



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Villamosmérnöki és Informatika Kar  
Elektronikai Technológia Tanszék

TDK DOLGOZAT

2012/13. TANÉV 1. FÉLÉV

# MIKROHUZALKÖTÉSEK ÉS MINŐSÉGELLENŐRZÉSÜK

Készítette: Róka Péter László - KA7I8P

Konzulens: Dr. Illyefalvi-Vitéz Zsolt (BME-ETT)

BUDAPEST

2012

# Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés .....</b>	<b>5</b>
1.1. A témával való foglalkozás motivációja .....	5
1.2. Rövid tartalmi összefoglaló.....	5
<b>2. Az elektronikai technológiában alkalmazott huzalkötési technológiák és fejlesztési irányaik.....</b>	<b>7</b>
2.1. A mikrohuzalkötések bevezetése .....	7
2.2. A huzalkötési technológiák csoportosítása .....	7
2.3. A termokompressziós huzalkötés.....	8
2.4. A termoszonikus huzalkötés .....	8
2.4.1. A termoszonikus huzalkötés elterjedése és tulajdonságai .....	8
2.4.2. A termoszonikus és a termokompressziós huzalkötés folyamata.....	10
2.5. Az ultrahangos huzalkötés .....	11
2.5.1. Az ultrahangos huzalkötés elterjedése és tulajdonságai .....	11
2.5.2. Az ultrahangos huzalkötés folyamata.....	14
2.6. A termoszonikus és az ultrahangos kötés összehasonlítása .....	15
2.7. A napjainkban elterjedő réz huzalkötés .....	18
2.7.1. A réz tulajdonságai.....	18
2.7.2. A rézgolyó kialakítása .....	19
2.7.3. A réz keménységének hatása .....	21
<b>3. Huzalkötésekhez alkalmazott kontaktusfelület fémezések.....</b>	<b>24</b>
3.1. Rétegfelviteli technológiák és anyagválasztás .....	24
3.2. Fémbevonatok készítése termikus eljárásokkal .....	25
3.2.1. Termomechanikai fémbevonás .....	25
3.2.2. Vákuumtechnikai fémbevonás .....	25
3.3. A kémiai redukciós fémbevonás .....	25
3.4. Fémbevonatok készítése elektrokémiai eljárásokkal .....	27
3.4.1. Az elektrokémiai eljárásokról általában .....	27
3.4.2. Fémbevonatok készítése külső áramforrás nélkül, cementálás .....	27
3.4.3. Fémbevonatok készítése külső áramforrással, galvanizálás.....	29

3.5. A huzalkötéseknél alkalmazott kontaktusfelület bevonatok fejlődése.....	30
3.5.1. A rézhuzal használatának kihatásai a kontaktusfelület fémezésekre.....	30
3.5.2. A palládium használata kontaktusfelület fémréteggént .....	31
3.5.3. A rétegvastagságok hatása.....	32
3.5.4. A palládium típusának hatása .....	33
3.6. A legelterjedtebb és újabb kontaktusfelület bevonatok összehasonlítása .....	35
<b>4. A huzalkötés folyamatát befolyásoló változók és a</b>	
<b>    destruktív minőségellenőrzés .....</b>	<b>36</b>
4.1. Az ék hatása a kötés minőségére.....	36
4.2. A huzal/szalag hatása a kötés minőségére .....	36
4.3. A hordozó hatása a kötés minőségére .....	37
4.4. A huzalkötés folyamatparamétereinek hatása a kötés minőségére .....	37
<b>5. A huzalkötő szerszám és a non-destruktív minőségellenőrzés .....</b>	<b>41</b>
5.1. A huzalkötő szerszám felépítése és működése.....	41
5.2. Az ultrahang generátor és átalakító.....	43
5.2.1. Az ultrahang generátor felépítése .....	43
5.2.2. Az ultrahang generátor fáziszárt áramköre .....	43
5.2.3. Az ultrahang generátor működési módjai .....	44
5.2.4. Az ultrahang generátor és átalakító belső változói.....	45
5.2.5. Az ultrahang generátor és átalakító külső változói.....	46
5.3. A kötési folyamat ellenőrzése önérzékelős piezoelektromos	
átalakítón keresztül .....	47
5.3.1. Non-destruktív kötésminőség monitorozási technikák .....	47
5.3.2. A szabályozó áramának mérésén alapuló mérési módszer .....	47
5.3.3. A huzal deformációján alapuló mérési módszer .....	48
5.3.4. A vibrációkon alapuló mérések .....	49
5.3.5. Az átalakító vibrációján alapuló mérés.....	49
5.3.6. Az ék vibrációján alapuló mérés .....	49
5.3.7. A termoszonikus huzalkötés valós idejű, in-situ (helyben végzett)	
megfigyelése .....	51

<b>6. Gyakorlati munka .....</b>	<b>52</b>
6.1. A félautomata huzalkötő gép használata.....	52
6.2. Tesztlemez tervezése összehasonlító vizsgálat elvégzéséhez .....	58
6.3. Az elkészített kötések.....	59
6.4. A nyíró és húzó tesztek során kapott eredmények .....	62
<b>7. Összefoglalás.....</b>	<b>67</b>
<b>8. Hivatkozott irodalom .....</b>	<b>69</b>

# 1. Bevezetés

## 1.1. A témával való foglalkozás motivációja

Napjainkban az elektromos összeköttetések jelentős részét mikrovezetők alkotják. Jelenleg már több mint 10 milliárd összeköttetést hoznak létre ezzel a technológiával az egész Földön. Ezek nagy részét a chipok, *LED*-ek gyártása, tranzisztorok összekötése (pl. *IGBT*) fedi le. Így például az autópárhuzamban is kezdenek minél inkább elterjedni a *LED*-ek használata, mind elülső fényszórók, féklámpák, indexjelzések mind belső világítás és információs rendszerek háttérvilágítása területén.

A hagyományos és elektromos gépjárművek területén létrejött új fejlesztéseknek köszönhetően megnövekedett az igény az *IGBT*-k (*insulated gate bipolar transistors* - szigetelt kapujú bipoláris tranzisztorok) használatára. Mára már a kereskedelmi forgalomban kapható gépjárművekben is találkozhatunk nagy intenzitású gázkisüléses (általában xenon) lámpákkal (*high-intensity discharge*) és közvetlen üzemanyag befecskendező rendszerekkel (*super-accurate direct fuel-injection systems*), melyek meghajtása és vezérlése több mint 100 V fölötti feszültségértékeket kíván. Mindezek mellett a jelenleg elterjedő hibrid és tisztán elektromos járművek működéséhez közel 1000 Voltos feszültségértékek kellenek, melyek újabb igényeket támasztanak az *IGBT*-k felé, és szükségessé teszik alkalmazásukat az autópárhuzamban.

Mindemellett az *IGBT*-k használata már korábban elterjedt a mezőgazdasági és munkagépek, az intelligens épületszabályozás (lámpák, légkondicionálók, biztonsági berendezések), nagyteljesítményű orvosi gépek (*CT*, *MRI*, röntgen), tömegközlekedés (villamos motorok, trolis, metró, vonat, villamos), ipari robotok, erőművek vezérlésének (a megújuló energiaforrások területén: geotermikus-, víz-, naperőművek és szélturbinák szabályozásának) területén.

## 1.2. Rövid tartalmi összefoglaló

Nagyteljesítményű elektronikában, amilyen pl. az *IGBT*, alumínium és réz huzalt/szalagot használnak. Emellett egyre inkább kezd elterjedni a finom rásztrosztású réz huzalkötés is. Utóbbi fejlesztésének a legnagyobb hajtóereje a réz felületi bevonatok használatának kívánalma chipok kontaktusbevonataként. A technológiai fejlődésével és elterjedésével párhuzamosan a lekötött huzalok száma évről-évre növekszik. A technológia használata és infrastruktúrája már annyira elterjedt, hogy semmilyen más chip beültető eljárás nem tudja pótolni a közeljövőben, habár más technológiák,

különösképpen a *flip chip* technológia és variációinak használata gyorsabb ütemben növekszik.

Az ipar a huzalkötések területén a magasabb kihozatal, a kisebb rasztertávolság (20  $\mu\text{m}$  ék- és golyós kötés esetében is), és a csökkenő költségek irányába halad. Mindezek számos új technikai és anyagválasztási újításokat hoznak magukkal. Ilyenek például az új kontaktusfelület fémezések (palládium és különböző nikkelt alapú struktúrák használata), nagyfrekvenciás ultrahangos energia használatának optimalizálása, a kötések valós idejű minőségellenőrzése, és az újfajta chiptokozó anyagok által okozott problémák kiküszöbölése stb. Ezen kérdésekre keresek időszerű válaszokat szakirodalmi kutatás alapján. Ezenkívül az Elektronikai Technológia Tanszéken megtalálható félautomata ultrahangos huzalkötő gép használatának segítségével megismerkedek a huzalkötő gépek alapbeállításával. Továbbá a gép által kezelt alumínium huzalhoz az ipari trendeknek megfelelő kontaktusfelület bevonatokkal panelt tervezek, melyeken a géppel kötésekkel létesítek és destruktív tesztek során kiértékelek.

