszerek fő jellemzői[1], [2], [7], [16], [17].

- Magas hőmérsékleten stabilak: Az epoxigyanta alapú kétkomponensű ragasztók a hőmérséklet növekedésével is megtartják szilárdságukat és alakjukat, így ideálisak a nagy hőterhelésű környezetekben, például elektronikai alkatrészek és félvezetők rögzítésénél.

- Alacsony kontaktellenállás: A kétkomponensű ragasztók egyenletes, szoros érintkezést biztosítanak az összekapcsolt felületek között, így az elektromos ellenállás minimálisra csökken, ami javítja az elektromos teljesítményt.

- Hosszú élettartam és nagy szilárdság: A térhálósodási folyamat révén kialakuló struktúra lehetővé teszi, hogy a kétkomponensű ragasztók hosszú élettartammal és nagy szilárdsággal rendelkezzenek, ami különösen fontos az elektronikai összeköttetések stabilitása szempontjából[1], [2], [7], [16], [17].

3.1.2. Egykomponensű ragasztók

Az egykomponensű ragasztók egyszerűbbek és gyorsabban alkalmazhatók, mivel nem igényli a különböző komponensek összekeverését, így az előkészítésük és alkalmazásuk egyszerűbb és gyorsabb. Sok esetben nagyobb szilárdsággal rendelkeznek, mint a kétkomponensű ragasztók, előnyösek lehetnek kisebb hőterhelésű alkalmazásoknál, ahol az egyszerű használhatóság a fő szempont. Az egykomponensű rendszerek jellemzői[1], [2], [7], [16].

- Egyszerűbb kezelhetőség: Az egykomponensű ragasztók gyorsan felvihetők, mivel a kétkomponensű rendszerekhez képest nem igényelnek keverést. Ez gyorsabb feldolgozást tesz lehetővé a gyártási folyamatban.

- Korlátozott hőállóság: Az egykomponensű rendszerek gyakran alacsonyabb hőmérsékleten működnek megbízhatóan, ezért inkább kisebb hőterhelésű vagy alacsonyabb igénybevételű alkalmazásoknál használják őket, például kijelzőkben vagy érzékenyebb áramköri alkalmazásokban [1], [2], [7], [16].

3.2. Mátrixanyagok

Az elektromosan vezető ragasztók mátrixanyagai többféle típusba sorolhatók, attól függően, hogy milyen alkalmazási követelményeknek kell megfelelniük, például hőmérséklet, mechanikai igénybevétel és környezeti tényezők alapján. Az alábbiakban bemutatok pár mátrixanyagot és ezek főbb jellemzőit [1], [2], [7], [16], [17].

3.2.1. Epoxi Mátrix

Az epoxigyanták rendkívüli hő- és kémiai ellenálló képességgel rendelkeznek, amelyeket alacsony zsugorodás, kiváló mechanikai szilárdság, valamint megbízható tapadás egészít ki. Ezek az anyagok alapvetően biztosítják az alkatrészek stabilitását és hosszú élettartamát. [1], [2], [13], [16], [17].

3.2.2. ETPU Mátrix

A poliuretán mátrix egy különleges típusú termoplasztikus polimer mátrix. Kiemelkedő rugalmasságot és ütésállóságot biztosít, amely ideális a rugalmasságot igénylő elektronikai alkalmazásokban, például hajlítható áramkörök esetén. Ezenkívül vegyi ellenállásuk is figyelemreméltó. Az ETPU anyagok magas veszteségi tényezővel ($\tan \delta$) rendelkeznek, amely a hőmérséklet-függő csillapítási képességüket jelzi. Ez az anyagtulajdonság különösen hasznos olyan területeken, ahol rezgéscsillapításra és ütésállóságra van szükség, például precíziós elektronikai eszközökben vagy járműipari alkalmazásokban [1], [2]

3.2.3. Termoplasztikus Polimerek

A termoplasztikus polimerek mátrixai hőre lágyuló anyagok, amelyek kiváló rugalmasságot, feldolgozhatóságot és újrahasznosíthatóságot kínálnak. Alkalmazhatók rugalmas áramkörökben, hőérzékeny anyagok összekapcsolására és mechanikai rezgéscsillapításra. Előnyeik közé tartozik az alacsony feldolgozási hőmérséklet, az újrahasznosíthatóság és a rugalmasság, míg hátrányaik közé sorolható a hőmérséklettel szembeni korlátozott ellenállás és az alacsonyabb mechanikai szilárdság. A termoplasztikus mátrixok széles körben

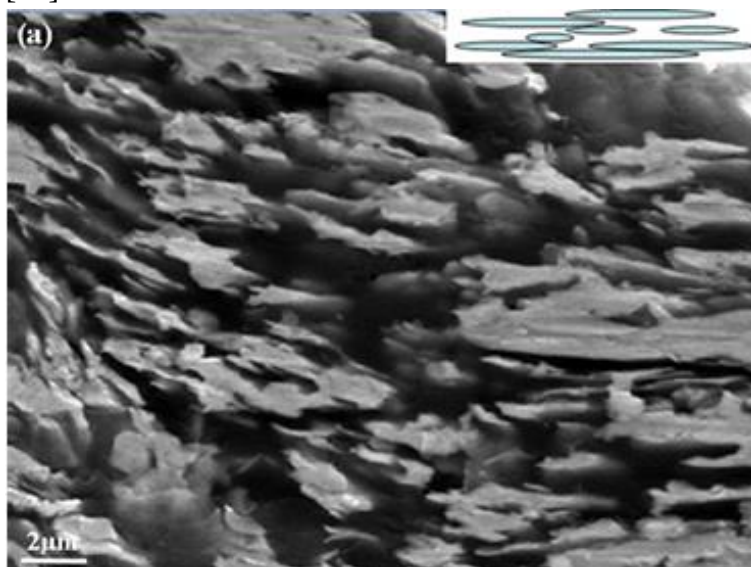
elterjedtek az elektronikai és ipari alkalmazásokban, különösen fenntartható megoldásokként[1], [2].

3.3. A vezető szemcsék, részecskék geometriája

A vezető szemcsék alakja jelentős hatással van az elektromos vezetőképességre, mivel az alak erősen befolyásolja az érintkezési felületek kialakulását. A szemcsék alakja – akár pelyhes, gömbölyű vagy szálas formáról van szó – meghatározza, hogy az egyes szemcsék milyen mértékben érintkeznek egymással és a körülöttük lévő mátrixanyaggal és az összekötendő felületekkel. Ez az érintkezési hálózat alapvető szerepet játszik a vezetőképesség kialakításában és fenntartásában, mivel minél nagyobb a szemcsék felülete és minél több a kapcsolódási pont, annál jobb az áramvezetési képesség. A vezető szemcsék alakjának kiválasztása ezért mindig az adott alkalmazás követelményeihez igazodik, figyelembe véve az anyag mechanikai, elektromos és szerkezeti stabilitásra vonatkozó elvárásait[1], [2], [4], [10], [16], [17], [18].

3.3.1. *Pehely (flake) alakú részecskék*

A pehely alakú vezetőszemcséket széles körben alkalmazzák olyan iparágakban, ahol a nagy fajlagos felület különösen fontos. Ezek a részecskék vékonyak és laposak, ami lehetővé teszi számukra, hogy kis mennyiségben is jelentős érintkezési felületet biztosítsanak, ezáltal növelve az elektromos vezetőképességet (4. ábra) [1], [2], [3], [10], [13], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23].



4. ábra: Az elektromosan vezető töltőanyagok eloszlása [13].

Egyik jelentős alkalmazási területük a festékek és pigmentek gyártása, ahol a fémes hatású pelyhek optikai visszaverő képessége különösen értékes, például autóiipari fényezésekben. Elektrokémiai elektródákban, például akkumulátorokban és tüzelőanyag-

cellákban, a pehely alakú részecskék nagy felülete elősegíti a gyorsabb kémiai reakciókat, így növeli az elektromos kapacitást és hatékonyságot[1], [2], [3], [10], [13], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23].

A napelemek gyártása során is kiemelt szerepet kapnak, mivel ezek az ezüst pelyhek javítják a fémes rétegek vezetőképességét, csökkentik az elektromos ellenállást, és így hozzájárulnak az energiahatékonyság növeléséhez. Ezek a tulajdonságok teszik a pehely alakú vezetőszemcséket különösen hasznossá olyan alkalmazásokban, ahol a magas vezetőképesség és a nagy érintkezési felület alapvető követelmény[1], [2], [3], [10], [13], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23].

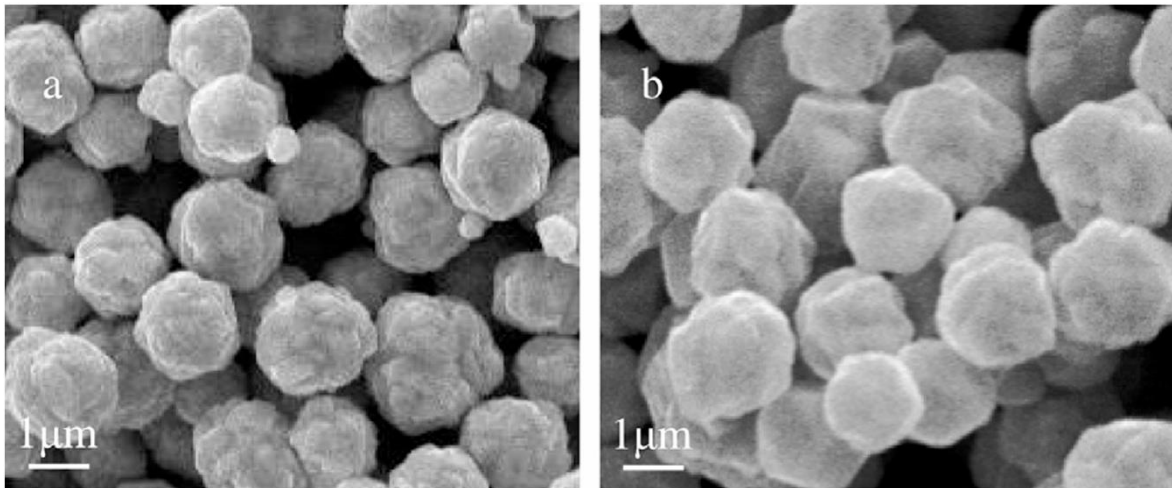
Alexandros és társai egy esettanulmányban leírják, hogy a pehely részecskék előállításához különböző mechanikai őrlési eljárásokat használnak, amelyek célja a részecskék ellapítása, hogy magas átmérő-vastagság arányt érjenek el. A hagyományos módszerek közé tartozik az attritor őrlés, amely során egy keverőrudat és csapokat használnak az őrlőközeg és a célrészecskék keverésére. Az őrlési folyamat során a golyók közötti véletlenszerű ütközések lapított részecskéket eredményeznek. Ez a módszer azonban jelentős mennyiségű energiát igényel, hosszú időt vesz igénybe (akár több órát is), és folyékony közeg alkalmazását követeli meg, ami reakcióba léphet a részecskékkel. A rezgő malmok hasonló elven működnek, de magas frekvencián mozgó golyókat használnak, amelyek nagy kinetikus energiát közvetítenek a részecskékre. Bár ez a módszer nem igényli folyékony közeg használatát, a feldolgozási idő még mindig jelentős lehet (akár 8 óra is)[18].

Ezekkel szemben egy új, nagysebességű rezgő malmot fejlesztettek ki, amely jelentősen csökkenti az őrlési időt és az energiafogyasztást. Az eljárás során az őrlés egy zárt őrlőcsőben történik, ahol a golyók erős nyomó- és nyíróerőket fejtenek ki a részecskékre, ellapítva azokat. A golyók mozgását a cső nagyfrekvenciás rezgései generálják, ami kaotikus ütközéseket eredményez. Ez a módszer csupán két perc alatt képes mikrométer vastagságú pehely részecskéket előállítani, például magnézium részecskék esetében 12 μm vastagságot elérve. Az alkalmazott golyóméret, a részecskék töltési súlya és az őrlési idő mind közvetlenül befolyásolja a részecskék méretét és alakját. Nagyobb golyók erősebb kompressziós hatást fejtenek ki, ami vastagabb és szélesebb részecskéket eredményez, míg kisebb golyók inkább a részecskék fragmentációját okozzák. Ez az új eljárás folyékony közeg vagy kémiai adalékanyagok nélkül képes hatékonyan előállítani pehely alakú részecskéket, ami jelentős előnyt jelent a hagyományos módszerekkel szemben[18].

3.3.2. Gömb alakú részecskék

Gömb alakú részecskék szintén gyakoriak, különösen a finom csatlakozásoknál. Széles körben használják olyan alkalmazásokban, mint például a szolár cellákhoz készült vezető ragasztók, mivel ezek homogénebb, egyenletesebb eloszlást tesznek lehetővé, így javul a vezetőképesség. Az ezüstgömbök például kiegészítik az ezüst pelyheket a vezető ragasztókban, kitöltik a pelyhek közötti réseket, és javítják az anyagok érintkezési pontjait, ezáltal csökkentve az ellenállást és növelve a vezetőképességet.

A gömb alakú részecskék fő előnye, hogy korlátozzák az elektromos érintkezést az X - Y síkban, miközben a Z-irányban hatékony vezetőképességet biztosítanak. Ez a tulajdonság különösen értékes olyan alkalmazásokban, mint a lapos paneles kijelzők, flip-chip technológiák, valamint rádiófrekvenciás azonosítók (RFID) antennáinak érintkezése (5. ábra). Az ilyen rendszerekben a hőérzékeny szubsztrátumok, például üveg vagy műanyag, hagyományos forrasztási technikákkal nem köthetők össze, ezért az ACA ragasztók jelentős előnyt jelentenek. esetében [1], [4], [13], [22], [24].



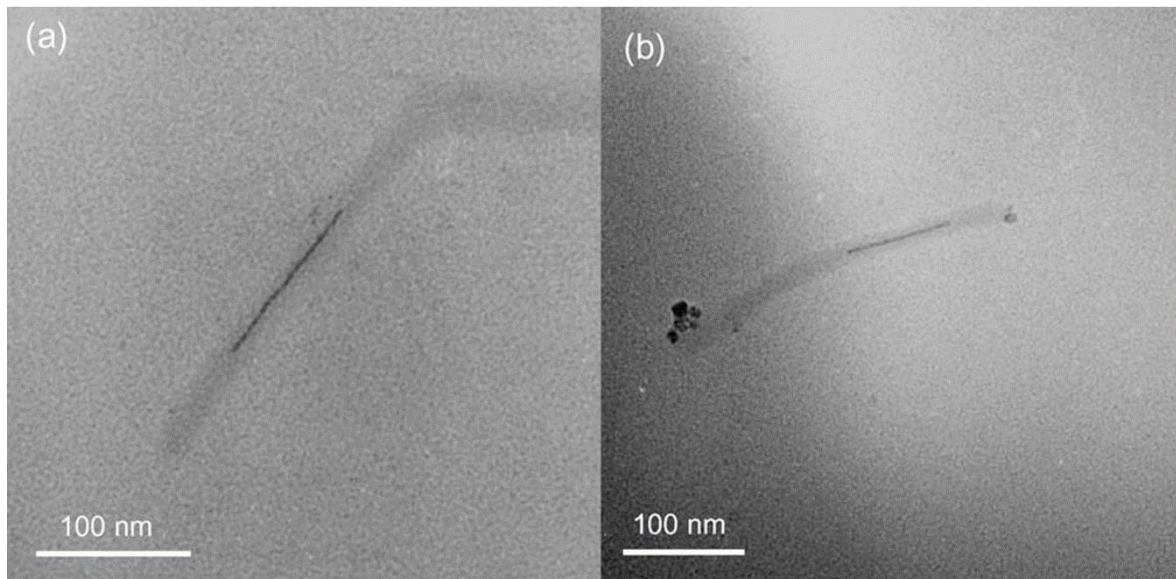
5. ábra: SEM képek ezüstporról [22].

Egy tanulmány szerint Az ilyen részecskék előállításához kémiai redukciós módszereket alkalmaznak, amely során például ezüst-nitrátot használnak alapanyagként, aszkorbinsavat redukálószerként, és arabgumit diszpergáló anyagként. Az előállítási paraméterek, például a pH-érték, a keverési idő és az anyagok koncentrációja módosításával a részecskék mérete és sűrűsége szabályozható [1], [4], [13], [22], [24].

3.3.3. Szál, rúd alakú vezetők

A nanoszálak, különösen a réz és nikkel nanohuzalok, számos előnyt kínálnak, amelyek ideálissá teszik őket különféle technológiai alkalmazásokhoz. Hosszúkás, vékony alakjuk nagy fajlagos felületet eredményez, ami növeli a vezetőképességet, és javítja a hő- és elektromos áram vezetését. Ez a tulajdonság különösen előnyös az érzékelőkben és elektródákban, ahol a nagy felületi érintkezés kritikus. Emellett a réz és nikkel kiváló elektromos vezetők, és a nanoszálak kis méretük révén alacsonyabb ellenállást biztosíthatnak, mint a hagyományos vezető anyagok, ami csökkenti az veszteségeket és növeli az eszközök hatékonyságát [1, 2, 9, 23, 25-29].

A nanoszálak mechanikai stabilitást és rugalmasságot is nyújtanak, ami előnyös a flexibilis elektronikában vagy apró vezető struktúrákban való alkalmazásuk során. Ezek az anyagok ellenállnak a környezeti hatásoknak, például a hőingadozásoknak vagy az oxidációnak, így hosszú távú stabilitást biztosítanak az eszközökben. Szálas szerkezetüknek köszönhetően könnyedén integrálhatók mikroszerkezetekbe és nanoelektronikákba, ami különösen alkalmassá teszi őket a nanoelektronikában, szenzorokban és napelemekben való felhasználásra (6. ábra) [1], [2], [9], [25], [26], [27], [28].



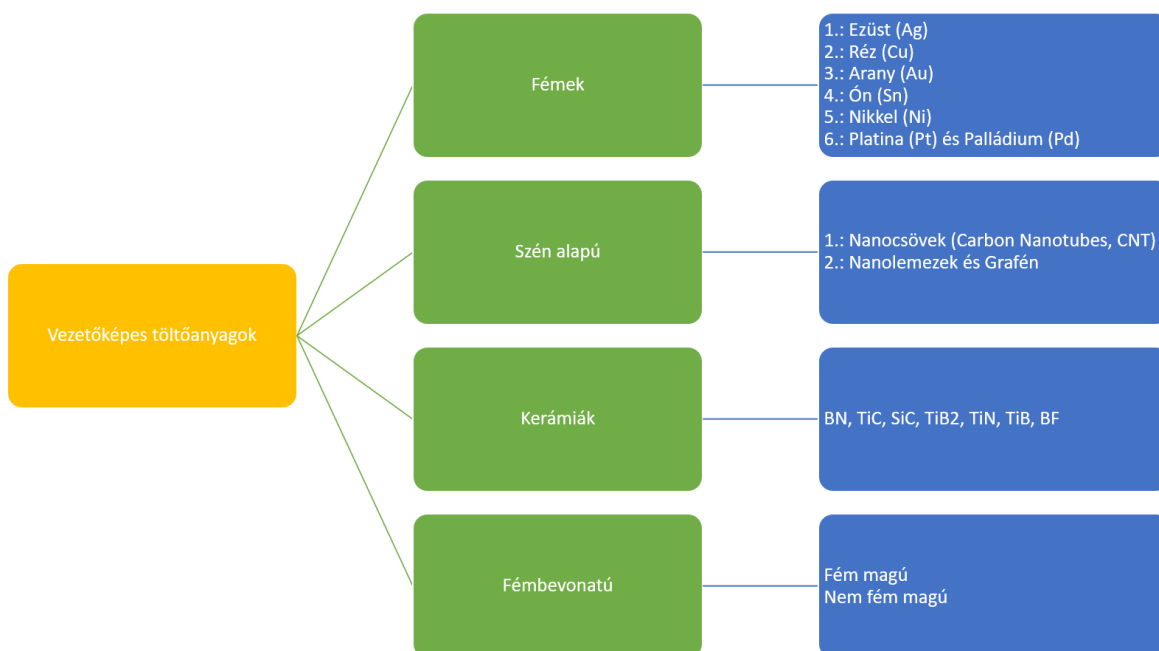
6. ábra: TEM mikroszkópos felvétel réz nanovezetékekről a TMV részecskék központi csatornájában. (a) A sötét vonal egy 3 nm átmérőjű és 115 nm hosszú réz nanovezetéknek felel meg [27].

A nanoszálak különösen jól alkalmazhatók nagy precizitású eszközök, például tranzisztorok, érzékelők és mikroáramkörök gyártásához, ahol a kis méret és nagy vezetőképesség alapvető követelmény. Az egyenes szerkezetű nanoszálak pontosabb és

gyorsabb jelátvitelt tesznek lehetővé, amely az elektronikai fejlesztések, az energiatárolás és a különféle érzékelők terén is új lehetőségeket nyit meg[1], [2], [9], [25], [26], [27], [28].

3.4. A vezető szemcsék anyaga

A vezető ragasztók egyik legfontosabb összetevője a vezetőképességet biztosító anyagok kiválasztása, mivel ezek alapvetően meghatározzák a ragasztók elektromos teljesítményét, mechanikai tulajdonságait és alkalmazhatóságát. A vezetésre használt anyagok típusa, formája és koncentrációja kulcsszerepet játszik abban, hogy az adott ragasztó miként fog viselkedni különböző környezetekben és terhelési körülmények között. Az alábbiakban részletesen bemutatásra kerülnek azok az anyagok, amelyek leggyakrabban használatosak a vezető ragasztók gyártásában, kiemelve ezek tulajdonságait és hatásait a ragasztók teljesítményére és alkalmazási területeire (7. ábra).



7. ábra: Vezetőképes töltőanyagok típusai [2].

3.4.1. Ezüst

Az ezüst kiemelkedő elektromos vezetőképessége miatt az egyik legkeresettebb fém a vezetőanyagok között. Rendkívül alacsony fajlagos ellenállással rendelkezik, ami azt jelenti, hogy hatékonyan vezeti az elektromos áramot. Ez az egyedi tulajdonság különösen előnyös a mikroelektronikai alkalmazásokban, például áramkörök, vezető paszták és nyomtatott áramkörök gyártásában, ahol a hatékonyság és a stabilitás kulcsfontosságú. Az ezüst gyakran található meg rúd, pehely vagy gömb alakú formában a különféle ipari anyagokban, mivel ezek lehetővé teszik a nagy érintkezési felület kialakulását, ami javítja az elektromos kapcsolódásokat[1], [2], [3], [9], [10], [13], [19], [20], [21], [22], [30].

Az ezüst ezenfelül kémiai stabilitása miatt is értékes, mivel ellenáll az oxidációnak, így hosszú távon is fenntartja vezetőképességét és megbízhatóságát, különösen olyan alkalmazásokban, ahol a korrózió elkerülése fontos. Az ezüst kiváló hővezető képessége szintén hozzájárul népszerűségéhez az elektronikában és az energiatároló rendszerekben, ahol a hőkezelés és -elvezetés kulcsfontosságú. Ezen tulajdonságok összessége miatt az ezüst az egyik legkedveltebb vezetőanyag a precíziós eszközökben, napelemekben, LED -ekben és számos más olyan alkalmazásban, ahol a magas elektromos és hővezetési követelmények dominálnak[1], [2], [3], [9], [10], [13], [19], [20], [21], [22], [30].

3.4.2. Réz

A réz széles körben alkalmazott vezetőanyag a vezetőképes ragasztókban, elsősorban alacsony költsége és kiváló elektromos vezetőképessége miatt. A réz részecskék, gyakran pelyhek vagy nanoszálak formájában fordulnak elő. A réz vezető szemcsék különösen alkalmasak az olyan alkalmazásokban, ahol nagy vezetőképesség és megbízhatóság szükséges, például áramkörüi lapok, elektromos érintkezők és egyéb mikroelektronikai eszközök összeszerelésénél. A réz azonban hajlamos a korrózióra, ami akadályozhatja a hosszú távú stabilitását. A vezetőképes ragasztókban ennek ellenére gyakran alkalmazzák különféle kezelésekkel és bevonatokkal kombinálva, például ezüsttel vagy egyéb korróziógátló anyagokkal. Ezek a bevonatok megvédik a rézrészecskéket a nedvességtől és az oxigéntől, ami megakadályozza az oxidációt, és biztosítja a vezetőképesség hosszú távú fennmaradását [1], [2], [16], [17], [23], [26], [27].

Az ilyen korrózióvédelemmel ellátott réztöltőanyaggal rendelkező ragasztók költséghatékony alternatívát kínálnak a drágább ezüst alapú ragasztókhoz képest, miközben kiváló vezetőképességet biztosítanak. Ennek eredményeként a rézalapú vezetőképes ragasztók egyre népszerűbbek az elektronikai iparban, különösen azokban az alkalmazásokban, ahol szükséges a költséghatékonyság, de fontos a nagy teljesítmény és tartósság is [1], [2], [16], [17], [23], [26], [27].

3.4.3. Arany

Az arany, mint vezető anyag, kiváló elektromos és kémiai stabilitása miatt fontos szerepet tölt be a vezetőképes ragasztókban, különösen az olyan alkalmazásokban, ahol hosszú távú megbízhatóság és korrózióvédelem szükséges. Az arany jól ellenáll az oxidációnak, nem korrodálódik könnyen, és vegyi reakciók hatására sem változik, ami tartós elektromos kapcsolatot biztosít, különösen a nagy teljesítményű és precíziós elektronikai eszközökben.[1], [2], [10], [11], [25], [26], [28]

Gyakran vékony aranybevonatot használnak olyan vezető részecskéken, mint a nikkel vagy réz. Ez a bevonat javítja a vezetőképességet, miközben biztosítja, hogy a ragasztóanyag ne veszítse el elektromos tulajdonságait még nagy hőmérséklet-ingadozások vagy agresszív környezeti hatások mellett sem. Az arany részecskék különösen hasznosak mikroelektronikai és orvosi alkalmazásokban, ahol az érintkezők és csatlakozók hosszú élettartama és megbízhatósága alapvető fontosságú. [1], [2], [10], [11], [25], [26], [28]

Az arany magas költsége miatt azonban gyakran csak vékony rétegben használják, különösen olyan helyzetekben, ahol kritikus az oxidáció elleni védelem és a magas vezetőképesség fenntartása. Az aranyalapú vezető ragasztók tehát főként az űrtechnológiában, a katonai és az orvosi elektronikai eszközökben találhatók meg, ahol a költség kevésbé fontos tényező, mint a megbízhatóság és a hosszú távú stabilitás. [1], [2], [10], [11], [25], [26], [28]

3.4.4. Ón

Az ón fontos szerepet játszik a vezetőképes ragasztókban, különösen, mint alacsony olvadáspontú töltőanyag. Mivel az ón könnyen olvad, gyakran kombinálják olyan fémekkel, mint a réz vagy más magasabb olvadáspontú anyagok, így a ragasztó anyagban mikroméretű metallurgiai kötések jöhetnek létre. Ez a kombináció stabil elektromos kapcsolatot biztosít, amely ellenáll a hőhatásoknak és magas páratartalomnak is. Az ón-alapú ragasztókban a metallurgiai kötések segítenek fenntartani az elektromos vezetőképességet még intenzív használati körülmények között is, például magas hőmérsékleten [1], [2], [10], [16], [17].

Az ón-lapocskák és gömbök a ragasztókban általában kis méretük miatt hatékony kapcsolatot biztosítanak, anélkül, hogy az anyag túlságosan megváltoztatná a mechanikai tulajdonságait. Az ón kompatibilis más fémbevonatokkal, például rézzel és ólommal, és az ilyen vegyületek alacsony hőmérsékleten létrejövő kötések során különösen előnyösek, mivel lehetővé teszik a megbízható elektromos kötést alacsonyabb feldolgozási hőmérsékleten. Az ónos vezetőképes ragasztók sokoldalú és költséghatékony megoldást kínálnak, különösen olyan esetekben, ahol alacsony hőmérsékleten kell létrehozni stabil elektromos kapcsolatokat, és ahol fontos az anyagok kompatibilitása és a metallurgiai kötések létrehozása, illetve ahol költséghatékonyság is egy jelentős szerepet tölt be [1], [2], [10], [29], [30], [31].