## **2. Az elektronikai technológiában alkalmazott huzalkötési technológiák és fejlesztési irányaik**

### **2.1. A mikrohuzalkötések bevezetése**

Mikrohuzalkötéssel két áramvezető felületet kötünk össze egy vékony (10–500  $\mu\text{m}$ ) átmérőjű fém huzal vagy hasonló keresztmetszeti méretű fém szalag segítségével. [1] Szilárd fázisú hegesztési eljárás, mely folyamat során a huzal és a kontaktusfelület határán megbomlik a szennyező réteg, csökken a felszín egyenetlensége és az atomok közti diffúzió során intermetallikus réteg jön létre, minimum néhány ezer atom vastagságban. Ez a réteg szilárdabb, mint a tiszta fémek, de egyben törékenyebb is. [2]

A mikrohuzalkötés valamennyi elektromos kötési technológia közül a legrugalmasabb. Méretcsökkenésen átesett chippek vagy megváltoztatott kontaktusfelület-elrendezés esetén a gépek rendszerint rövid idő alatt újraprogramozhatók. Kis és nagy darabszámú termelés esetén is jó ár/teljesítmény arányt nyújt a technológia, és mivel a chippeket aktív felületükkel felfelé néző irányban kötik be, így a hő a hátoldalról a chiprögzítő anyag segítségével hatékonyan átvezethető a szerelőlemezre. [2]

Hátránya viszont, hogy a mikrohuzalkötés alkalmazása nagyszámú ( $\geq 500$ ) csatlakoztatott kötéssel rendelkező eszközöknél vagy rendkívül körülményes, vagy egyenesen lehetetlen. Éppen ezek miatt bizonyos esetekben a mikrohuzalos technológia alkalmazása kivitelezhetetlenné válik, ezért alternatív technológia után kell nézni, amely lehet pl. a flip-chip technológia vagy a TAB (*Tape Automated Bonding*) technológia.

### **2.2. A huzalkötési technológiák csoportosítása**

A huzalkötés létrehozása során jó tapadás akkor alakul ki, ha működésbe lépnek a van der Waals-erők, azaz a huzal és a kontaktusfelület atomi közelségbe kerülnek. Ehhez a nyomás mellett szükséges energiát közölhetik hő vagy ultrahangos vibráció formájában, valamint ezek kombinációjaként. [2]

Ennek megfelelően a mikrohuzalkötés (*wire bonding*), magyarázva „bondolás” három technológiai csoportra osztható: [1]

- termokompressziós,
- ultrahangos,
- termoszonikus.

A mikrohuzalkötések a kötési geometria szerint is csoportosíthatók. Ennek megfelelően alapvetően a huzal két végén kialakított kötés alakja szerint kétféle kötési módszert különböztetünk meg: [2]

- golyós-ékes (a továbbiakban golyós kötés),
- ékes-ékes kötés (a továbbiakban ékes kötés).

### **2.3. A termokompressziós huzalkötés**

A termokompressziós kötést (*thermo-compression bonding*) a Bell Laboratories alkalmazta először 1957-ben. A termokompressziós kötés lényegében szilárdfázis diffúzió, amelynél a kifejtett erő jelentősen deformálja a huzalt, a nagy hőmérséklet megindítja az anyagok egymásba diffundálását és a többi huzalkötési technológiánál hosszabb kötési idő alatt a felületek szorosan összetapadnak. [2]

A diffúzió folyamata exponenciális arányban áll a hőmérséklet nagyságával. Így, a hőmérséklet apró emelkedése is szignifikánsan javíthatja a kötési folyamatot. [5] A legtöbb mikroelektronikai alkalmazásban a kb. 300 °C-os hőmérsékletű hőközlés szolgáltatja az aktivációs energiát a folyamatokhoz. Ezt a hőmérsékletet általában a teljes eszköz előmelegítésével érik el [2]

Manapság a gyakorlatban, sorozatgyártásban lényegében már nem alkalmazzák ezt a kötési módszert, mivel a folyamat alatt jelen lévő magas hőmérséklet káros hatással lehet az alkatrészekre, és ez a technológia a másik két fajtánál lényegesen érzékenyebb a felületi szennyeződésekre (megtapadt gázokra, oxidokra stb.). A módszer egyetlen lényegesebb előnye, hogy a magas hőmérséklet miatt nincs szükség az ultrahangos rezgetés alkalmazására. [2]

### **2.4. A termoszonikus huzalkötés**

#### *2.4.1. A termoszonikus huzalkötés elterjedése és tulajdonságai*

Manapság a golyós, sokáig csak aranyhuzallal, manapság már rézhuzallal is végzett termoszonikus kötés (*thermosonic bonding*) az egyik legnépszerűbb mikrohuzalkötési technológia. [2] Jellegzetes alakját tükrözi a 2.1. ábra. A termoszonikus huzalkötést tipikusan 25 µm átmérőjű huzallal vagy szalaggal végzik. Az első kötést hívjuk golyósnak (*ball bond*) (2.2. ábra), az íves huzalvezetés – hurokképzés – után képzett második kötést pedig ékesnek. Angolszász szakirodalomban a *stitch*, *crescent*, vagy *tail*

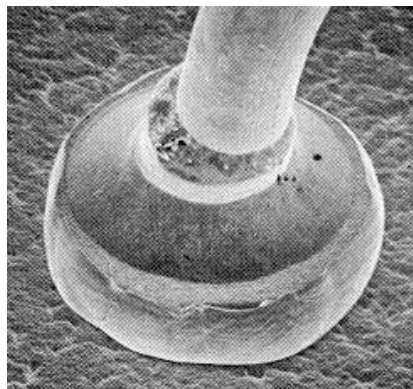


*bond* megnevezést használják, a szerszámot tekintve kifejezetten ékes kötésnél a *wedge bond* az elterjedt. [3]

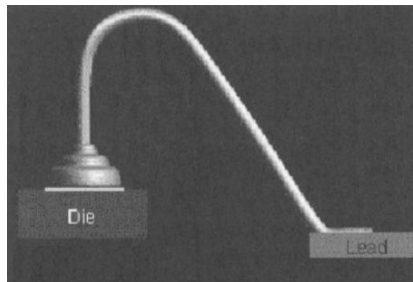
Az ékes kötés alakja változó, a szerszám alakjától függően lehet:

- lapos,
- „fordított koporsó”,
- háromszög keresztmetszetű.

Mind a golyós, mind az ékes kötés esetén a kötés az ultrahangos energia, a huzal kontaktusfelületre kifejtett nyomásának és a kontaktusfelület melegítésének hatására alakul ki. [2] Néhány huzalkötő berendezés rendelkezik melegített kötőfejjel, aminek használata javítja a kötés létrehozásának körülményeit. [5]



**2.1. ábra. Termoszonikusan kötött arany golyó SEM képe. [33]**



**2.2. ábra. Egy termoszonikus huzalkötés sematikus, oldalnézeti képe. [9]**

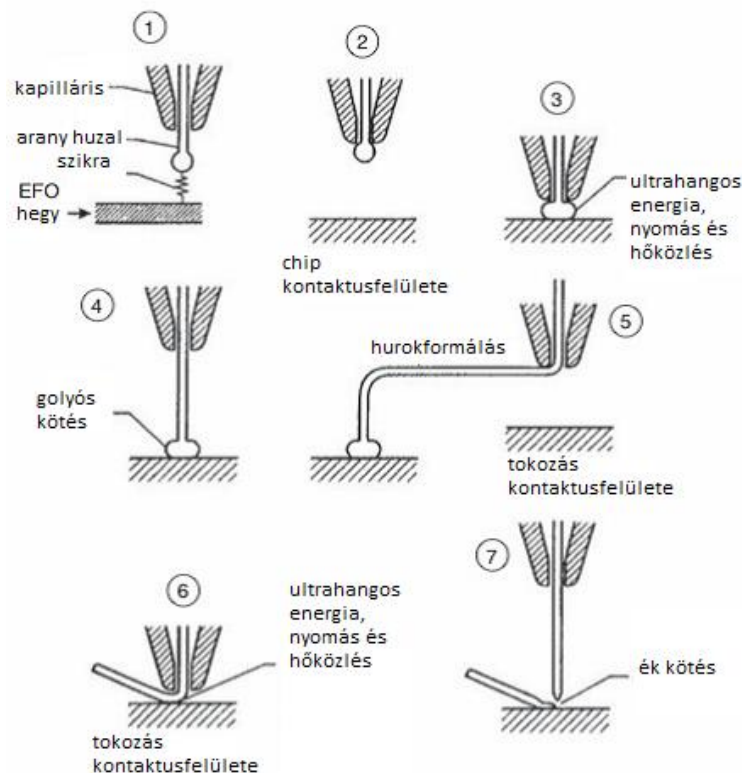
Az így kialakított kötés kiváló mechanikai és elektromos tulajdonságokkal rendelkezik. Az ultrahangos energiát hőhatással először 1970-ben Alexander Coucoulas kombinálta, ezzel ötvözve a termokompressziós és ultrahangos kötési módok előnyeit. A hőmérséklet itt jóval alacsonyabb (125–175 °C), így a hőre érzékenyebb chippek is beköthetők, illetve kevésbé kell tartani egyéb alkatrészek sérülésétől. A kötés időtartama is kisebb, 10 ms-os nagyságrendű. Az ultrahangos energia segít a felületi szennyeződések, oxid rétegek eltávolításában, a huzal és a kötési felület egymáshoz kötésében. [3]

A tapasztalatok szerint ez a módszer az egyik legmegfelelőbb nagyfrekvenciás áramkört alkalmazások számára. Széles körben alkalmazzák az iparban, legfőképp chipok tokba szerelésénél és más nagy megbízhatóságú elektronikai termékek esetében. [4]

Réz felületre csak speciális körülmények között lehet ilyen kötést készíteni, ezért a rézre különböző fémbevonatokat választanak le. Ilyen pl. az ENIG (*electroless nickel, immersion gold*), az arany és az immerziós ezüst.