3.4.5. Nikkel

A nikkel gyakran használt vezető anyag a ragasztókban, mivel jó elektromos tulajdonságokat és korrózióval szembeni ellenállást biztosít, bár alacsonyabb

vezetőképességgel rendelkezik, mint az ezüst vagy arany. A nikkelt részecskék általában gömb alakban vagy pehelyként kerülnek a ragasztókba, ami segít stabil, tartós elektromos csatlakozásokat létrehozni. A nikkelt magas keménysége és ellenállása az oxidációval szemben előnyös, mivel az oxidációs folyamatok lassabbak, így kevésbé hajlamosak az időbeli vezetőképesség romlására. Ugyanakkor az oxidáció miatti magasabb ellenállás miatt ezeket a ragasztókat gyakran olyan helyeken alkalmazzák, ahol nem elsődleges szempont a maximális vezetőképesség.

A nikkelt további előnye, hogy mágneses tulajdonságai lehetővé teszik az irányított elektromos vezetőképesség (anizotropikus vezetőképesség) elérését, amikor mágneses tér alkalmazásával rendezik el a részecskéket. Ez különösen hasznos az olyan összeköttetésekben, ahol a vezetőképességnek egy adott irányban kell erősnek lennie, például chip összeköttetések vagy finom csomópontú kapcsolódások esetén. Továbbá, a nikkelt gyakran bevonják arannyal vagy ezüsstel, hogy javítsák a vezetőképességet és növeljék az ellenállást a korrózióval szemben, ami megbízhatóbbá teszi azokat a ragasztókat, amelyek hosszú távú elektromos stabilitást igényelnek. Ennek eredményeként a nikkeltalapú vezető ragasztók jó kompromisszumot kínálnak a költséghatékonyság, a korrózióállóság és a mechanikai szilárdság között, ami különösen fontos olyan ipari alkalmazásokban, ahol a megbízhatóság elsődleges szempont [1], [2], [16], [17], [24].

3.4.6. Platina és Palládium

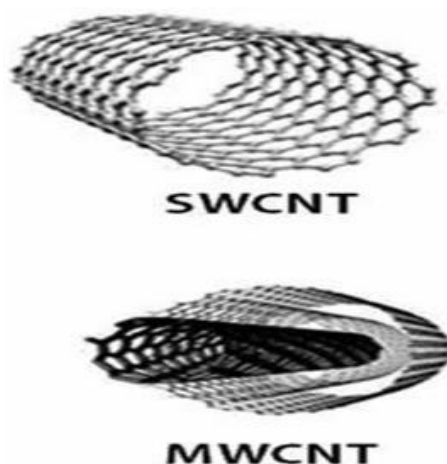
A platina és a palládium a vezetőképes ragasztókban kiváló stabilitást és korrózióállóságot biztosítanak, ami különösen fontos a nagy megbízhatóságot igénylő ipari és orvosi alkalmazásoknál. Mindkét fém jelentős előnye, hogy rendkívül ellenálló az oxidációval szemben, még nagy hőmérsékleten és nedves környezetben is, ami tartós vezetőképességet eredményez. A palládium különösen jó elektromos tulajdonságokkal bír, és az ezüsstel együtt gyakran alkalmazzák olyan rendszerekben, ahol hosszú távú elektromos stabilitásra van szükség, például csatlakozásokban és érzékelőkben. A platina viszont az orvosi eszközökben előnyös, mivel nem mérgező és ellenáll a testnedvekkel való érintkezésnek, miközben megbízható elektromos kapcsolatot biztosít [1], [2], [16], [17], [23].

A platina és palládium bevonatú részecskék gyakran használtak olyan alkalmazásokban, ahol nemcsak elektromos vezetőképességet, hanem mechanikai stabilitást is igényelnek. Az ilyen bevonatokkal ellátott ragasztók jól tűrik a magas hőmérsékletet és az időjárási hatásokat, mivel megvédik a belső vezető anyagot az oxidációtól. Ennek eredményeképpen

a platina- és palládiumalapú ragasztók széles körben alkalmazhatók olyan területeken, ahol a környezeti hatások minimalizálása és a hosszú távú megbízhatóság alapvető fontosságú[1], [2], [16], [17], [23].

3.4.7. Szén nanocsövek (Carbon Nanotubes, CNT)

A szén nanocsövek (CNT) kiváló választásként szolgálnak vezetőképes ragasztókban, mivel egyedülálló elektromos és mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek. A CNT-k grafitrétegekből álló hengeres struktúrák, amelyek rendkívül alacsony sűrűségűek, de hosszú oldalarányt biztosítanak, így lehetővé teszik a perkolációs küszöb elérését alacsony töltőanyag-százalékon belül. Ez azt jelenti, hogy a kívánt elektromos vezetőképeség alacsony töltőanyag-mennyiséggel is elérhető, ami csökkenti a ragasztó viszkozitását és javítja a mechanikai (8. ábra) [1], [2], [4], [13], [17], [29].



8. ábra: Szénalapú vezető töltőanyagok: (a) egyfalú szén nanocső (SWCNT) és többfalú szén nanocső (MWCNT) [2].

A CNT-k vezetőképeségi tulajdonságait gyakran javítják az ezüst töltőanyaggal kombinálva, ami segít csökkenteni a kontaktellenállást és stabilabb elektromos hálózatot eredményez. Ezzel a megközelítéssel a CNT-k növelhetik a vezetőképeséget a ragasztóban, különösen, ha a hagyományos töltőanyag, például az ezüst alacsony töltési szinten van. Ezen túlmenően a CNT-k mechanikai stabilitást és szilárdságot adnak a ragasztóknak, mivel magas szakítószilárdságuk van, így növelik a kötés tartósságát. Azonban a CNT-k összefogó tulajdonságaik miatt nehezen diszpergálhatók a mátrixban, ezért megfelelő felületkezelés szükséges a szétválasztásukhoz és jobb keveredésükhöz, ami így javítja a ragasztóanyag elektromos és mechanikai tulajdonságait is[1], [2], [4], [13], [17], [29].

3.4.8. Nanolemezek és Grafén

A nanolemezek és a grafén vezetőképességet ragasztókban való alkalmazása rendkívül ígéretes, mivel ezek az anyagok kiváló elektromos és mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek. A grafén egy kétdimenziós, méhsejt-szerkezetű szénalapú anyag, amely kiváló elektromos és hővezetési képességgel bír. Ennek köszönhetően, akár alacsony töltési szinten is elérhető a kívánt vezetőképesség a ragasztóanyagban, ami csökkenti a viszkozitást, miközben stabil elektromos kapcsolatot biztosít. A grafén kivételesen magas fajlagos felületének köszönhetően nagy hatékonysággal tud hozzájárulni a vezetőképességhez.

A grafén nanolemezek (GNP) hasonló módon hatékony elektromos hálózatot hoznak létre a ragasztóban, és jól alkalmazhatók más töltőanyagok, például ezüst vagy réz részecskék mellett is. Ezek az anyagok növelik a mechanikai szilárdságot és hőállóságot is, ami javítja a ragasztók teljesítményét. A GNP alapú ragasztók különösen jó alternatívát jelentenek az olyan iparágak számára, ahol nagy hőállóság és elektromos stabilitás szükséges.

Ugyanakkor a grafén szétoszlásának kihívása miatt gyakran különféle felületkezelési technikákat, például kémiai funkcionálisításokat alkalmaznak a részecskék homogén eloszlásának biztosítása érdekében, amely a ragasztó elektromos és mechanikai tulajdonságait is optimalizálja [1], [2], [30].

4. A térhálósítás hatása az elektromosan vezető ragasztott kötés tulajdonságaira

4.1. Térhálósítás definíciója és jelentősége

A térhálósítás egy olyan kémiai folyamat, amelynek során a polimerláncok között keresztkötések jönnek létre, ezzel egy stabil, háromdimenziós hálós szerkezetet hozva létre. Mivel a polimerláncok között létrejövő kötési hálózat egységes szerkezetet biztosít, az anyag kevésbé hajlamos a repedésre, törésre vagy deformálódásra. Ez a keresztkötési hálózat jelentős mértékben növeli az anyag mechanikai szilárdságát, tartósságát, hőállóságát, mindemellett javítja az anyag ellenállóképességét. Az elektromosan vezető ragasztók (ECA - k) esetében a térhálósítás kulcsfontosságú szerepet játszik, mivel ezek az anyagok gyakran ki vannak téve szélsőséges környezeti hatásoknak, mint például hőingadozásnak, mechanikai terhelésnek vagy vegyi anyagokkal való érintkezésnek, amelyek az ipari alkalmazásokban gyakoriak. A stabil térhálós szerkezet lehetővé teszi, hogy a ragasztók ezeknek a hatásoknak ellenálljanak, így biztosítva tartós kötést és megbízható vezetőképességet[1], [2], [8], [12], [16], [17], [32].

4.2. A térhálósítás hatása a hőállóságra

A térhálósítás révén létrejött háromdimenziós hálószerkezet növeli az anyag olvadási pontját, és növeli a hőstabilitást. Ez azt jelenti, hogy a térhálósított ragasztók megtartják szilárdságukat és szerkezeti integritásukat még magas hőmérsékleten is. Az ECA-kban, ahol gyakran szükséges a nagy hőállóság, a térhálósított szerkezet lehetővé teszi, hogy az anyag ne deformálódjon és ne veszítse el vezetőképességét a hőhatás következtében. A hőállóság azért is fontos, mert megakadályozza a polimerek lágyulását és formájuk elvesztését, ami hosszú távon csökkenthetné a kötés szilárdságát[1], [2], [8], [12], [17], [32]

4.3. A magas hőmérséklet előnyei a térhálósítás során

A térhálósítási folyamatban a polimerláncok keresztkötéseinek kialakításához egy minimális energiaszint, az úgynevezett aktiválási energia szükséges. Magasabb hőmérsékleten a polimerláncok energiaszintje magasabb, ez azt jelenti, hogy a kémiai reakciók sebessége nő, így a térhálósítási folyamat rövidebb idő alatt valósul meg. A magasabb hőmérséklet intenzívebb molekuláris mozgást eredményez, amely lehetővé teszi a keresztkötések gyorsabb és hatékonyabb kialakulását. Emellett a magasabb hőmérséklet

csökkenti a viszkozitást, így az anyag könnyebben folyik és mélyebben képes behatolni az alapfelület pórusaiba, ami jobb kötést eredményez.

AD Loguercio és társai egy esettanulmányban megfigyelték, hogy a magasabb hőmérsékletű adhezívek egyenletesebb, vékonyabb réteget képeztek, és nanorészecskék behatolásának mértéke nőtt magasabb hőmérsékleten, ami javította az elektromos ellenállást[32].

A magasabb hőmérséklet biztosítja, hogy a térhálósítás során kevesebb feszültség és kisebb zsugorodás jelentkezzen, így az anyag minősége és élettartama is megnő, a szerkezete szilárdabbá és homogénebbé válik, mivel a reakciók jobban lezajlanak, ami kevesebb mikroszerkezeti hiányosságot, hibát eredményez mindemellett csökkenti a ragasztás időigényét, csökkentve a gyártási időt, ami gazdaságosabb termelési folyamatot eredményez. Ez különösen előnyös nagy mennyiségű termelés esetén, ahol a gyorsabb feldolgozási idő alacsonyabb költségeket eredményez. Az egyenletes keresztmetszések biztosítják, hogy a polimerláncok között nincsenek olyan gyenge pontok, amelyek károsíthatnák az anyag szerkezeti integritását. Ennek eredményeként a térhálósított polimer nemcsak erősebb, hanem tartósabb is, mivel a belső struktúrája jobban ellenáll a külső hatásoknak, például a mechanikai terhelésnek és a hőingadozásnak [1], [2], [8], [10], [17], [32].

A magasabb hőmérséklet további előnye, hogy a polimerizáció során keletkező szabad gyökök és láncreakciók nagyobb valószínűséggel találkoznak, ezáltal teljesebben reakcióba lépnek egymással. Ez a folyamat eredményeként egy homogénebb térhálósított szerkezet alakul ki, amely hosszú távon stabil kötést eredményez. A kísérletek azt is kimutatták, hogy a 37–50°C közötti hőmérsékleten kezelt ragasztóknál alacsonyabb pórusképződés figyelhető meg, ami jelzi, hogy a magasabb hőmérséklet segít csökkenteni a polimerizáció közbeni inhomogenitásokat[1], [2], [8], [10], [17], [32].

5. Az összeszorítási erő hatása az elektromos ellenállásra

Az elektromosan vezető ragasztók vezetőképességét jelentősen befolyásolja az összenyomási erő mértéke. Az erő növelésével a kontaktusfelület a vezető szemcsék között megnő, mivel több szemcse érintkezik egymással. Ez a kontaktusfelület-növekedés az elektromos ellenállás csökkenését eredményezi, mivel az elektronok több összekötő útvonalon keresztül tudnak áthaladni a ragasztórétegen. A nyomás hatására tehát a részecskék közötti távolság csökken, és a vezetési útvonalak hosszának rövidülése miatt a vezetőképesség javul. Az összenyomás hatása különösen jelentős, ha az alkalmazott ragasztóréteg vastagsága csökken, hiszen a vastagság csökkenése tovább rövidíti az elektronok által megteendő utat, ami alacsonyabb ellenállást és hatékonyabb vezetést eredményez. Az alkalmazott nyomás mellett fontos a ragasztóréteg vastagságát is figyelembe venni. A vastagabb réteg ugyanis csökkentheti a részecskék közötti érintkezést, így csökkentve a vezetőképességet. Ezért javasolt a vékonyabb, 0,1–0,2 mm-es rétegek használata, amelyek jobb kontaktusokat biztosítanak a töltőanyag szemcséi között[1], [10], [16].

5.1. A ragasztóanyag viselkedése és a szemcsék alakváltozása

Az összenyomási erő hatására a vezető szemcsék bizonyos mértékben deformálódnak. Ez a deformáció növeli a kontaktusok számát és felületét. Az alakváltozáson keresztül nagyobb felületek kerülnek érintkezésbe, ennek eredményeként több elektromos kapcsolat jön létre, ami a vezetőképesség további javulását idézi elő. Az alakváltozás mellett a szemcsék elrendeződése is jelentős szerepet játszik a vezetési útvonalak hatékonyságában. Az összenyomás során a szemcsék közelebb kerülnek egymáshoz, és egyes részecskék elmozdulhatnak úgy, hogy jobban összehangolt vezetési hálózatot alkossanak, amely még hatékonyabbá teszi az elektromos kapcsolatot[1], [10], [16].

5.2. Felületek közeledése és a kontaktellenállás csökkenése:

Az összenyomási erő növelése nem csak a szemcsék közötti távolságot csökkenti, hanem a ragasztott felületek közötti rést is mérsékli. A ragasztott elemek közötti távolságcsökkenés által a teljes ragasztóréteg vastagsága csökken, ami rövidebb vezetési utat eredményez a ragasztóanyagban. Az eredmény: kisebb kontaktellenállás, mivel az elektromos áram könnyebben áthalad a rövidebb és hatékonyabb vezetési útvonalakon[1], [9], [10], [16].

5.3. Az összenyomási erő alkalmazására vonatkozó ajánlások:

Az elektromos kapcsolatok megbízhatóságának fenntartása érdekében javasolt olyan összenyomási erőt alkalmazni, amely elégséges a stabil kapcsolat fenntartásához, de nem okoz túlzott mechanikai feszültséget a ragasztóanyagban. Több forrás szerint az optimális nyomásfokozat az, amely elegendő a szemcsék közötti érintkezés növelésére, de nem vezet a ragasztandó anyagok túlzott deformálódásához vagy kopásához. Bizonyos esetekben például 1 Newton körüli összenyomási erőt javasolnak, hogy biztosítsák a stabil elektromos kapcsolatot, és elkerüljék a ragasztó elmozdulását[1], [10], [16], [29]

5.4. A ragasztott kötés hosszú távú stabilitás:

Fontos megjegyezni, hogy az erős összenyomás hosszú távon mechanikai kopást és relaxációs jelenségeket idézhet elő a ragasztóanyagban. Ez különösen igaz olyan helyzetekben, ahol hőmérsékletváltozásoknak és mechanikai igénybevételnek van kitéve a ragasztott kapcsolat. Az ilyen kopás és relaxáció növelheti az ellenállást az idő múlásával, ami az elektromos kapcsolat stabilitásának csökkenéséhez vezethet. Ezen okból kifolyólag fontos a megfelelő összenyomási erő alkalmazása, hogy elkerüljük a kapcsolat idő előtti elhasználódását és az elektromos ellenállás növekedését. [1], [4]

A kopás és relaxáció elsődleges oka az, hogy a ragasztóanyag folyamatos mechanikai terhelés alatt áll, amely belső stresszt generál az anyagban. A mechanikai igénybevétel hatására a ragasztóanyag szerkezete fokozatosan károsodik. Ez a folyamatos terhelés, különösen hőmérsékletváltozásokkal együtt, gyorsítja a ragasztóanyag, főként a mátrixanyag szerkezeti gyengülését (repedések), így fokozatosan csökkentve a mechanikai stabilitást, ami később anyagfáradáshoz vezethet. Mindemellett a vezető részecskék és a mátrix közötti kötési felületek is károsodhatnak, így ez elektromos ellenállás növekedéséhez is vezethet [1], [4].

6. A kutatás célkitűzései

A kutatás célja, hogy egy megbízható, hatékony és optimális elektromosan vezető ragasztókapcsolatot hozzak létre, amely kielégíti az autóiipari alkalmazások szigorú követelményeit. Ehhez Loctite Ablestik 2902 típusú ragasztót használtam, amely jól ismert kiváló elektromos és mechanikai tulajdonságairól. A kutatás fókuszában a ragasztott kötés elektromos vezetőképessége és mechanikai stabilitása áll, amelyeket különböző hőkezelési hőmérsékletek és összeszorító erők alkalmazása mellett vizsgálok. A hőkezelési paraméterek és a szorítóerő mértéke alapvetően befolyásolja a ragasztott kötés térhálósodását, ezáltal meghatározza a kötés teljesítményét mind elektromos, mind mechanikai szempontból.

A vizsgálatok célja az optimális paraméterek meghatározása, amelyek mellett a ragasztott kötés maximális vezetőképességet és szakítószilárdságot mutat. Ennek érdekében a kísérletek során a hőkezelés különböző hőmérsékletein, valamint az alkalmazott összenyomási erő variálásával térhálósított minták jellemzőit hasonlítom össze. A ragasztott kötés elektromos ellenállása és szakítószilárdsága mértéke kritikus szempont, hiszen az elektromosan vezető ragasztók használata elsősorban olyan ipari alkalmazásokban releváns, ahol ezek a tulajdonságok kulcsszerepet játszanak az összeköttetés hatékonyságában és hosszú távú megbízhatóságában.

A kutatás eredményei nemcsak a ragasztóanyag viselkedésének és teljesítményének megértését segítik, hanem hozzájárulhatnak az autóiiparban egyre nagyobb jelentőséggel bíró elektromosan vezető ragasztástechnológiák továbbfejlesztéséhez is. A kapott adatok alapján meghatározhatóak azok az optimális hőkezelési és összeszorítás erők a térhálósítás során, amelyek mellett a ragasztott kötések teljesítménye megfelel a modern ipari követelményeknek. A kutatás nemcsak az adott ragasztó specifikus jellemzőire világít rá, hanem általános iránymutatásként is szolgálhat a vezető ragasztók tervezésében és alkalmazásában, elősegítve a fenntarthatóbb, könnyebb és hatékonyabb rögzítési megoldások elterjedését az iparban.

7. A kísérleti anyagok és eljárások leírása, jellemzése

Ebben a fejezetben bemutatom az alapanyagokat, a kísérleteket és azok módszereit, körülményeit, illetve a vizsgálatok technológiai adatait. Az ismertetés célja, hogy a kísérleti munka minden szükséges részlete rendelkezésre álljon a reprodukálhatóság érdekében.

7.1. Felhasznált alapanyagok

7.1.1. Hidegen hengerelt réz lemez

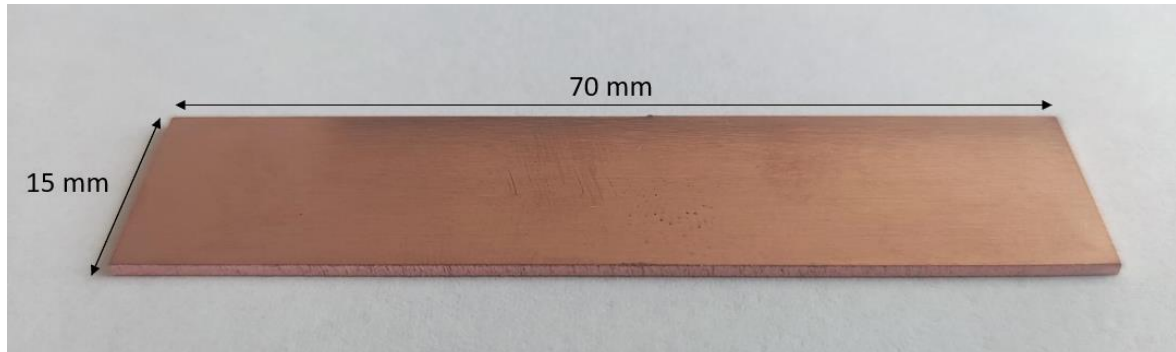
A vizsgálatához hidegen hengerelt, nagy tisztaságú E-Cu jelölésű rezet választottam alapanyagnak, mivel napjainkban ez az egyik legszélesebb körben alkalmazott anyag az akkumulátorcellák összeköttetéseinél és a vezetékek gyártásában. A réz kiemelkedő tulajdonságai közé tartozik a rendkívül jó elektromos és hővezető képesség, amelyek kulcsfontosságúak az energiahatékonyság szempontjából, különösen az elektromos járművek és más korszerű technológiák esetében. Mechanikai szempontból is előnyös, hiszen jól alakítható, egyszerűen formázható, ami megkönnyíti az összeköttetések létrehozását. Mivel a réz könnyen alakítható, deformálható ezért vizsgálatok során kiemelt figyelmet kell fordítani az alkalmazott szorítóerő pontos beállítására, hogy a ragasztandó felületeken ne történjen képlékeny alakváltozás.

A hidegen hengerelt réz további előnye, hogy homogén szerkezetű és felülete egyenletes, így jó referenciát biztosít., ezáltal egy optimális alapot ad a ragasztóanyag tapadásához, ezáltal javítva a ragasztott kötés mechanikai és elektromos tulajdonságait

Ezek a tulajdonságok tették a rezet ideális választássá a kísérletekhez, lehetővé téve az ipari alkalmazások szempontjából releváns eredmények elérését és a vizsgálati körülmények megbízható reprodukálását.

7.1.2. *próbatestek geometriája*

A próbatestek alapterületét $70\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ méretben határoztam meg, vastagságuk 1 mm . A ragasztott felületek méretét $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ -re korlátoztam, hogy a vizsgálatok során pontosan értékelhető legyen a ragasztóanyag viselkedése (9. ábra).



9. ábra: Réz alapanyag geometriája

Az alapanyagot lézerrel vágtam méretre, mivel ez a technológia nagy pontosságot és sima vágási éleket biztosít anélkül, hogy a hőbevitel jelentős változást okozna az anyagszerkezetben. A lézervágásnak köszönhetően a minták élei nem igényeltek további mechanikai megmunkálást, így megőrizték eredeti szerkezetüket.

A felülethibás vagy nem megfelelően méretre vágott darabokat selejteztam, hogy a vizsgálatokhoz csak homogén, sérülésmentes mintákat használjak. A munkadarabokat közvetlenül ragasztás előtt 20%-os sósavval kezeltem tíz másodpercen keresztül, amelyet szigorúan a munkavédelmi előírások betartása mellett végeztem. A savas kezelés során védőkesztyűt, védőszemüveget és megfelelő szellőztetést biztosítottam a biztonságos munkavégzés érdekében. A sósavas kezelés után a felületeket 96%-os metanollal tisztítottam meg, ezt követően áttöröltem a felületeket, hogy eltávolítsam az esetleges savmaradékokat és oldószermaradványokat.

A tisztítási és előkészítési lépések során maximális figyelmet fordítottam a mintadarabok egységességének megőrzésére, hogy a kísérletek eredményeit kizárólag a felületkezelés és a ragasztási folyamatok befolyásolják. Ezáltal biztosítottam a mérési adatok megbízhatóságát és reprodukálhatóságát.

7.1.3. *Loctite Ablestik 2902 ragasztó*

A Loctite Ablestik 2902 egy kétkomponensű, ezüsttel töltött epoxiragasztó, amelyet kifejezetten elektronikai alkalmazásokhoz fejlesztettek ki. Kiváló elektromos és hővezető tulajdonságokkal rendelkezik, miközben magas mechanikai szilárdságot biztosít. A ragasztó különféle anyagokhoz, például fémekhez, kerámiákhoz és üveghez is jól tapad, így széles körben alkalmazható.

A LOCTITE ABLESTIK 2902 széleskörűen alkalmazható, mivel szobahőmérsékleten és hőkezeléssel is térhálósítható. A mechanikai szilárdság terén kimagasló eredményeket mutat, nyírószilárdsága akár 11 MPa is lehet, például 150 °C-on végzett 15 perces hőkezeléssel. Az anyag megfelel az ISO 10993-5 szabványnak, ami garantálja, hogy nem citotoxikus, így biztonságosan használható az iparban és érzékeny alkalmazásokban is[33].

A ragasztó ideális megoldás olyan speciális elektronikai alkalmazásokhoz, mint például elektromos modulok, nyomtatott áramkörök, hullámvezetők, lapos kábelek kötése és nagyfrekvenciás árnyékolók rögzítése. Emellett kiváló alternatívát nyújt a hagyományos hidegforrasztások helyett. A LOCTITE ABLESTIK 2902 megbízhatóságot, vezetőképességet és mechanikai teljesítményt kínál, így tökéletes választás az ipari és elektronikai alkalmazások igényeinek kielégítésére[33].

7.2. A ragasztott kötések létrehozásának módszere

7.2.1. A ragasztóanyag feljuttatása a felületre

A felületkezelést követően a ragasztóanyagot a kezelt próbatest egyik végére vittem fel, a felületre pontosan $60 \text{ mg} \pm 5 \text{ mg}$ mennyiségben. Ennek pontos kiméréséhez digitális mikromérleget használtam (10. ábra), amely lehetővé tette a precíz és megbízható adagolást. A folyamatot úgy végeztem, hogy először a lemezeket a mérleg tiszta felületére helyeztem. Különös figyelmet fordítottam arra, hogy a mintadarabok tisztaságát megőrizzem, így elkerültem a szennyeződésekkel adódó mérési pontatlanságokat.



10. ábra: A méréshez használt mérleg, mérési pontosság 0,001 g.

Miután a próbatestet a mérlegre helyeztem, a mérleget nulláztam, hogy kizárólag a később felvitt ragasztóanyag tömegét rögzítse, ezt minden darabnál megcsináltam, hogy a mérésem a lehető legpontosabb legyen. Ezt követően adagoló segítségével kijuttattam a ragasztót a próbatest egyik végére, miközben folyamatosan ellenőriztem a mérleget, hogy a

felvitt mennyiség a meghatározott $60 \text{ mg} \pm 5 \text{ mg}$ határok között maradjon. Ha az adagolás során túlléptem volna a kívánt mennyiséget akkor azonnal korrigáltam, hogy a ragasztások egyenletesek és szabályosak legyenek, ami elengedhetetlen későbbi vizsgálatok pontossága érdekében.

Ez a módszer lehetővé tette a ragasztóanyag pontos elosztását és minimalizálta a mérések közötti eltéréseket, így biztosítva a kísérletek reprodukálhatóságát és a kapott eredmények megbízhatóságát. Az alapos előkészítés és precíz adagolás alapvetően hozzájárult a vizsgálatok sikerességéhez és a pontos következtetések levonásához.