#### 2.4.2. A termoszonikus és a termokompressziós huzalkötés folyamata

A golyós kötés kialakításának egyszerűsített lépései figyelhetőek meg a 2.3. ábrán (amennyiben ultrahangos rezgés is történik, termoszonikus, egyébként termokompressziós kötési technológia).



2.3. ábra. Termokompressziós és termoszonikus golyós kötés egyszerűsített folyamata. [8]

1. A huzalt keresztülvezetik a kapillárison, majd a végét elektromos kisülés megolvasztja golyót formálva.
2. A huzal visszacsévélődik annyira, hogy a golyó a kapilláris aljánál legyen.
3. A szerszám leereszkedik az előmelegített kötési felülethez és neki préselődik. Közben (termoszonikus technológia esetén) ultrahangos energiát közölnek, kialakul a golyós kötés.
4. A szerszám felemelkedik a felülethez kötött golyót hátrahagyva.

5. Hurok formálódik, ahogyan a második kötés helyére mozog a szerszám.
6. A szerszám ismét lenyomódik, létrehozva a második (ékes) kötetést (mint a 3. lépés).
7. A kapilláris felett elhelyezkedő csipesz (nincs az ábrán) összeszorítja a huzalt, majd a szerszám felemelkedik, ezzel elszakítva a huzalt, majd kezdődik újra az egész folyamat. [8]

## **2.5. Az ultrahangos huzalkötés**

### *2.5.1. Az ultrahangos huzalkötés elterjedése és tulajdonságai*

Az ultrahangos kötés fémek összekötése az érintkezési felülettel párhuzamosan, az összekötendő darabba bevezetett mechanikai rezgés, valamint az erre merőlegesen ható sajtoló nyomás egyidejű alkalmazásával. A használt nyomóerő sokkal kisebb és a kötési idő is rövidebb az ultrahangos és a termoszonikus kötésnél, mint a termokompressziósnál. Ennél a kötési technológiánál arany helyett inkább alumínium és manapság már réz huzalt is használnak (melyek jobb vezetési tulajdonságokkal rendelkeznek és olcsóbbak, mint az arany), előbbit arany, alumínium kontaktusfelülettel, utóbbit ENIG, ENEPIG bevonatú kontaktusfelületeken. [5]

Az ékes kötés a kötőszerszám alakjáról kapta a nevét, a szakirodalom ék-ék (wedge-wedge) kötésként is gyakran hivatkozik rá. A kötőszerszámként használt ék szerepe a megfelelő kontaktus kialakítása. A huzalt a vízszintes kötési síkhoz képest 3–60° szögben adagolják az éken kialakított furaton vagy az ék mellett lévő kapillárison keresztül. [2]

Az ultrahangos ék-ék huzalkötési módszer a legrégebbi félvezető kikötési technika (az 1960-as években fejlesztették ki [7]), amelynek kialakulása csak a nyomástól és az ultrahangos energiától függ. Vannak kivételek, ahol hővel kombinálva használják, hogy ezzel is növeljék az intermetallikus réteg kialakulásának valószínűségét. [4] A minden területre kiterjedő alkalmazásának az aranyhuzalos, termoszonikus kötési módszer elterjedése vetett véget.

Három fő folyamatparaméter és jellegzetes értékeik, melyek lényegesek a kötés kialakításánál az alábbiak: [7]

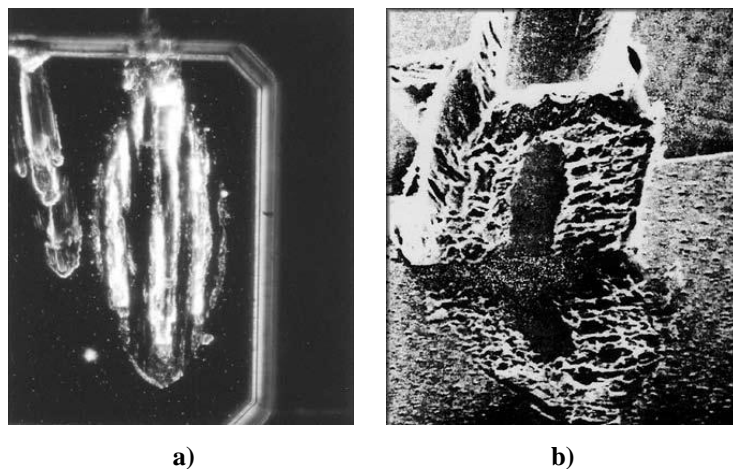
- P (Power), energia: 0,5–1 W (100 kHz-en),
- F (Force), erő: 30–40 cN,
- T (Time), idő: 5–100 ms.

A berendezés fontosabb részegységei:

- ultrahang-generátor (egészen 100 kHz-ig),
- mechanikus rezgéstranzformátor,
- szerszám (ék - wedge). [7]

Kedvező ára, kiváló automatizálhatósága és az ultrahangos technika révén alkalmazható szobahőmérsékleti kötési hőmérséklet miatt az alumíniumhuzalos ultrahangos kötést igen elterjedten alkalmazzák. [2] Ma is ez a domináns technika például a teljesítmény áramköröknél alkalmazott nagy átmérőjű alumínium huzal kötésénél is. Az elérhető kötési sebességet csökkenti, hogy a rezgő, kombinált átalakító kötőszerszám eszközt az első kötéstől a másodikig csak egyenes vonalban lehet vezetni. [5]

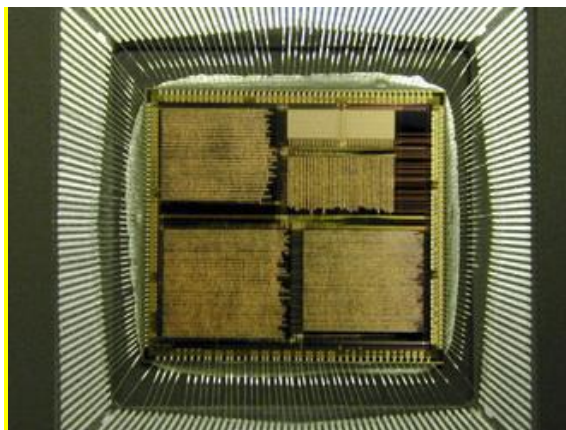
A domináns ultrahangos frekvencia egészen a '90-es évek elejéig 60 kHz volt, amikor is Japán kutatók elkezdték használni a 60 kHz feletti ultrahangos frekvenciát az arany huzal alumínium kontaktusfelület-re való kötése során. Aminek előnyös következménye a kevesebb nyitott kötés és a rövidebb kötési ciklus. A legnagyobb felfedezés az volt, hogy rájöttek, hogy a hegesztési folyamat azon nyomban megkezdődik, amint a kontaktusok összeérnek. Ráadásul az új esetben a fémesen érintkező felületek struktúrája párhuzamos hegesztési vonalak sorából állt, nem úgy, mint az addigi tradicionális alacsony frekvenciás esetben, ahol a középpontban zárvány (*void*) alakult ki, és egyetlen hegesztett sávval volt körülvéve. [4] Erre mutat példát a 2.4. ábra.



**2.4. ábra. Példa hegesztési mintázatokra: a) magas frekvenciás b) alacsony frekvenciás hegesztési mintázat. [4]**

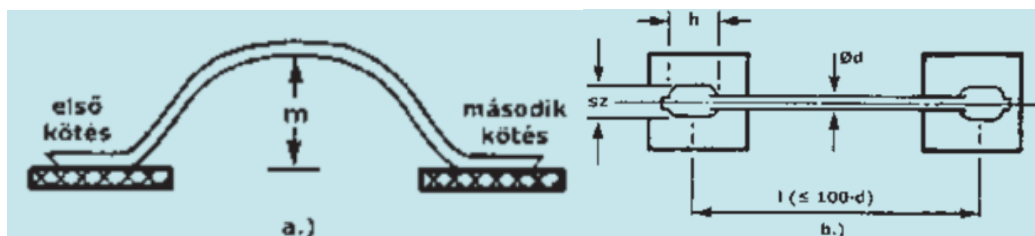
Az ékes kötés során a huzal keresztmetszeti felületét körülbelül a felére kell deformálni. Ilyen mértékű alakváltozás során az anyagokban nagy mechanikai feszültségek és ennek következtében általában rugalmas erők ébrednek, így lepattanhatnak a felületről, elszakítva a kötést. Éppen ezért használnak aranyat vagy alumíniumot, mivel ezek az anyagok kibírják ezt a deformációt anélkül, hogy a visszarugózás bekövetkezne.

Általánosságban az alumínium és réz huzalos ékkötés jobb költségekkel bír, mint az arany huzallal történő kötés. Az ékkötéssel kicsi, keskeny kontaktusfelület-ekre finom rászterosztással hozhatunk létre kötéseket költséghatékony módon. Az ékes kötések vitathatatlan előnye, hogy igen kis geometriai méretekhez is lehet tervezni és készíteni őket. Ráadásul a mikroelektronika világára jellemző, hogy a chipmérettel együtt a chipenkénti kontaktusfelületek darabszáma is növekszik. A kontaktusfelületek méretei ugyanakkor csökkennek, így a kedvező helyfoglalása miatt az ékes technológiát széleskörűen használják ezen a területen, erre mutat egy példát a 2.5. ábra. [2]

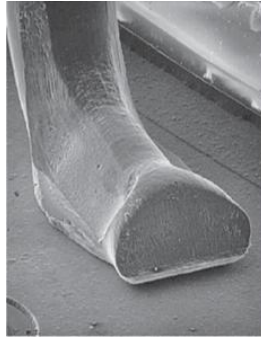


2.5. ábra. Nagy sűrűségű alumínium huzalozások egy áramkörön. [34]

A 2.6. ábra oldal- és felülnézetből ábrázolja sematikususan az ékes technikával bekötött huzalt. A 2.7. ábrán pedig egy ékes kötés elektronmikroszkóppal készített képe látható.



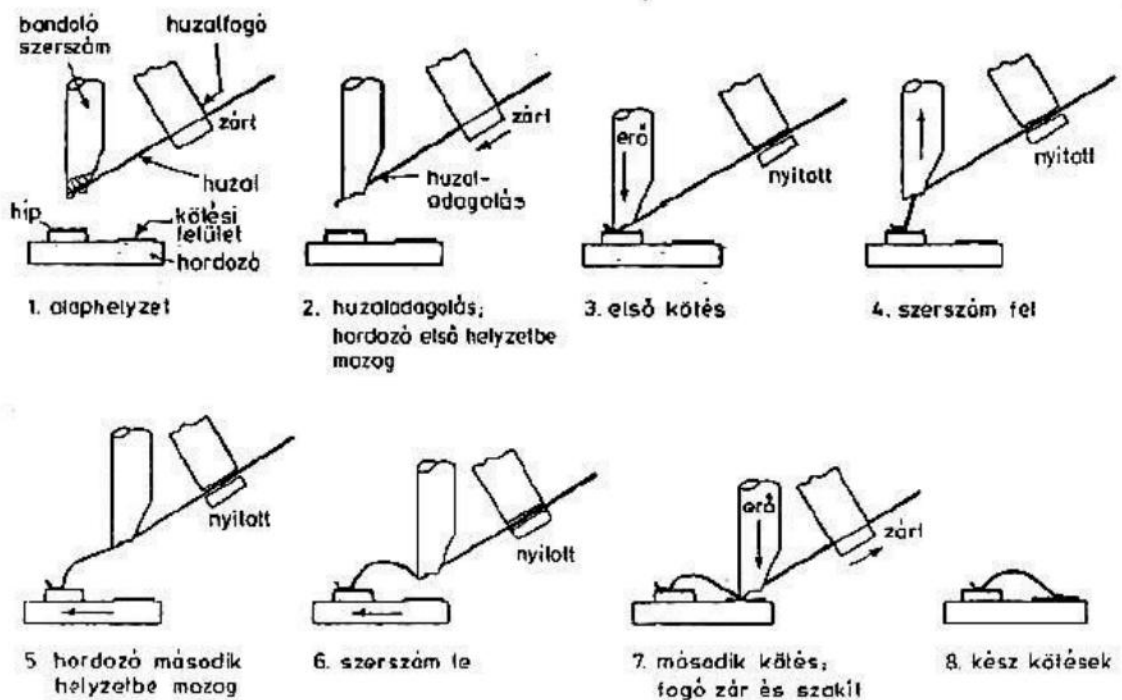
2.6. ábra. Az ékes kötés: a) oldalnézetből; b) felülnézetből. [2]



2.7. ábra. Egy ékes kötés SEM-képe. [8]

### 2.5.2. Az ultrahangos huzalkötés folyamata

Az ultrahangos ék-ék huzalkötés kialakításának egyszerűsített lépései figyelhetőek meg a 2.8. ábrán.



2.8. ábra. Az ékes kötés létrehozása. [10]

A folyamatlépések:

1-2. Az ultrahangos energiaátalakító (transducer) és az ék (wedge, anyaga általában volfrám-karbid) biztosítják a kötés létrejöttének feltételeit, mégpedig úgy, hogy az éken átfűzött huzalt egy piezokristályos elektromos szerkezet kitolja az ékből egy előre beállított eltolási értéknek megfelelően (a kristályra adott feszültséggel szabályozhatjuk az utat, azaz a huzalelőtolást és a huzalszakítást).

3. Az ék a huzalt az első kötési felületre nyomja, majd az ultrahangos energiát az ékkötés szerszámába táplálja a jelátalakítón keresztül. [7] Az ultrahangos energia mechanikai súrlódást szolgáltat, ami feltöri a felületi oxidréteget és egyben hőt termel. [4] Az ultrahangos rezgés és az ék nyomása segítségével kialakul a kötés a hordozó és a huzal között.

4-5. A huzalkötőfej eltávolodik, a huzalfogó elengedett állapota miatt a kötőfej mozgásának megfelelően hurok alakul ki.

6. Az ék a következő kötési pont fölé áll, és az előbb leírt módon létrejön a kötés az második kötési felület és a huzal között.

7-8. Ezután a huzalfogó bezár és eltávolodik, ekkor a huzal elszakad. Nagy átmérőjű huzaloknál gyakori, hogy egy kés bizonyos mélységig belevág a huzalba, vagy teljesen elvágja, megkönnyítve a szakadást. Az előtolás után kezdődik a következő kötés létrehozása. [7]

## **2.6. A termoszonikus és az ultrahangos kötés összehasonlítása**

A termoszonikus technikánál készített golyós kötés 3 mozgási tengelyt igényel (X Y Z), míg az ultrahangos technikánál alkalmazott ékes kötés 4-et (X Y Z  $\Theta$ ). Míg a termoszonikus (golyós) kötésnél csak arany és rézhuzal, addig az ultrahangos (ékes) kötésnél arany, alumínium és rézhuzalok is használhatóak a nagytömegű gyártásban. [5]

Mivel a huzalok rezgetése a huzalok tengelyének irányában történik, a kötés irányfüggő, ezáltal a huzalcsatlakoztatás szabadsága korlátozott. A két kötés létrehozása között eltelt idő ebből kifolyólag hosszabb, így az ékes folyamat lassabb (tipikusan 5 kötés/s), mint a golyós kötés (akár 10 vagy több kötés/s), mivel a kötőszerszámot mindig irányba kell állítani. Az eljárás is drágább, mint a termoszonikus kötésnél, az általuk indokolt összetett, forgó kötőfej miatt. Ritkább esetben ugyan, de alkalmazzák azt a módszert is, amikor nem a kötőfejet, hanem a hordozót forgatják a megfelelő irányba. [4]

Ma már a modern félautomata és a teljesen automata huzalkötőgépek jelentősen növelték a sebességüket és a sokoldalúságukat. Az úgynevezett „forgó fejes” ékes kötőgépek  $360^\circ$ -os kötést tesznek lehetővé, hasonlóan a golyós kötéshez. [4]

Habár az ultrahangos technológia lassabb, mint a golyós kötés, az ékkötés sok haszonnal jár, például:

- a chiphez és más kiemelkedő alkatrészekhez közelebbi kötés lehetősége (mély hozzáférés) nagyobb csatlakoztatási sűrűséget tesz lehetővé,
- finom raszterosztás (kisebb helyigény, mint a golyós technikánál),
- lapos, rövid és speciális alakra formálható hurok képzésének lehetősége, amivel hangolhatóak a mikrohullámú eszköz villamos paraméterei, így jelentős tényező a nagyfrekvenciás alkalmazások estében.

Míndezek különösen nagy jelentőséggel bírnak a kis kontaktusfelületekkel rendelkező, nagyfrekvenciás eszközöknél és az optoelektronikai alkalmazásokban; ennek megfelelően ezeken a területeken az ékkötést nagymértékűen használják. [5]

A különbség az IC tokozás és az optoelektronikai tokozás között az alábbiak:

- Az IC kötés csak a villamos jel átvitelének biztosításával foglalkozik, míg az optoelektronikai tokozás a villamos jellel ugyanúgy foglalkozik, mint az optikai jellel.
- Az IC tokozás legfőképpen golyós kötetést, míg az optoelektronikában alkalmazott kötés általánosan ékkötést vagy szalagkötést használ. Mivel az ék/szalagkötés mély hozzáférést, finom rasztert és jobb nagyfrekvenciás teljesítményt nyújt. [5]

Az optoelektronika új kihívásokat állított a huzalkötési folyamat elé. Ilyen például az érzékeny felületekre (Lítium-Niobit, Indium-Foszfát) való huzalkötés, szabadon álló vezetékekhez történő kötetést és a kötetési hőmérséklet határokat. [5]

Az aranyhuzal mellett, az arany szalagkivezetés is egyre jobban kezd népszerű lenni a magas frekvenciás eszközökben, mivel a szalagkötés előnyösebb a skin-hatás szempontjából, mely a nagyfrekvenciás jelvezetés esetén lép fel. [4]

Összességében az ultrahangos ékkötést általában alumínium és réz huzallal végzett COB (chip-on-board) konstrukciókban, teljesítmény-elektronikában használják. A mikrohullámú, optoelektronikai és hibrid eszközökben pedig aranyhuzallal végzett kötetéshez használják. [4]

A 2.1. táblázat összefoglalva mutatja a három huzalkötési technológia legfontosabb paramétereit.