7.2.2. A kötések összeszorítása

A gyártó ajánlása szerint elég a kötések kézzel összeszorítani, de ezek a nyomóerők nem ellenőrizhetők le pontosan, ezért súlyokkal is leszorítottam a ragasztásokat, ebből kétfélét próbáltam. Az első esetben a $0,0025 \text{ MPa}$, a másik esetben pedig $0,01 \text{ MPa}$ volt a felületre jutó feszültség. Ebben az esetben azt tapasztaltam, hogy a kis leszorítási erő miatt a ragasztóanyag nem terült szét a teljes felületen, így nem hoz létre jó elektromos vezetést. Ezért a későbbiekben nagyobb leszorítási erővel végeztem a vizsgálatokat.

A ragasztott kötések alkalmazott összeszorító erő pontos és egyenletes biztosítása érdekében egy saját tervezésű készüléket készítettem. Ez a készülék lehetővé tette, hogy egyidejűleg 7 ragasztott kötést szorítsak össze egyenletes erővel, biztosítva ezzel a vizsgálati minták homogenitását. Az eszköz kialakítása során kiemelt figyelmet fordítottam az erő pontos szabályozhatóságára és az összeszorítás stabilitására (11. ábra).



11. ábra: A leszorítókészülék

A Csavar meghúzási nyomatékát mértem, amely nagy pontossággal rögzítette az alkalmazott nyomóerőt. Az erő alkalmazása előtt minden próbatestet gondosan elhelyeztem a készülékben, ügyelve arra, hogy a minták párhuzamosan helyezkedjenek el, és ne legyenek mechanikai torzulások eltérések, elcsúszások.

Az összeszorító erő nagyságát kísérletenként változtattam, hogy vizsgáljam annak hatását a kötés mechanikai és elektromos tulajdonságaira. A készülék csavarjainak meghúzási nyomatékait (10 Nm, 20 Nm, 30 Nm, 40 Nm) állítottam be, amelyeket a nyomatékkulcs biztosított. Ez lehetővé tette, hogy a vizsgálatok során az összeszorítás hatásai részletesen elemezhetők legyenek, biztosítva a reprodukálható és megbízható eredményeket.

Ez a szerszám garantálta, hogy az összes ragasztott kötés azonos nyomóerőt kapjon, minimalizálva a minták közötti eltéréseket. Az alkalmazott erő hatásainak alapos vizsgálata során értékes információkat nyertem a ragasztott kötés tulajdonságainak optimalizálásához és az összeszorítási eljárás ipari alkalmazhatóságához.

7.2.3. Hőkezelés

A ragasztott kötések hőkezelését a gyártó által meghatározott idő- és hőmérséklet-paraméterek szerint végeztem, hogy biztosítsam a ragasztóanyag megfelelő térhálósodását és ezáltal optimális mechanikai és elektromos tulajdonságokat érjek el. A hőkezelést szabályozható hőmérsékletű kemencében végeztem a magasabb hőmérsékleti tartományokban, míg a szobahőmérsékleten végzett térhálósítás esetében a mintákat stabil, ellenőrzött körülmények között tároltam.

A gyártói ajánlások alapján négy különböző hőmérsékleti és időtartam-kombinációt alkalmaztam: 25°C-on 24 órán keresztül, 65°C két órán keresztül, 110°C 15 percig, illetve 160°C 5 percig. A Loctite Ablestik 2902 technikai adatlapjában jól látható, hogy a magasabb hőmérsékleten térhálósított ragasztónak kisebb ellenállást kell biztosítania, amely az elektromos vezetés szempontjából kedvezőnek számít, mindemellett a szakítószilárdsága is jelentősen megnő[33].

Ez lehetőséget adott arra, hogy összehasonlítsam a szobahőmérsékleten végzett térhálósítás hatását a gyártó által ajánlott magasabb hőmérsékletű eljárásokkal. Az alacsony hőmérsékletű térhálósítás ipari szempontból különösen releváns lehet, mivel energiahatékonyabb és bizonyos alkalmazásoknál előnyös.

7.3. Az elektromosan vezető ragasztott kötések vizsgálatai

7.3.1. A ragasztott kötések ellenállásmérése

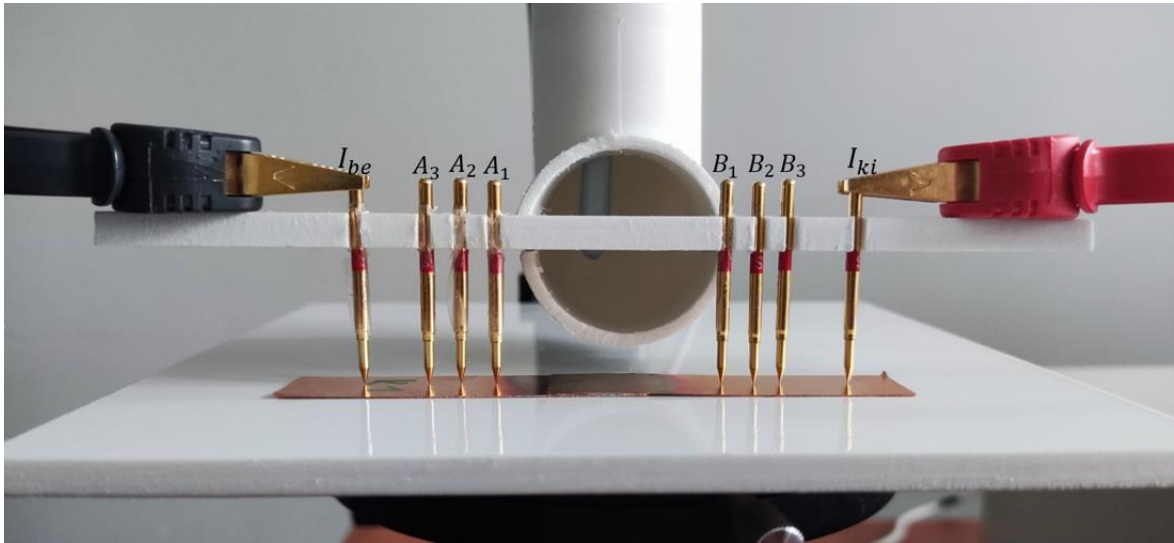
A ragasztott kötés elektromos ellenállásának méréséhez egy **HIOKI RM 3545-02** típusú precíziós ellenállásmérőt használtam, amely alkalmas alacsony ellenállásértékek nagy pontosságú mérésére. A mérés során biztosítani kellett a mintadarabok stabil és ismételhető rögzítését, ezért a mintákhoz egy általam tervezett ellenállás mérő készüléket használtam, amely garantálta a mérések egységességét és a minták biztonságos elhelyezését.

A készülék úgy lett kialakítva, hogy a ragasztott próbadarabok érintkezési pontjait pontosan és szorosan rögzítse a tűkhöz, miközben minimalizálta a külső tényezők (pl. nem megfelelő érintkezés) hatását az eredményekre. A mintadarabokat a mérés előtt gondosan ellenőriztem és megtisztítottam, hogy elkerüljem a felületi szennyeződések vagy oxidációs rétegek által okozott hibákat (12. ábra).



12. ábra: A ellenállásmérő berendezés

A mérési eljárás során az ellenállásmérő eszköz négyvezetékes mérési módszert alkalmaztam, amely csökkenti a vezetékek ellenállásából eredő hibákat, így nagyobb pontosságot biztosít. A próbadarabok érintkezési pontjain a szerszám segítségével stabil nyomóerőt biztosítottam, hogy az érintkezési ellenállás minimális legyen és az eredmények kizárólag a ragasztott kötés elektromos tulajdonságait tükrözzék (13. ábra).



13. ábra: Precíziós ellenállásmérő készülék

Az egyes méréseket többször megismételtem, hogy kiszűrjem az esetleges mérési hibákat, és az eredmények reprodukálhatók legyenek. A mérések során a rögzített ellenállásértékeket rögzítettem, és azokat később összehasonlítottam a különböző hőkezelési és összeszorítási paraméterek alapján, hogy meghatározzam azok hatását a kötés elektromos tulajdonságaira. Ez a mérési eljárás biztosította a megbízható és pontos eredményeket, amelyek alapvető fontosságúak voltak a ragasztott kötések elektromos viselkedésének teljeskörű elemzéséhez. Az ellenállásmérés során mért eredményekből Brand és társai tanulmánya[34] alapján számoltam ki csak a kötés ellenállását, úgy, hogy az alapanyag ellenállását kivontam a teljes kötés ellenállásából.

7.3.2. Pásztázó Elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálatok

A pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálatok célja a ragasztott kötések mikrostruktúrájának részletes elemzése volt, különös tekintettel a vezető szemcsék eloszlására, méretére és a kötés minőségére. A mikrostruktúra vizsgálat során a Zeiss Sigma 300VP típusú elektronmikroszkópot használtunk. A képeket a metalográfiai vizsgálatok során szekunder elektron deketorral készítettük a szemcsék geometriájának és méretének meghatározása céljából.

A vizsgálatok során elemeztem a szemcsék méretét és eloszlási tartományát is, hogy megérthessem, ezek hogyan befolyásolják a kötés mechanikai és elektromos tulajdonságait. A SEM segítségével azonosítottam az esetleges hibákat, például repedéseket, nem megfelelően tapadó területeket vagy légbuborékokat, amelyek rontják a kötés mechanikai stabilitását és elektromos teljesítményét. Ezek az információk alapvető fontosságúak voltak a kötési folyamat tökéletesítése szempontjából.

7.3.3. A ragasztás szakítószilárdságának, nyírószilárdságának meghatározása

A szakítószilárdság és nyírószilárdság mérését egy **INSTRON 5900R 4482** típusú szakítógéppel végeztem, az **MSZ EN 1465:1999 (DIN EN 1465)** szabvány előírásainak megfelelően (14. ábra). Ez a szabvány biztosítja, hogy a mérési eredmények

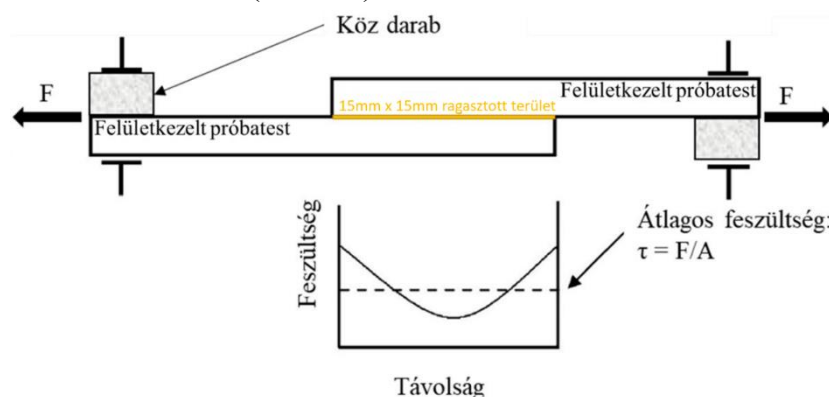


14. ábra: INSTRON típusú szakítógép.

összehasonlíthatók és reprodukálhatók legyenek, különösen a ragasztott kötések vizsgálatában.

A külpontos húzás elkerülése érdekében a mérési eljárás során közdarabokat alkalmaztam, hogy a megszorítás során a húzóerő tengelye párhuzamos és egybeeső legyen a ragasztott területtel. Ez az elrendezés minimalizálta a nemkívánatos csavaró hatásokat, és biztosította, hogy az erő egyenletesen oszoljon el a ragasztott kötés teljes felületén[35].

A mérések során az átlapolt kötés nyírószilárdságát vizsgáltam, amely a ragasztó mechanikai teljesítményének egyik legfontosabb jellemzője. A mérési elrendezés részleteit az XYZ ábrán szemléltetem, amely bemutatja a próbatestek elhelyezését, a húzóerő irányát és a közdarabok alkalmazását (15. ábra) [35].



15. ábra: A nyíró vizsgálat sematikus ábrája[35].

Az átlapolt kötésekkel ragasztott próbatestek nyírószilárdsága a ragasztott felületre ható átlagos feszültséggel jellemezhető, amelyet az alábbi képlet határoz meg:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

ahol: τ : az átlagos nyírószilárdság (MPa), F : a vizsgálógép által mért húzóerő (N), A : a ragasztott felület területe (mm²).

Ez a képlet lehetővé teszi, hogy a ragasztott kötés szilárdságát az adott húzóerő és a ragasztott felület méretének függvényében értékeljük[35].

8. Az elért eredmények és azok kiértékelése

Ebben a fejezetben a kísérleti vizsgálatok során kapott eredményeket részletesen bemutatom és kiértékelem. Az eredmények feldolgozása során elemzem a hőkezelés, az összeszorító erő, valamint a ragasztott kötések mechanikai és elektromos tulajdonságainak összefüggéseit. A kiértékelés célja, hogy meghatározzam azokat a paramétereket, amelyek biztosítják a ragasztott kötések legjobb teljesítményét és tartósságát.

Az eredmények bemutatása során kitérők a ragasztott kötések nyírószilárdságára, elektromos ellenállására és mikrostruktúrájára vonatkozó mérésekre. A kapott adatokat grafikonokkal, táblázatokkal és ábrákkal illusztrálom, hogy az eredmények vizuálisan is érthetők és áttekinthetők legyenek. A kiértékelés során az egyes mérési eredmények közötti összefüggéseket vizsgálom, külön figyelmet fordítva a hőkezelési és összeszorítási paraméterek hatásaira.

Ezen túlmenően az eredmények értelmezése során kitérők a mért adatok ipari alkalmazhatóságára és azok relevanciájára a gyakorlatban. A fejezet célja nemcsak az eredmények objektív bemutatása, hanem azok összefüggéseinek megvilágítása és az optimális megoldások meghatározása is. Ez az elemzés alapot nyújt a kötési technológia további fejlesztéséhez és alkalmazásához.