2.1. táblázat. A mikrohuzalkötési eljárások legfőbb jellemzői. [5]

	<i>Termokompressziós</i>	<i>Termoszonikus</i>	<i>Ultrahangos</i>
<i>Nyomás</i>	nagy	kisebb	kisebb
<i>Hőmérséklet</i>	250–500 °C	100–220 °C	25 °C
<i>Ultrahangos energia</i>	nincs	van	van
<i>Huzal anyaga</i>	arany, (alumínium, réz)	arany, réz	arany, alumínium, réz
<i>Kötési felület anyaga</i>	arany, (alumínium, ENIG, réz)	arany, alumínium, ENIG, (réz), ENEPIG	arany, alumínium, ENIG, réz, ENEPIG
<i>Kötési idő</i>	lassú	gyors	gyors
<i>Szennyezés hatása a kötés minőségére</i>	erős	közepes	gyenge
<i>Kötés alakja</i>	golyós	golyós-ékes	ékes-ékes
<i>Huzal átmérője</i>	kicsi (<75 µm)	kicsi (<75 µm)	bármely huzal- vagy szalagméret
<i>Kontaktusfelület mérete</i>	nagy (a huzalátmérő 3-5-szöröse)	nagy (a huzalátmérő 3-5-szöröse)	Kisebb a kontaktusfelület, mint a golyós kötés esetében. Jó a mikrohullámú alkalmazásokhoz. A huzal átmérőjének 2–3-szorosa (a szalag szélességének 1,2-szerese is lehet).
<i>Kötési sebesség</i>	lassabb	gyors (10 huzal/mp)	viszonylag lassú (4 huzal/mp)
<i>Kötőszerszám neve</i>	kapilláris	kapilláris	ék

A 2.1. táblázatból és az eddig leírtakból is könnyen látható az ultrahangos kötés előnyei és a termokompressziós kötés hátrányai, ezeknek megfelelően már nagyon ritka utóbbinak a használata. A termoszonikus és az ultrahangos kötés között az alkalmazás dönti el, hogy melyiket ajánlatosabb használni.

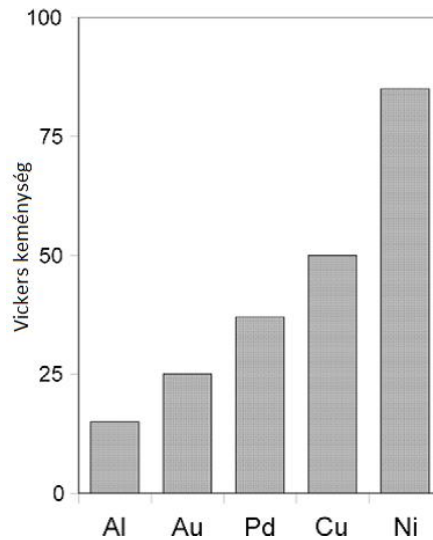
## 2.7. A napjainkban elterjedő réz huzalkötés

### 2.7.1. A réz tulajdonságai

Ahogy arról már volt szó, az arany huzallal való kötés már több mint húsz éve dominál az iparban. Ezt a magas megbízhatóságának, könnyű alakíthatóságának és oxidációnak való ellenállásának is köszönheti. [13] Azonban az elmúlt évtizedben az arany ára megnégyszereződött, ennek következtében a félvezető ipar egy része elkezdett fokozatokban áttérni a rézhuzal használatára az aranyhuzal helyett. Sőt manapság már az összes nagyobb gyártó rendelkezik jelentős rézhuzallal végzett kötési technológiával. [12]

Jelenleg a réz és az alumínium huzalkötés használata már népszerűbb a kiskereskedelmi vastag huzalos, olcsó alkalmazásoknál és a félvezető termékeknél, mint az arany huzalkötés. Költséghatékonysága mellett, más előnye is van a rézhuzal használatának, például a jobb elektromos és hő vezetőképesség, ezenkívül a réz nagyobb *Young*-modulusa (kisebb rugalmassága) az aranyéhoz képest megkönnyíti a hosszú, vékony huzalkötés készítését a finom rászterosztású alkatrészek esetében. [13] A jobb hővezetőképességének köszönhetően a chipektől nagyobb mértékben tudja elszállítani a hőt, így lehetőséget biztosít azok teljesítménynövelésére. Továbbá a chipék működés közbeni megbízhatóságát is növeli. [23] A réz egyik előnye még a műanyag tokozás során a huzaldeformálódásnak való nagyobb ellenállása, ez az úgynevezett „*wire sweep*”. [38] Ennek előnyös következménye, hogy nagyobb lehet a távolság a golyós és az ékes kötés között. [37]

Az ilyen áttérés azonban több kihívást is hordoz magával. Ezek közé tartozik, hogy a kontaktusfelületek fémrétegeinek anyagai és azok vastagságai a lágyabb arany vagy alumínium huzallal végzett kötésre voltak optimalizálva, mely nem minden esetben alkalmas a réz huzalkötésre. Mindemellett probléma még a réz oxidálódásra, korrózióra való erős hajlama, és a nagyobb keménysége. A 2.9. ábra szemlélteti a huzalkötésnél alkalmazott anyagok Vickers keménységét. [12]

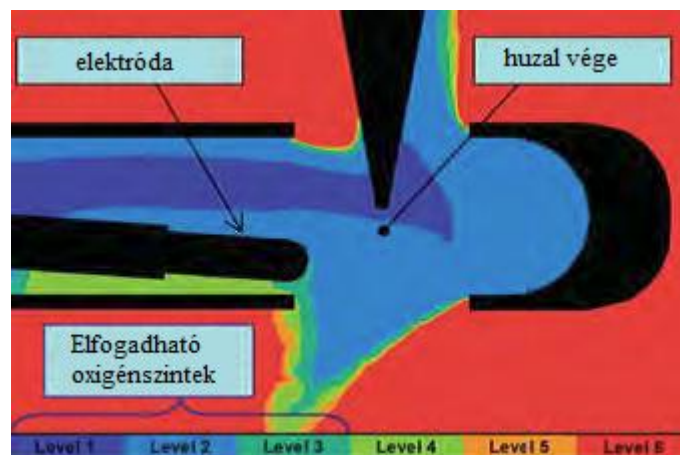


2.9. ábra. A tiszta fémek Vickers keménységének összehasonlítása (ötvözés esetén változhatnak az arányok). [12]

### 2.7.2. A rézgolyó kialakítása

Általánosságban elmondható, hogy a termoszonikus kötési folyamat első lépéseként kialakított golyó térfogata, azaz a megolvadt anyag mennyisége a szikra időtartamától és áramerősségétől függ. [31] A rézhuzallal végezhető golyós kötés kialakításának folyamatában, a réz oxidációra való erős hajlama miatt speciális berendezésre van szükség, olyanra, mely oxigénmentes közeget tud biztosítani a golyós kötés kialakítása közben, így csökkentve a réz oxidációját. [5]

Az alkalmazott védőgáz összetétele általában 95% nitrogén, 5% hidrogén. Utóbbi használatának célja a redukálás, azaz, hogy az elektróda kisülésének pillanatában minden maradék oxigénnel reakcióba lépjen. [22] A védőgáz áramlásának modelljét tükrözi a 2.10. ábra.



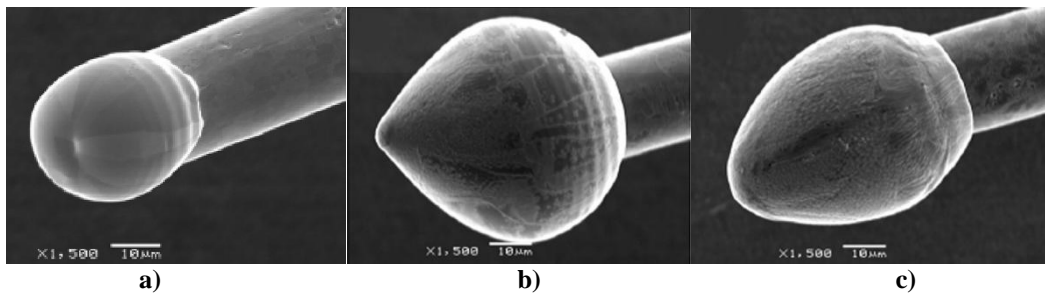
2.10. ábra. A védőgáz közeg áramlásának modellje a golyóformálás közben. [22]

A 2.11. ábra egy gyakorlati megoldást mutat a problémára. Ebben az esetben a védőgázt áramoltató csőnek magas olvadáspontúnak kell lennie, hogy ellenálljon a szikrának és az olvadt fémnek (réz esetében 1084 °C). [24]

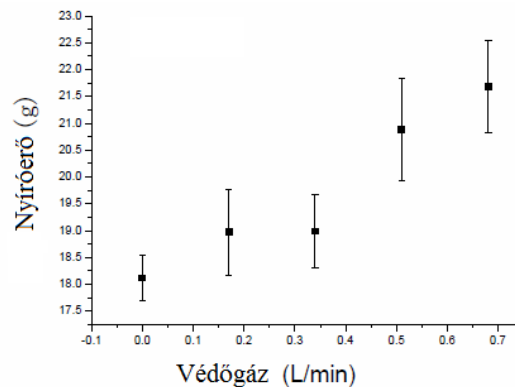


2.11. ábra. Szabadalmaztatott, oxidációt szabályozó mikrokörnyezet. [24]

Azon esetekben, amikor a kívánt méretű golyó sugarának és a huzal átmérőjének a hányadosa 1.6 vagy kevesebb, az áramló védőgáz hűtő és formáló hatással bír, melynek negatív következménye a különböző térfogatú, aszimmetrikus alakú golyók. [24] Továbbá általánosságban elmondható, hogy minél nagyobb a védőgáz áramlási sebessége, annál jobb lesz az oxidációt gátló folyamat teljesítménye mellyel együtt a kötése erősség is nő, viszont a költségek és az áramló védőgáz által okozott deformáció mértéke is növekszik. Drasztikusabb deformációkra mutat példát a 2.12. ábra. A kötése erősség és az áramlás mértékének összefüggését a 2.13. ábra jól tükrözi. [25]



2.12. ábra. 95 % nitrogén és 5% hidrogén összetételű védőgáz áramoltatásának hatása a golyó alakjára: a) arany huzal 0.8 l/min b) réz huzal 0.4 l/min c) réz huzal 0.75 l/min. [32]



2.13. ábra. Különböző védőgáz áramoltatási sebességgel készült golyós kötések nyíró tesztjének eredményei [25]

A védőgáz alkalmazásának ellenére keletkezett oxid rétegek paramétereit foglalja össze a 2.2. táblázat.