8.1. A Ragasztott kötések elektromos ellenállása és mechanikai szilárdsága a szorítóerő függvényében

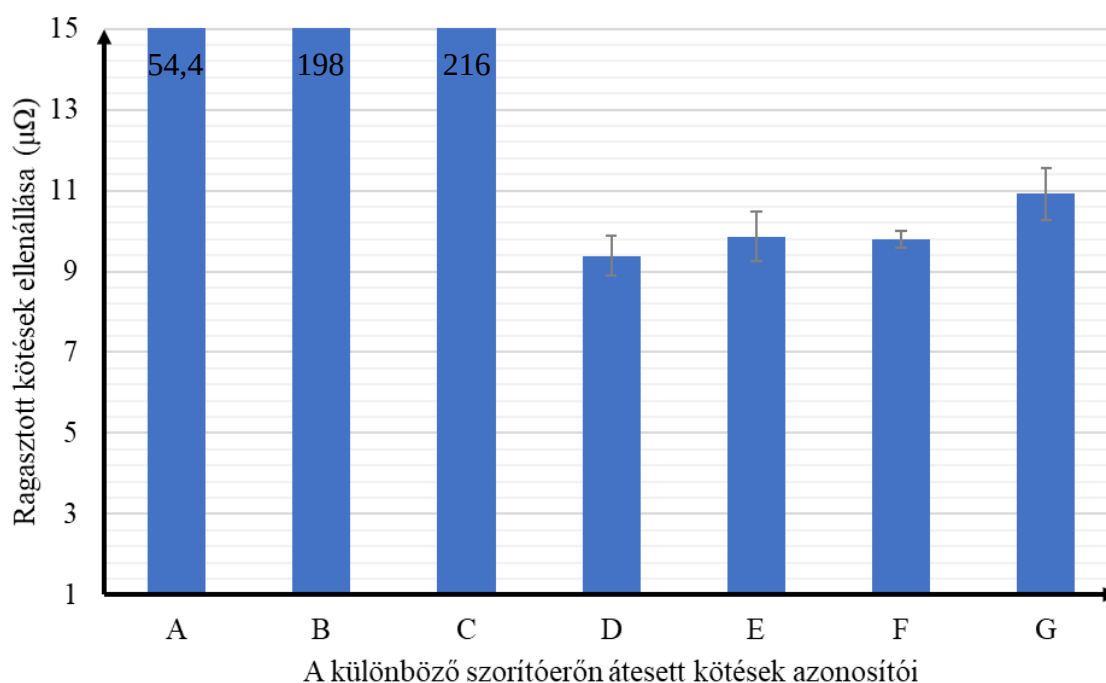
A vizsgálatok során a ragasztott kötés elektromos ellenállását és mechanikai szilárdságát a különböző szorítóerők hatására részletesen elemeztem. Az összeszorító erő kulcsfontosságú paraméter a ragasztott kötés minőségének meghatározásában, mivel közvetlenül befolyásolja a vezetőképeességet és a kötés mechanikai stabilitását. A nagyon alacsony szorítóerő (kézzel összeszorított darabok, ahogyan a gyártói adatlap is ajánlja[36]) nem biztosít megfelelő érintkezést a vezető szemcsék között, ami magasabb elektromos ellenálláshoz vezethet, míg a túlzott szorítóerő a ragasztott réteg túlzott elvékonyodását vagy akár deformációját eredményezheti.

A vizsgálatok célja annak feltárása volt, hogy milyen mértékű szorítóerő mellett érhető el az optimális elektromos és mechanikai teljesítmény. Ennek érdekében az 1. táblázatban látható paraméterekkel hoztam létre kötések.

1. táblázat: minták jelölése az optimális szorítóerő meghatározásához

Minták jelölése	A ragasztott kötések létrehozása során használt technológia
A	Kézi szorítás, 24 órán keresztül 25°C térhálósított
B	0,0025 MPa szorítás, 24 órán keresztül 25°C térhálósított
C	0,0025 MPa szorítás, 24 órán keresztül 25°C térhálósított
D	10 Nm leszorítás a készülékben, 24 órán keresztül 25°C térhálósított
E	20 Nm leszorítás a készülékben, 24 órán keresztül 25°C térhálósított
F	30 Nm leszorítás a készülékben, 24 órán keresztül 25°C térhálósított
G	40 Nm leszorítás a készülékben, 24 órán keresztül 25°C térhálósított

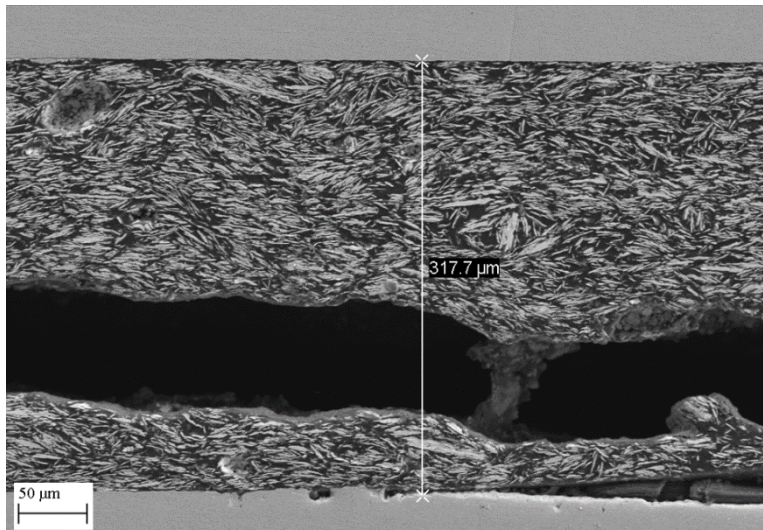
A 16. ábrán láthatók a különböző szorítóerővel létrehozott elektromosan vezető ragasztók ellenállásai.



16. ábra: A ragasztott kötések ellenállása a szorítóerő függvényében

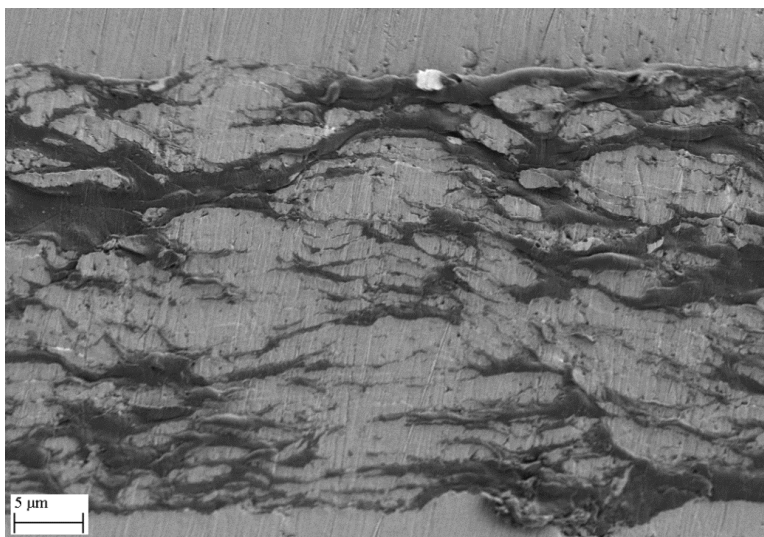
Az elektromos ellenállás vizsgálatából egyértelműen megállapítható, hogy a szorítóerő jelentős hatással van a kötés elektromos vezetőképességére. A kézi szorítással készült minták (A) ellenállása 54,4 μΩ volt, amely lényegesen magasabb, mint bármely készülékkel végzett leszorításé. Ez arra utal, hogy a kézi szorítás nem biztosította a vezető szemcsék közötti egyenletes érintkezést, ami magasabb kontaktellenálláshoz vezetett.

A 0,0025 MPa (B) és 0,01 MPa (C) szorítások esetében az ellenállás tovább emelkedett, 197,9 $\mu\Omega$ és 216 $\mu\Omega$ értékekre. Ez feltételezhetően az alacsony szorítóerő következménye, amely nem volt elegendő ahhoz, hogy megfelelő érintkezést biztosítson a ragasztóanyag szemcséi között (17. ábra). Az alacsony nyomású szorítások eredményei tehát jól tükrözik, hogy a ragasztott kötés vezetőképessége szoros összefüggésben van a szorítóerő nagyságával, esetenként megfigyelhető volt, hogy a ragasztóban repedés is keletkezett e nem megfelelő összeszorítás hatására.



17. ábra: Kézierővel összeszorított ragasztott minta mikroszkópi képe.

A készülékkel végzett leszorítások esetében (D-G) az ellenállás értékei jelentősen javultak, 9-11 $\mu\Omega$ tartományba estek. A 10 Nm-es leszorításnál (D) mért ellenállás 9,4 $\mu\Omega$ volt, amely a legkisebb értéket mutatta. Az optimális szorítóerő tehát ebben a tartományban található, mivel ezen érték mellett alakult ki a legkedvezőbb elektromos tulajdonság (18. ábra).



18. ábra: A vezetőszemcsék elhelyezkedése a 10 Nm-es leszorítás hatására.

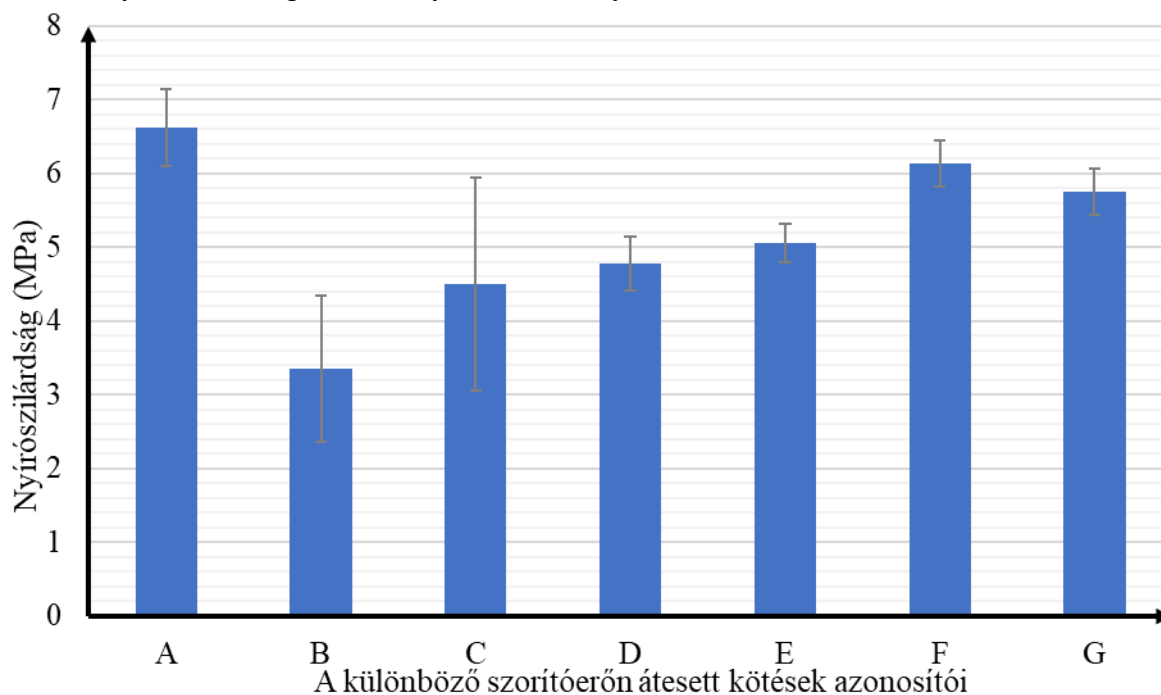
A 20 Nm (E) és 30 Nm (F) leszorítások hasonlóan alacsony ellenállásértékeket eredményeztek ($9,9\ \mu\Omega$ és $9,8\ \mu\Omega$), míg a 40 Nm-es (G) leszorításnál az ellenállás enyhén növekedése figyelhető meg ($10,9\ \mu\Omega$). Ez arra utal, hogy a túlzott szorítóerő deformációkat okozhat a ragasztott rétegben.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy az elektromos ellenállás jelentősen csökkenthető a megfelelő szorítóerő alkalmazásával. Az optimális leszorítóerő a 10 Nm tartományban található, mivel ez biztosította a legkisebb ellenállásértéket. Mivel az ellenállás ezen leszorítóerő mellett volt a legkedvezőbb ($9,4\ \mu\Omega$), mindemellett ez a mértékű szorítóerőt egy akkumulátorcella is képes elviselni, ezért a további vizsgálatokat ezzel a paraméterrel fogom folytatni.

Az eredmények alapján jól látható, hogy A D, E, F, és G szorítási módok (10 Nm, 20 Nm, 30 Nm és 40 Nm) között az elektromos ellenállás tekintetében nem mutatkozott jelentős eltérés. Az ellenállás értékek mindegyike $9\text{--}11\ \mu\Omega$ tartományba esett, ami azt jelzi, hogy ezen szorítóerők esetében a vezető szemcsék érintkezése már közel optimális. Ez arra utal, hogy a 10 Nm-től kezdődően a szorítóerő növelése nem eredményezett számottevő javulást az elektromos tulajdonságokban.

Ez különösen fontos szempont a kötési technológia optimalizálásában, mivel a további szorítóerő növelése nemcsak energiaigényesebb, hanem deformációkat is okozhat a kötésben és a ragasztandó anyagban (például akkumulátorcellában), mint ahogy azt a 40 Nm-es leszorításnál enyhén növekvő ellenállás is mutatja. Az eredmények tehát alátámasztják, hogy a 10 Nm-es szorítóerő már elegendő a kívánt elektromos vezetőképesség eléréséhez, miközben elkerülhetők a túlzott nyomás okozta kedvezőtlen hatások. Ezért a további vizsgálatokat a 10 Nm-es leszorítás mellett végzem, mivel ez a paraméter biztosítja a legkedvezőbb vezetőképességet optimális szakítószilárdság mellett.

Az elektromos ellenállás mellett megvizsgáltam a különböző szorítóerővel készült kötések nyírószilárdságát is, amelynek eredményeit a 19. ábra szemlélteti.



19. ábra: A ragasztott kötések nyírószilárdsága a szorítóerő függvényében.

A kézzel szorított minták esetében a nyírószilárdság átlagosan 7 MPa körüli értéket mutatott, de az eredmények szórása jelentős volt. Ez arra utal, hogy a kézi szorítás nem biztosít egyenletes erőeloszlást, ami a mechanikai tulajdonságokban is eltéréseket okoz. Az alacsony szorítóerővel (0,0025 MPa és 0,01 MPa) készült minták nyírószilárdsága jelentősen alacsonyabb volt, mint a kézi szorításé, 4–5 MPa tartományban.