**2.2. táblázat. A kialakított golyókon lévő oxid koncentráció és vastagság [25]**

<i>Védőgáz áramlási sebesség (l/min)</i>	<b>0</b>	<b>0,17</b>	<b>0,34</b>	<b>0,51</b>	<b>0,68</b>
<i>Kiindulási koncentráció (atom %)</i>	16	13	15,8	13,2	13,2
<i>Oxid vastagság (μm)</i>	0,48	0,45	0,25	0,17	0,17

Ha a költségcsökkentés a cél, akkor a kapott eredményekből a 0.51 l/min átfolyási sebesség használata az ajánlott. Mivel onnantól kezdve csökken az oxid vastagsága, és elég erőssé válik a kötés szilárdsága is egyben.

Az ultrahangos vibráció során a rézhuzal a rajta lévő vékony oxidréteg miatt némileg megcsúszhat, ami rontja a kötési folyamat hatásfokát. Ennek a problémának és a golyó formálásának megkönnyítésének érdekében elterjedt még a palládium réteggel bevont rézhuzal használata. Igaz, ez megnöveli a költségeket (2-3-szor drágább az ilyen huzal, mint a sima), de még mindig sokkal olcsóbb, mint az arany huzal használata. Ráadásul az ilyen huzal használata 50%-kal erősebb ékkötéseket eredményez és tárolhatósági és használhatósági időtartama (30 nap) is hosszabb, mint a bevonat nélküli rézhuzalé (7 nap). (Az arany huzalokat 6 hónapig lehet használni.) Egyetlen nagyobb hátránya, hogy a szikrával létrehozott golyó keményebb, mint a bevonat nélküli esetben. [22] Szabályos golyó kialakításánál itt is szükség van védőgáz alkalmazására, de itt már elegendő a tiszta nitrogén használata.

A szikra áramerősségének nagyságától függ a kialakult golyó fontosabb tulajdonságai:

- kis áramerősségen a palládium nem éri el az olvadáspontját, nagyrészt a golyó felszínén marad; a golyó belseje tiszta rézből áll,
- nagyobb áramerősségen a palládium megolvad (1555 °C), palládium oszlik szét véletlenszerűen a golyó belsejében, rézzel ötvözetet létrehozva, így megnövelve a golyó keménységét. [31]

### 2.7.3. A réz keménységének hatása

A réz nagyobb keménysége, mely a kötési folyamat során a deformáció miatt 50%-kal is megnőhet, szintén több nehézséget okoz. [12] Magasabb kötési erőre van szükség ahhoz, hogy ellensúlyozzák ezt a nehezebb megmunkálhatóságot, és kielégítő szilárdságú kötések hozhassanak létre. Így a kötési folyamat során az ultrahangos

teljesítmény táplálásánál a már eredetileg alkalmazott magasabb huzalkötő erőhöz hozzáadódik még az ultrahangos rezgetésből (20%-kal magasabb ultrahangos energia, mint arany esetében [12]) adódó nyíróerő is. [13] A 2.3. táblázatban egy kísérlet eredményei láthatóak, melyek alátámasztják az előbb mondottakat.

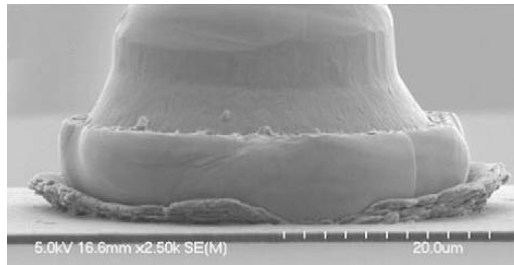
**2.3. táblázat. Réz és arany huzal és kötéseik keménységének összehasonlítása [24]**

<i>Fém</i>	<i>Kialakított golyó keménysége</i>	<i>Maximális kötési erő alkalmazása után</i>	<i>Minimális kötési erő alkalmazása után</i>
<i>Arany</i>	60 HV	84 HV	60 HV
<i>Réz</i>	86 HV	125 HV	95 HV

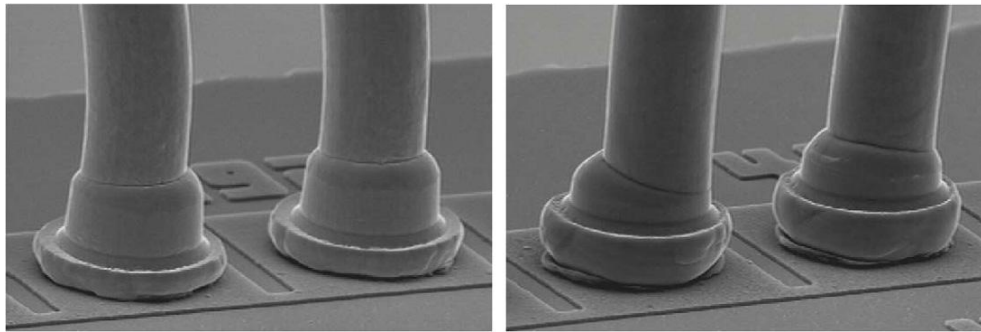
Mindez több problémát okozhat a félvezető chippek kontaktusfelületeinek kötése során, melyek fémezése évtizedek óta elterjedten az alumínium, köszönhetően, hogy nem túl drága, és mivel oxid rétege vékony és törékeny így könnyen köthető, legfőképpen arany huzallal. [12] Azonban rézhuzal kötése során a fellépő magasabb erő képes áthatolni a kontaktusfelület fémezésén keresztül a törékeny dielektrikum alsórétegbe lehetséges meghibásodásokat okozva és tönkretéve az ott lévő érzékeny struktúrát. Valamint a kontaktusfelületen repedéseket és kötési hibákat eredményezhet. [13]

Mechanikai szempontból vizsgálva a huzalkötést, két, különböző tulajdonságokkal rendelkező anyag találkozásánál egyértelműen a puhább anyag fog nagyobb mértékű deformációt szenvedni. Ennek eredménye, hogy a magas keménységű réz felgyűrheti az alumínium réteget a kötés szélére az ultrahangos rezgetés irányában (2.14. ábra) - ezt a jelenséget „*Al splash*”-nek nevezik, és sokkal gyakoribb rézhuzal kötésénél, mint arany huzal esetében. Mindezek potenciálisan magában foglalják az eszköz károsodását és az intermetallikus réteg növekedésével párhuzamosan a kötés minőségének és megbízhatóságának csökkenését. [13] Az intermetallikus rétegnek szerepe van a kötés erősségében, azonban rosszabb vezetőképesség jellemzi, így a túl vastag réteg már rontja a kötés minőségét és megbízhatóságát.

Az arany huzalnál használatos beállításokkal alumínium felületre készített arany és réz golyós kötések között szembetűnő különbséget láthatunk a 2.15. ábrán – a keményebb réz felgyűri az alumíniumot.



**2.14. ábra. Rézhuzal golyós kötése alumínium kontaktusfelületre. [12]**

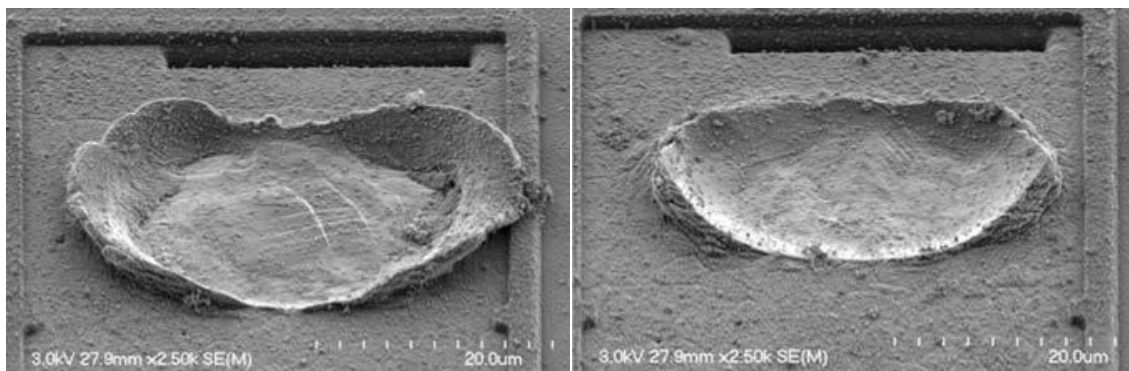


a)

b)

**2.15. ábra. Alumínium kontaktusfelületen ugyanazon folyamatparaméterekkel létrehozott golyós kötések a) arany huzallal b) réz huzallal. [26]**

A kontaktusfelület károsodás és az alumínium felgyűrődésének csökkentése érdekében kitüntetett figyelmet fordítanak a folyamatparaméterek optimalizálására, mint például az ultrahangos energia, a nyomóerő megfelelő beállítására. Azonban csupán ezen paraméterek optimalizálásával nem lehet teljes mértékben megszüntetni ezeket a problémákat, csak a mértéküket lehet csökkenteni (2.16. ábra). [13]



a)

b)

**2.16. ábra. Alumínium felgyűrődés mértéke különböző beállításokat használva:**

**a) nagy mértékű felgyűrődés általános beállításokat használva.**

**b) redukált mértékű felgyűrődés speciális réz huzalkötési folyamat beállításokkal. [22]**

Csökkenteni lehet az érzékeny szilíciumréteg meghibásodásának valószínűségét, ha a vezető furatokat a legnagyobb erőhatásoknak kitett felület alól a kontaktusfelület szélére tervezik. [22] Ezenfelül a kontaktusfelület fémezésének másképpen történő megválasztásával is csökkenthető ez a fajta meghibásodás.

### 3. Huzalkötésekhez alkalmazott kontaktusfelület fémezések

#### 3.1. Rétegfelviteli technológiák és anyagválasztás

Az elektronikai termékek gyártásánál az egyik legfontosabb anyagválasztás a felületi bevonat kiválasztása. Ez meghatározza a kihozatalt, a javítások mennyiségét, a meghibásodások mértékét, az áramkör tesztelhetőségét és természetesen a költségeket. Félrevezethető lehet a legolcsóbb bevonatot választani és a későbbiekben szembesülni azzal, hogy a járulékos költségek miatt a teljes kiadás sokkal nagyobb lesz. [20]

Általánosságban a fémbevonatokat a korrózió elleni védelemre és a fém munkadarab felületének mechanikai tulajdonságainak javítására, díszítési vagy egyéb követelmények kielégítésére (fénytükrösítésre, elektromos vezetőképesség növelésére stb.) használják. Huzalkötések esetében a kontaktusfelületeken lévő fémbevonatokat a korrózió elleni védelmen kívül a felületek mechanikai tulajdonságainak (keménységét, kopásállóságát stb.) javítására alkalmazzák. [40] A fejlődő huzalkötési technológiák esetében a kontaktusfelületek fémezésének ideális esetben támogatnia kell a rézhuzallal végzett huzalkötést, finom raszterosztású kötéseket, törekeny dielektrikum rétegek védelmét és a tesztelhetőség lehetőségét. [13]

A felhasználási területek sokféle igényét kielégítő fémbevonatok

- termikus,
- kémiai (*electroless plating*),
- elektrokémiai eljárásokkal készíthetők. [40]

A termikus eljárások közé

- a termodiffúziós,
- a termomechanikai,
- és a vákuumtechnikai fémbevonás tartozik. [40]

A kémiai (árammentes) eljárásokkal készített fémbevonatok redukációs folyamat közben mennek végbe. [40]

Az elektrokémiai eljárások közé tartozik: [40]

- a külső áramforrás nélkül végbemenő cementálás (immerziós eljárás),
- és a külső áramforrás segítségével végbemenő galvanizálás (*electrolytic plating*).



## **3.2. Fémbevonatok készítése termikus eljárásokkal**

### *3.2.1. Termomechanikai fémbevonás*

A nemvezető anyagból készült minták felületét villamosan vezetővé tenni például vákuum-fémgőzöléssel és fémszórással lehet. Ezek az eljárások kissé körülményesek és költségesek. [40] A termomechanikai fémbevonó eljárások közös jellemvonása, hogy a bevonófémet megömlesztik, a megömlesztett bevonófémet mechanikai úton (pl. sűrített gázzal) porlasztják, és a fémcseppeket nagy mozgási (kinetikai) energiával a bevonandó felületre szórják. A fémcseppekből képződő bevonat adhéziós, bizonyos esetekben kohéziós erővel tapad a munkadarab felületére, annak anyagával azonban diffúziós kötés nem jön létre. A szórt fémrétegek szövetszerkezete nem homogén, a különböző méretű és eloszlású pórusok miatt a tömörség is változó. Legelterjedtebben a szórt alumíniumbevonatokat alkalmazzák chipeken. [40]

### *3.2.2. Vákuumtechnikai fémbevonás*

A termikus fémbevonat-készítés különleges módszerei közé sorolhatók a vákuumtechnikai fémbevonások. A bevonófémet hőenergia felhasználásával és bizonyos vákuumtechnikai, esetleg még egyéb munkafolyamatok egyidejű alkalmazásával hordják fel a bevonandó felületre. Ilyen, vákuum-technikai eljárásokkal is fel lehet vinni alumíniumot chipek kontaktusfelületeire. [40]

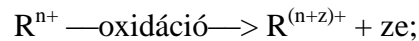
A következő főbb vákuumtechnikai eljárásokkal készíthetők fémbevonatok: [40]

- vákuumgőzöléssel,
- katódporlasztással,
- villamosszíkra-kisüléssel.

## **3.3. A kémiai redukciós fémbevonás**

Meghatározott vegyi összetételű és hőmérsékletű fémsóoldatokból szerves vagy szervetlen redukáló vegyszerek hatására tisztafém választható le. A fém a vegyületekből kémiai energia hatására válik ki, amely energia a redukálószer vegyi változásakor szabadul fel. A kémiai redukciós fémleválasztás folyamata elektronszeres reakcióval megy végbe. Burkhardt szerint maga az  $R^{n+}$  redukálószer az adott közegben oxidálódik ( $R^{(n+z)+}$ ), és bizonyos  $z$  számú elektront ( $e$ ) ad le. A felszabadult elektronokat az oldatban lévő  $Me^{z+}$  fémionok veszik fel, ezáltal a fém  $Me$  atomos állapotba kerül.

A folyamat egyenlete: [40]

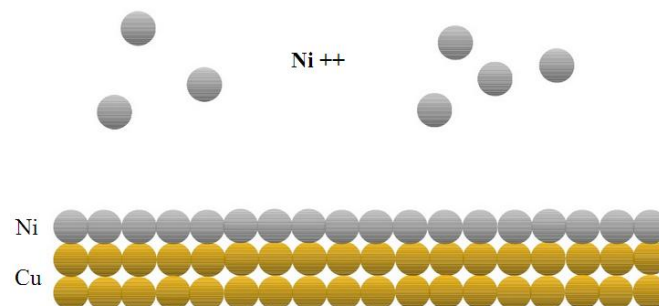


A redukálódott fém finom szemcsés eloszlásban vagy az oldatba merített munkadarab felületén tömör réteget képezve leválik. Tömör fémbevonatok az ún. katalitikusan aktív felületű fémeken kémiai redukcióval könnyen leválaszthatók. A katalitikusan nem aktív felületű fémeken, valamint a különféle nemfémes anyagokon (pl. üveg, porcelán, kerámia és műanyagok stb.) csak megfelelő különleges felületkészítő műveletek után készíthetők jól tapadó, összefüggő fémbevonatok. A kémiai redukcióval készített fémbevonatok általában pórusmentesek, a fémeloszlás a felület minden részén egyenletes, függetlenül attól, hogy a felület szemcsés, gödrös vagy üreges. [40] A fémezés általánosan keményebb, ridegebb és merevebb, mint a galván úton leválasztott rétegek esetében. [15]

A kémiai redukciós rezezés régóta ismert módszer, fő alkalmazási területe a gyengeáramú elektrotechnikai iparban van, a nyomtatott áramkörök gyártásánál (pl. furatfémezések). [40]

A kémiai redukcióval készített ezüst- és aranybevonatokat a korrózióállóságuk miatt a gyengeáramú elektrotechnikai berendezések gyártásához használják. Redukciós kezeléssel nemcsak fém, hanem bármilyen nemfémes munkadarab is ezüstözhető, aranyozható. Különösen alkalmas réz- és nikkeltövezetek aranyozására. [40]

A leggyakrabban alkalmazott és legjobban kidolgozott kémiai redukciós eljárás az ún. áram nélküli nikkelezés. [40] A 3.1. ábra sematikusán mutatja a folyamatot.



3.1. ábra. Árammentes, kémiai nikkeltövezet felvitele. [15]

Gyengeáramú berendezések alkatrészeinek gyártásakor nagyon elterjedten használják a palládiumbevonatokat, mert nemcsak villamos tulajdonságaik, hanem korrózióállóságuk, forraszthatóságuk és alakíthatóságuk is kiváló. [40]

A hagyományos galvaneljárásokkal viszonylag olcsóbb a fémbevonat-készítés, bizonyos esetekben azonban előnyösebbek a kémiai redukciós eljárások. Legnagyobb előnyük elsősorban az, hogy kémiai redukciós eljárásokkal a bonyolult alakú, mély furatokkal, résekkel, ill. erősen kiálló éllel, csúcsrészekkel kialakított munkadarabokon is teljesen egyenletes vastagságú és minőségű fémréteg választható le. [40]

### **3.4. Fémbevonatok készítése elektrokémiai eljárásokkal**

#### *3.4.1. Az elektrokémiai eljárásokról általában*

Kémiai és elektrokémiai energia felhasználásával fémtárgyakon, de nemfémes anyagok felületén is lehet fémbevonatokat készíteni. Az elektrokémiai eljárásoknál a fémbevonat készíthető: [40]

- külső áramforrás nélkül (cementálás),
- külső áramforrás segítségével (galvanizálás).