A 10 Nm-es szorítóerő mellett készült minták nyírószilárdsága növekedett, átlagosan 5,5 MPa körüli értéket értek el, ami azt jelzi, hogy a szorítóerő növelése javítja a kötés mechanikai stabilitását. A 20 Nm és 30 Nm közötti tartományban a nyírószilárdság tovább javult, a legjobb értékek 6,5–7 MPa között voltak. Ugyanakkor a 40 Nm-es szorítóerővel készült minták esetében az értékek enyhe csökkenést mutattak, ami valószínűleg a túlzott nyomás miatti deformáció következménye.

Az eredmények azt mutatják, hogy a szorítóerő növelése a nyírószilárdság javulását eredményezte egészen 30 Nm-ig, ahol a legmagasabb mechanikai stabilitást mértük. A 40 Nm-es szorításnál az enyhe csökkenés arra utal, hogy a túlzott nyomás negatívan befolyásolhatja a kötés mechanikai tulajdonságait. Ezek az eredmények összhangban állnak az elektromos ellenállás mérése során kapott adatokkal, amelyek szintén azt mutatták, hogy a túlzott szorítóerő kedvezőtlen hatásokkal járhat.

Mivel az elektromos ellenállás szempontjából a 10 Nm-es szorítóerő mutatta a legkedvezőbb értékeket, és a mechanikai szilárdság is jelentősen javult ezen az erőnél, a további vizsgálatokat ezzel a paraméterrel fogom folytatni. Az eredmények megerősítik, hogy az optimális szorítóerő alkalmazása elengedhetetlen a ragasztott kötés elektromos és mechanikai tulajdonságainak javítása érdekében.

8.2. A ragasztott kötések elektromos ellenállása és mechanikai szilárdsága az alkalmazott hőkezelés függvényében

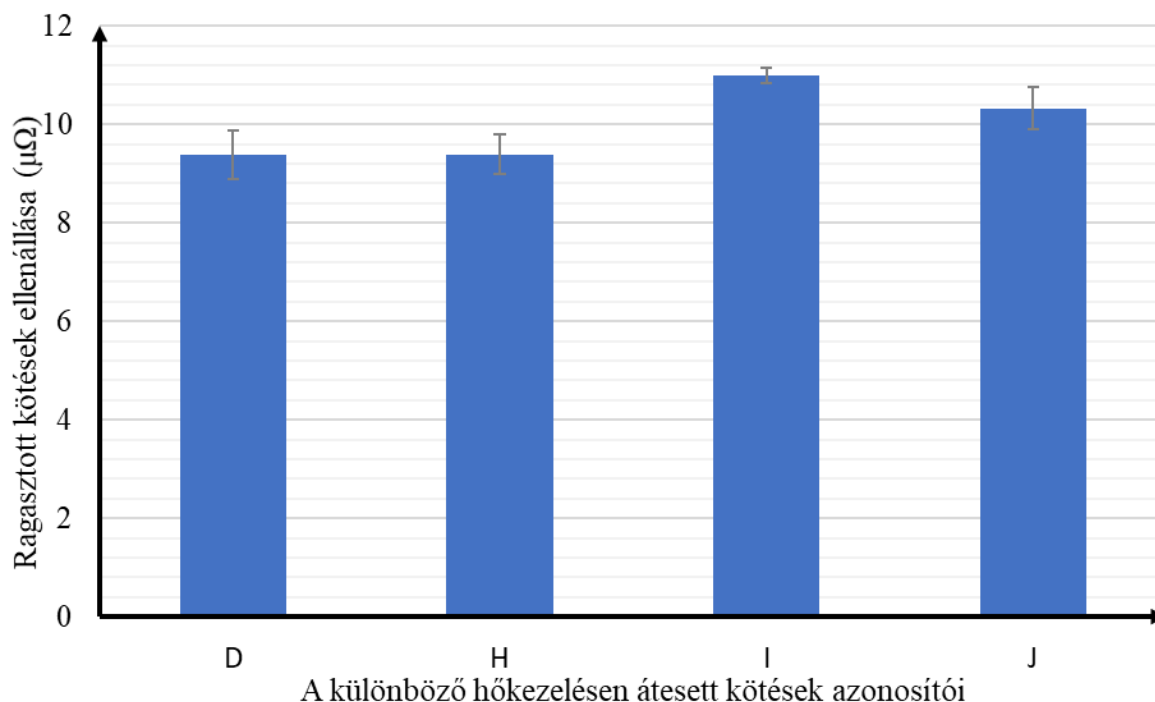
Ebben a részben a különböző hőkezelési eljárások hatását vizsgálom a ragasztott kötések elektromos ellenállására és mechanikai szilárdságára. A mintadarabok eltérő hőmérsékleten történő térhálósítása lehetőséget nyújtott annak elemzésére, hogy a hőkezelés miként befolyásolja a kötés tulajdonságait, különös tekintettel a vezetőképességre és a nyírószilárdságra. Az eredményeket grafikonok és táblázatok segítségével mutatom be, amelyek alapján megállapíthatók a hőkezelési paraméterek és a kötési tulajdonságok közötti összefüggések.

A korábbi eredmények alapján a 10 Nm-es leszorítás bizonyult a legkedvezőbbnek az elektromos vezetőképesség szempontjából, ezért az elemzést ehhez a leszorítási paraméterhez igazítottam, amelyeket eltérő hőmérsékleti tartományok (a gyártó által javasolt[33]) között térhálósítottam (2. táblázat).

2. táblázat: a minták jelölése az optimális térhálósítási hőmérséklet meghatározásához

Minták jelölése	A ragasztott kötések létrehozása során használt technológia
D	10 Nm leszorítás a készülékben, 24 órán keresztül 25°C térhálósított
H	10 Nm leszorítás a készülékben, 24 órán keresztül 160°C térhálósított
I	10 Nm leszorítás a készülékben, 24 órán keresztül 110°C térhálósított
J	10 Nm leszorítás a készülékben, 24 órán keresztül 65°C térhálósított

Az eredmények alapján megállapítható, hogy az alkalmazott hőkezelési eljárások jelentősen befolyásolták az elektromos ellenállás értékét (20. ábra).



20. ábra: a ragasztott kötések ellenállása a térhálósító hőmérséklet függvényében.

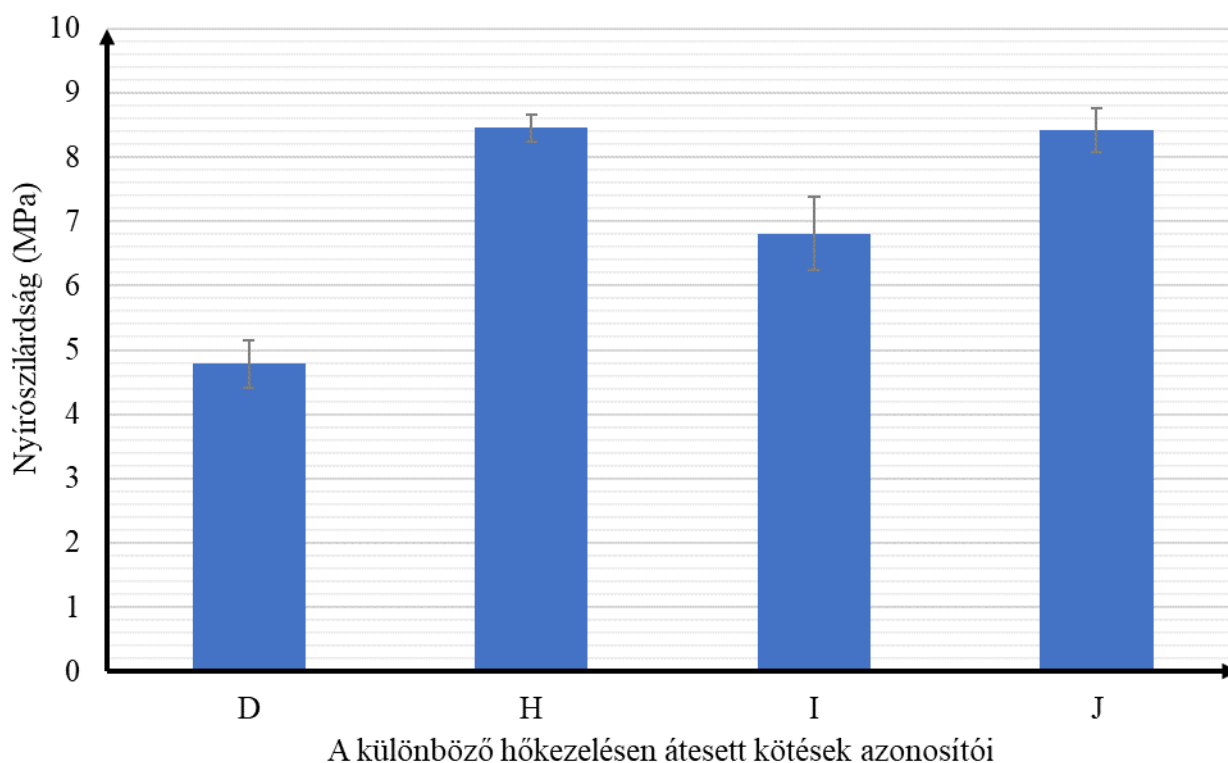
A szobahőmérsékleten (25°C) térhálósított minták (D) ellenállása 9,4 μΩ, illetve a 160°C-on térhálósított mintáké (H) pedig 9,4 μΩ volt. Ezek az értékek szinte teljesen azonosak, és a legkedvezőbb, a lehető legkisebb ellenállásokat mutatták az összes vizsgált hőkezelési paraméter közül. Ez azt jelzi, hogy a szobahőmérsékleten végzett térhálósítás – bár hosszabb időt igényel – hasonló elektromos vezetőképességet eredményez, mint a magasabb hőmérsékleten végzett gyorsabb térhálósítás. Arra következtettek, hogy a ragasztandó felületek a 25°C-os térhálósítás folyamán is megfelelően közel kerülnek egymáshoz, ami biztosítja a vezető szemcsék optimális érintkezését.

Ezzel szemben az 110°C-on (I) és 65°C-on (J) térhálósított minták ellenállása magasabb, 11 μΩ és 10,3 μΩ volt. Ez arra utal, hogy ezek a hőmérsékleti tartományok nem biztosítják az optimális feltételeket a megfelelő vezetőképesség eléréséhez. Az eltérés a nem megfelelő térhálósodási folyamatból vagy a szemcseeloszlás hiányosságából adódhat.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy az elektromos ellenállás szempontjából a szobahőmérsékleti (D) és a 16°C-on végzett térhálósítás (H) bizonyult a leghatékonyabbnak. A szobahőmérsékleten végzett térhálósítás energiatakarékosabb, míg a 160°C-on végzett eljárás rövidebb idő alatt biztosít hasonló vezetőképességet. A 65°C-on és 110°C-on végzett térhálósítás kevésbé volt hatékony, mivel ezek az ellenállási értékek magasabbak voltak.

Összességében a legkedvezőbb eredményeket a szobahőmérsékleten és a 160°C-on térhálósított minták adták. Az eredmények arra utalnak, hogy a szobahőmérsékleten végzett térhálósítás során a ragasztandó felületek elegendő közel kerülnek egymáshoz, biztosítva az optimális kötési tulajdonságokat. Mindemellett a jelenleg használt akkumulátorcellák csak a 25°C történő térhálósítást képesek elviselni. Ezért számomra a további vizsgálatokat a hőmérsékleten érdemes folytatni, mivel ez biztosítja a legjobb eredményeket elektromos vezetőképesség szempontjából.

A hőkezelési eljárások hatását nemcsak az elektromos ellenállásra, hanem a ragasztott kötések mechanikai szilárdságára is vizsgáltam. A nyírószilárdság mérése során a 10 Nm-es leszorítással készített mintákat különböző hőmérsékleten térhálósítottam, majd az így kapott eredményeket elemeztem (21. ábra).



21. ábra: a ragasztott kötések szakítószilárdsága a térhálósító hőmérséklet függvényében.

Az eredmények azt mutatják, hogy az alkalmazott hőkezelés jelentősen befolyásolja a ragasztott kötések mechanikai szilárdságát, és ezek az értékek jól összehasonlíthatók a gyártó által megadott adatokkal[33]. A legnagyobb nyírószilárdságot a 160 °C-on térhálósított minták (H) esetében mértem, ahol az érték 8,5 MPa, amely közel áll a gyártó által megadott optimális 11 MPa értékhez. Hasonlóan jó eredményt adott a 65°C - on térhálósított minta (J), amelynél a nyírószilárdság 8,4 MPa volt, amelyek szerint 65°C - on a nyírószilárdság 7 MPa.

Az 110°C-on térhálósított minták (I) esetében a mért nyírószilárdság 6,8 MPa, amely alacsonyabb, mint a gyártó által megadott 11 MPa. Ez az eltérés az eltérő kísérleti körülményekkel, például a hőkezelési idő rövideségével vagy a kötés egyenletességével magyarázható. A 25°C-on térhálósított minták (D) eredménye 4,8 MPa, amely nagyon közel áll a gyártó által megadott 5 MPa értékhez, ami azt mutatja, hogy a kísérleti körülmények jól reprodukálják a gyártó által meghatározott tulajdonságokat. Ez különösen fontos, mert a szobahőmérsékleten végzett térhálósítás energiatakarékos és egyszerű megoldás, még akkor is, ha hosszabb időt igényel. Az ilyen kis eltérés azt mutatja, hogy az általam végzett kísérletek precízek és megbízhatóak. Ez az eredmény megerősíti, hogy a 25 °C-on történő térhálósítás mechanikai szempontból is elfogadható lehet olyan alkalmazásokban, ahol az energiafogyasztás csökkentése vagy a hőérzékeny anyagok kezelése prioritást élvez.

A gyártói adatokkal összevetve az eltérések részben a hőkezelési idő különbségeiből, részben pedig a mérési körülményekből adódhatnak. Az eredmények ugyanakkor jól tükrözik a gyártó által megadott adatokat, amelyek szerint a magasabb hőmérséklet gyorsabb és hatékonyabb térhálósodást biztosít.

9. Összefoglalás

A kutatásaim során a A LOCTITE ABLESTIK 2902 elektromosan vezető ragasztót vizsgáltam, melynek fő célja az volt, hogy egy jó vezetőképességgel rendelkező ragasztott kötést hozzak létre. A kutatás során a ragasztót több összeszorítási erő, és különböző térhálósítási hőmérsékleteken kezeltem

A kutatás eredményei alapján a 10 Nm-es szorítással és 25°C-on térhálósított kötés bizonyult a legalkalmasabbnak az autóiipari alkalmazások terén (például az akkumulátorcellák összekötése). Az általam végzett vizsgálatok alapján a 10 Nm-es szorítás biztosította a legjobb elektromos vezetőképességet, a 25 °C-on térhálósított minták ellenállása mindössze 9,4 $\mu\Omega$ volt. Ez az érték szinte azonos a 160 °C-on térhálósított mintákéval, de szobahőmérsékleten elvégzett térhálósítás esetén jelentős energiamegtakarítást érhetünk el, ami gazdaságilag is kedvező megoldást nyújt. A gyártó által javasolt kézi összeszorításhoz képest az én módszerem 580%-os javulást mutat az ellenállás tekintetében.

A szobahőmérsékleten végzett térhálósítás további előnye, hogy az akkumulátorcellák, amelyek gyakran hőérzékeny komponensekből állnak, problémamentesen elviselik ezt a folyamatot. Az autóiipari alkalmazásokban kiemelt szempont az alacsony elektromos ellenállás, mivel ez közvetlenül hozzájárul a rendszer energiahatékonyságának növeléséhez és a veszteségek minimalizálásához, ami különösen fontos az elektromos járművekben. Az alacsony ellenállású kötések csökkentik a hőtermelést, javítják az energiaátvitelt, és hosszabb távú megbízhatóságot biztosítanak az elektromos áramkörök számára.

Mechanikai szempontból a 25 °C-on térhálósított minták 4,8 MPa nyírószilárdságot értek el, amely megfelelő stabilitást biztosít az akkumulátorcellák összekapcsolásához. Bár a 160 °C-on térhálósított minták esetében nagyobb, 8,5 MPa nyírószilárdságot értem el, az alacsonyabb hőmérsékletű térhálósítás előnyei, mint például a hőérzékeny anyagok védelme és a kisebb energiafelhasználás, meghaladják a magasabb nyírószilárdság előnyeit az ilyen alkalmazásokban. Az akkumulátorcellák esetében a mechanikai igénybevétel nem olyan mértékű, hogy az alacsonyabb nyírószilárdság problémát jelentene.

Az akkumulátorcellák összekötése során a 10 Nm-es szorítás és a 25 °C-on végzett térhálósítás a legjobb kompromisszumot nyújtja az elektromos vezetőképesség, az energiahatékonyság a gyártási folyamat egyszerűsége, és a nyírás között. Ez a megoldás nemcsak technológiailag megbízható, hanem környezetbarát is, mivel csökkenti az energiafelhasználást. Ezenkívül alkalmazása során az akkumulátorcellák képesek elviselni a

10 Nm-es szorítást, ami biztosítja a kötés stabilitását és megbízhatóságát hosszú távon is. A kapott eredmények egyértelműen alátámasztják, hogy a 25 °C-on térhálósított kötés az elektromos járművekhez ideális választás.

A jövőben szeretném a kutatásomat kibővíteni más típusú elektromosan vezető ragasztókra, különböző alapanyagokra. Szeretném megvizsgálni a különböző alapanyagokon végzett nagy energiasűrűségű felületkezelések hatását az elektromosan vezető ragasztott kötésekre.

10.Köszönetnyilvánítás

Elsősorban köszönöm a támogatást a Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai karán az Innovatív Járművek és Anyagok Tanszéknek, ahol külön köszönöm a támogatást a tanárainknak, oktatóinknak, akik támogattak a vizsgálatok során.

Köszönöm a ZalaZONE Innovációs Parknak az elektromos ellenállásmérő használatának biztosítását.

Kiemelt köszönetet mondok konzulenseimnek Tajti Ferencnek és Dr. Berczeli Miklósnak a bizalmukért, segítőkészségükért, fáradozásaikért és türelmükért.

Szeretném megköszönni a legfontosabb személyeknek, szüleimnek, akik mindenben támogatnak és segítenek, nélkülük nem tudtam volna ezt a dolgozatot elkészíteni.

Ábrajegyzék

1. ábra: Izotropikus Vezető Ragasztók (ICA) [2].....	10
2. ábra: Anizotropikus Vezető Ragasztók (ACA) [2].....	11
3. ábra: a) a COG modul alkalmazása, b) SMD kijelző alkalmazása.....	11
4. ábra: Az elektromosan vezető töltőanyagok eloszlása [13].....	14
5. ábra: SEM képek ezüstporról [22].....	16
6. ábra: TEM mikroszkópos felvétel réz nanovezetékekről a TMV részecskék központi csatornájában. (a) A sötét vonal egy 3 nm átmérőjű és 115 nm hosszú réz nanovezetéknek felel meg.	17
7. ábra: Vezetőképes töltőanyagok típusai [2].....	18
8. ábra: Szénalapú vezető töltőanyagok: (a) egyfalú szén nanocső (SWCNT) és többfalú szén nanocső (MWCNT) [2].	22
9. ábra: Réz alapanyag geometriája.....	30
10. ábra: A méréshez használt mérleg, mérési pontosság 0,001 g.	31
11. ábra: A leszorítókészülék.....	32
12. ábra: A ellenállásmérő berendezés	34
13. ábra: Precíziós ellenállásmérő készülék	35
14. ábra: INSTRON típusú szakítógép.	36
15. ábra: A nyíró vizsgálat sematikus ábrája[36].	36
16. ábra: A ragasztott kötések ellenállása a szorítóerő függvényében	39
17. ábra: Kézierővel összeszorított ragasztott minta mikroszkópi képe.....	40
18. ábra: A vezetőszemcsék elhelyezkedése a 10 Nm-es leszorítás hatására.....	40
19. ábra: A ragasztott kötések nyírószilárdsága a szorítóerő függvényében.....	42
20. ábra: a ragasztott kötések ellenállása a térhálósító hőmérséklet függvényében.....	45
21. ábra: a ragasztott kötések szakítószilárdsága a térhálósító hőmérséklet függvényében	46

Irodalomjegyzék

- [1] D. C. P. Wong Editors, "Materials for Advanced Packaging Second Edition."
- [2] R. Aradhana, S. Mohanty, and S. K. Nayak, "A review on epoxy-based electrically conductive adhesives," *Int J Adhes Adhes*, vol. 99, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102596.
- [3] H. Gao, L. Liu, K. Liu, Y. Luo, D. Jia, and J. Lu, "Preparation of highly conductive adhesives by in situ generated and sintered silver nanoparticles during curing process," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 22–30, Jan. 2012, doi: 10.1007/s10854-011-0388-8.
- [4] Y. Hu *et al.*, "Low cost and highly conductive elastic composites for flexible and printable electronics," *J Mater Chem C Mater*, vol. 4, no. 24, pp. 5839–5848, 2016, doi: 10.1039/c6tc01340f.
- [5] Master Bond, *Master Bond EP75-1 Case Study Electrically conductive adhesive sensor biomarker detector*. 2024. Accessed: Nov. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.masterbond.com/case-study/ep75-1-electrically-conductive-adhesive-sensor-biomarker-detector>
- [6] Master Bond, *EP79 Used to Connect Electrically Conductive Joints in the ATLAS Detector at CERN*. 2024. Accessed: Nov. 04, 2024. [Online]. Available: https://www.masterbond.com/case-study/ep79-used-connect-electrically-conductive-joints-atlas-detector-cern?utm_source=cs-ep79&utm_medium=email&utm_content=cs-ep79&utm_campaign=ccasestudy
- [7] H. K. Kim and F. G. Shi, "Electrical reliability of electrically conductive adhesive joints: dependence on curing condition and current density." [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/mejo
- [8] K. Chaffin, C. Taylor, and T. Grailer, "Bonding strategies and adhesives for joining medical device components," in *Joining and Assembly of Medical Materials and Devices*, Elsevier Ltd., 2013, pp. 370–404. doi: 10.1533/9780857096425.3.370.
- [9] H. P. Wu *et al.*, "High conductivity of isotropic conductive adhesives filled with silver nanowires," *Int J Adhes Adhes*, vol. 26, no. 8, pp. 617–621, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2005.10.001.
- [10] . IEEE Staff, *2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference*. IEEE, 2011.
- [11] S. Moon, H. H. Sigmarsson, Y. Huang, T. Bruemmer, S. K. Khanna, and W. J. Chappell, "Magnetically aligned anisotropic conductive adhesive for microwave applications," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Dec. 2008, pp. 2942–2949. doi: 10.1109/TMTT.2008.2007309.
- [12] M. J. Yim and K. W. Paik, "Recent advances on anisotropic conductive adhesives (ACAs) for flat panel displays and semiconductor packaging applications," *Int J Adhes Adhes*, vol. 26, no. 5, pp. 304–313, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2005.04.004.
- [13] H. W. Cui, A. Kowalczyk, D. S. Li, and Q. Fan, "High performance electrically conductive adhesives from functional epoxy, micron silver flakes, micron silver spheres and acidified single wall carbon nanotube for electronic package," *Int J Adhes Adhes*, vol. 44, pp. 220–225, 2013, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2013.03.004.
- [14] P. Qiao *et al.*, "Research on the related properties of ACF anisotropic conductive adhesive," 2023.
- [15] S. Moon and W. J. Chappell, "Novel self-assembly process using magnetically aligned z-axis anisotropic conductive adhesive for high-density vertical interconnection," *IEEE Trans Compon Packaging Manuf Technol*, vol. 2, no. 5, pp. 756–763, 2012, doi: 10.1109/TCPMT.2012.2186138.

- [16] E. Sancaktar, "Design of Electrically Conductive Adhesives and Adhesive Joints," Jul. 04, 2023. doi: 10.20944/preprints202307.0196.v1.
- [17] E. Sancaktar and L. Bai, "Electrically Conductive Epoxy Adhesives," *Polymers (Basel)*, vol. 3, no. 1, pp. 427–466, Mar. 2011, doi: 10.3390/polym3010427.
- [18] "24_2006011".
- [19] N. Moudir *et al.*, "Preparation of silver powder used for solar cell paste by reduction process," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2013, pp. 1184–1191. doi: 10.1016/j.egypro.2013.07.134.
- [20] C. P. Wong, D. Lu, and Q. K. Tong, "Lubricants of Silver Fillers for Conductive Adhesive Applications."
- [21] D. Lu, C. P. Wong, and Q. K. Tong, "A Fundamental Study on Silver Flakes for Conductive Adhesives," 1998.
- [22] Z. Liu, X. Qi, and H. Wang, "Synthesis and characterization of spherical and mono-disperse micro-silver powder used for silicon solar cell electronic paste," *Advanced Powder Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 250–255, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.appt.2011.03.004.
- [23] J. Zhang *et al.*, "Cu@Ag nanoparticles doped micron-sized Ag plates for conductive adhesive with enhanced conductivity," *Int J Adhes Adhes*, vol. 102, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102657.
- [24] F. Fazlali, A. R. Mahjoub, and R. Abazari, "A new route for synthesis of spherical NiO nanoparticles via emulsion nano-reactors with enhanced photocatalytic activity," *Solid State Sci*, vol. 48, pp. 263–269, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2015.08.022.
- [25] K. M. Bromley, A. J. Patil, A. W. Perriman, G. Stubbs, and S. Mann, "Preparation of high quality nanowires by tobacco mosaic virus templating of gold nanoparticles," *J Mater Chem*, vol. 18, no. 40, pp. 4796–4801, 2008, doi: 10.1039/b809585j.
- [26] J. C. Zhou *et al.*, "Biotemplating rod-like viruses for the synthesis of copper nanorods and nanowires," 2012. [Online]. Available: <http://www.jnanobiotechnology.com/content/10/1/18>
- [27] S. Balci *et al.*, "Copper nanowires within the central channel of tobacco mosaic virus particles," *Electrochim Acta*, vol. 51, no. 28, pp. 6251–6257, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.electacta.2006.04.007.
- [28] E. Dujardin, C. Peet, G. Stubbs, J. N. Culver, and S. Mann, "Organization of metallic nanoparticles using tobacco mosaic virus templates," *Nano Lett*, vol. 3, no. 3, pp. 413–417, Mar. 2003, doi: 10.1021/nl034004o.
- [29] C. Zhang, L. Sun, B. Huang, X. Yang, Y. Chu, and B. Zhan, "Electrical and mechanical properties of CNT/CB dual filler conductive adhesives (DFCAs) for automotive multi-material joints," *Compos Struct*, vol. 225, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111183.
- [30] X. Chen *et al.*, "Preparation and characterization of Ag conductive adhesive with low resistivity," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 35, no. 28, Oct. 2024, doi: 10.1007/s10854-024-13621-1.
- [31] T. A. Pozarycki, W. Zu, B. T. Wilcox, and M. D. Bartlett, "A Flexible and Electrically Conductive Liquid Metal Adhesive for Hybrid Electronic Integration," *Adv Funct Mater*, vol. 34, no. 31, Aug. 2024, doi: 10.1002/adfm.202313567.
- [32] A. D. Loguercio *et al.*, "Adhesive temperature: Effects on adhesive properties and resin-dentin bond strength," *Oper Dent*, vol. 36, no. 3, pp. 293–303, May 2011, doi: 10.2341/10-218L.

- [33] “Loctite Ablestik 2902.” Accessed: Nov. 16, 2024. [Online]. Available: https://www.henkel-adhesives.com/de/en/product/electrically-conductive-adhesives/loctite_ablestik29020.html
- [34] M. J. Brand, P. A. Schmidt, M. F. Zaeh, and A. Jossen, “Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances,” *J Energy Storage*, vol. 1, no. 1, pp. 7–14, 2015, doi: 10.1016/j.est.2015.04.001.
- [35] Miklós Berczeli, “Járműipari kötések fejlesztése felületkezelési eljárásokkal,” 2022, Accessed: Nov. 16, 2024. [Online]. Available: <https://repozitorium.omikk.bme.hu/items/036f970b-a973-4d76-b52c-7a045ba53028>
- [36] Loctite, “Loctite Ablestik 2902.” Accessed: Nov. 16, 2024. [Online]. Available: https://www.henkel-adhesives.com/de/en/product/electrically-conductive-adhesives/loctite_ablestik29020.html