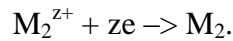
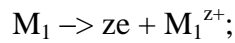
Mindkét eljárás mechanizmusa meghatározott összetételű vegyi anyagok vizes vagy egyéb oldószeres oldataiban, esetleg a vegyi anyagok olvadékában végbemenő elektrokémiai reakciók törvényszerűségein alapul. [40]

Az elektromosságot vezető anyagokban villamos áram vezetése az elektronok vagy ionok mozgása révén valósul meg; az előbbieket elsőfajú fémes vagy elektronvezetőknek, az utóbbiakat másodfajú vagy ionvezetőknek, az elektrokémiában elektrolitoknak nevezik. Az elsőfajú vezetők anyaga áramvezetés közben minőségileg nem változik meg. Ezzel ellentétben, az elektrolitokban az áramvezetés folyamata során az anyag minősége megváltozik. A felületkezeléshez általában vizes elektrolitokat használnak. [40]

#### *3.4.2. Fémbevonatok készítése külső áramforrás nélkül, cementálás*

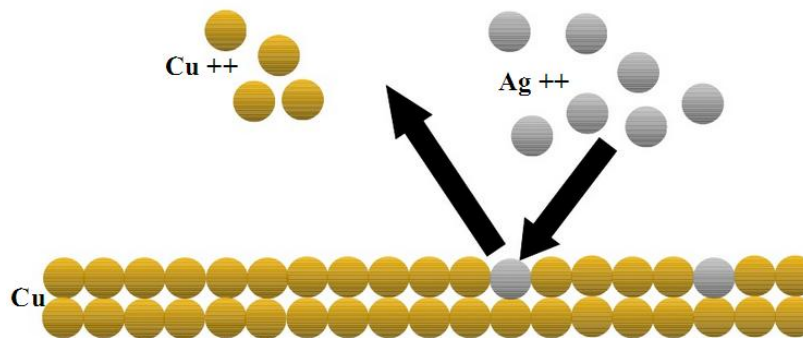
Abban az esetben, ha egy fémet ( $M_1$ ) olyan sóoldatba mártanak, amely a feszültségsorozat szerint pozitívabb potenciálú fémiont tartalmaz ( $M_2^{Z+}$ ), akkor a fém oldódik a sóoldatban, a pozitívabb (nemesebb) fémionok pedig töltésüket veszítve kiválnak a fém felületére ( $M_2$ ). [40]

Ez az ionkicserélődési folyamat a következők szerint jelölhető: [40]

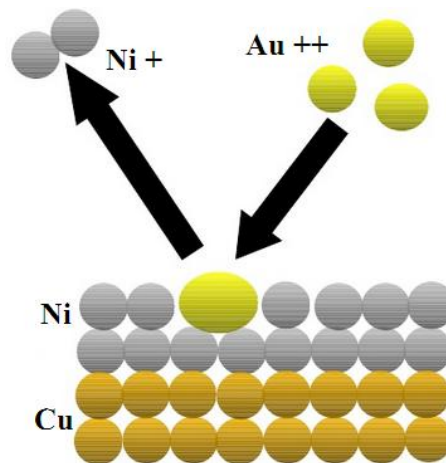


A levált fém általában laza, rosszul tapadó, porózus rétegben fedi az alapfémeket. Az ilyen rétegek általában vékonyak, mechanikai vagy korróziós igénybevétellel szemben kevésbé ellenállóak. Tehát a cementálással készített fémbevonatok galvanikus fémbevonatok alá alap- vagy közbelső réteggént használhatók. A fémcementáló fürdők optimális hőmérsékletének meghatározásakor két ellentétes szempontot kell figyelembe venni. Nagyobb hőmérsékleten nagyobb a fémleválás sebessége, viszont durvább és lazább szerkezetű fémbevonatok képződnek. Hideg oldatban mindig finomabb szemcsészetű, tömörebb és az alapfémhez jobban tapadó fémréteg cementálódik ki. Réz, nikkel, ezüst, arany és palládium rétegek leválasztására használják. [40]

Az ezüstözést (3.2. ábra) és az aranyozást (3.3. ábra.) általában meleg vagy forró oldatban végzik réz ill. nikkel rétegre. [40]



3.2. Immerziós ezüstréteg készítésének folyamata. [15]



3.3. ábra. Immerziós aranyréteg készítésének folyamata. [15]

Nikkelt általában alumíniumra választják le, előkészítve galvanikus fémbevonáshoz. Mivel alumíniumra galvanizáló eljárással nem választható le közvetlenül olyan fémbevonat, amely az alapfémre jól tapad. Réz nikkelezését általában forró oldatokban, az alumínium nikkelezését szobahőmérsékleten végzik. [40]

Palládium cementálása során meghatározott körülmények között jól tapadó, de bizonyos mértékig porózus szerkezetű réteget állítanak elő. Alkalmas az erősen igénybe vett áramkontaktushelyek oxidációtól és súrlódó igénybevételtől védő bevonataként. [40]

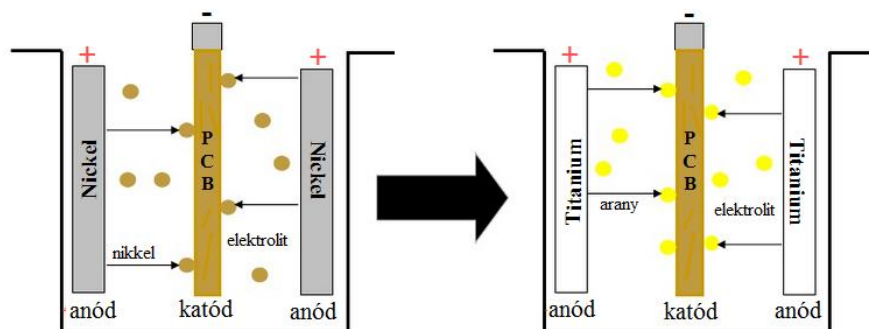
### 3.4.3. Fémbevonatok készítése külső áramforrással, galvanizálás

A galvanikus fémbevonó eljárások sikeres megvalósítása függ: [40]

- a bevonandó fém minőségétől,
- a galvánfürdő minőségétől,
- a galvanizálás üzemi jellemzőitől.

A külső áramforrás pozitív, ill. negatív pólusára kötött és meghatározott összetételű elektrolitoldatokba vagy olvadékokba merített elektródokon áram halad át az elektrolittérben. Az elektródok felületén az áram feszültségétől és erősségétől függő változások mennek végbe. Az elektródokon a villamos áram bontja az elektrolitot, ezért nevezik ezt a folyamatot elektrolízisnek. [40] A folyamat során kontroll alatt kell tartani a feszültséget, az áramerősséget, a hőmérsékletet, az időt, és az elektrolit tisztaságát. [15]

A fémsóoldatokból villamos áram hatására leváló fémek mikrokristályos szerkezetűek. A galvánrétegek egyik legjellemzőbb tulajdonsága, hogy az alapfém felületi egyenetlenségeit (érdesség, karcok, benyomódások, lyukacsok stb.) hűen követik. A felülethibák tehát a fémbevonatokon is megjelennek. Galván eljárással általában rezet, nikkelt (a nikkelezés a legrégebbi és a legelterjedtebb galvanizálási eljárás), aranyat, ezüstöt, palládiumot visznek fel a munkadarab vezető felületére. [40]



3.4. ábra. Galvanizálás folyamatának szemléltetése galván nikkel/arany esetén. [15]

A nemesfémbevonatokat az elektrotechnikában a következő célokra használják: a nem-nemesfémekből készült alkatrészek korrózió elleni védelmére, az alkatrészek villamos tulajdonságainak és a munkafelületek kopásállóságának vagy siklási tulajdonságainak javítására. Ezek közül palládiummal való közvetlen bevonásra elsősorban az arany, az ezüst, a nikkel és a réz, ill. ötvözeteik alkalmasak. [40]

### **3.5. A huzalkötéseknél alkalmazott kontaktusfelület bevonatok fejlődése**

#### *3.5.1. A rézhuzal használatának kihatásai a kontaktusfelület fémezésekre*

Rézhuzal kötése az arany és alumínium huzalok kötésénél elterjedt felületi bevonatokra vagy gyenge kötéseket eredményez vagy a megfelelő minőségű kötés létrehozásához alkalmazott nagyobb nyomóerő és ultrahangos energia következtében kontaktusfelület- és chip esetében a dielektrikum réteg károsodását okozza. Ezen problémákat egy keményebb kontaktusfelület fémezéssel ki lehet küszöbölni.

A nikkel 50 illetve 70 %-kal keményebb a réznél és az aranynál, ennek köszönhetően egyre nagyobb figyelmet kap. Rendelkezik mindazokkal a követelményekkel, melyek a magasabb fokú megbízhatósághoz szükségesek. Jellemzően 1-3  $\mu\text{m}$  vastag nikkel réteget visznek fel vagy alumínium, vagy réz alapra. Viszont a nikkelen gyorsan kialakul egy vékony, nehezen törő oxid réteg, így a nikkelle nem lehet huzalt kötni. Köthető felszín biztosításához másik fémből egy vékony réteget kell alkalmazni. Rengeteg hordozónál ez arany 0.3-0.5  $\mu\text{m}$ -es vastagságban. [12] A nikkel egyfajta védőgátként is szolgál az arany és réz réteg között, mivel meggátolja a réz atomok átdiffundálását az arany rétegen, így korlátozva a felszín oxidációját. Igaz a nikkel is végezetül ugyan ezt a gondot okozza, csak sokkal lassabban megy végbe a folyamat. [20] Annak ellenére, hogy kiváló köthetőséget biztosít alumíniummal és részben arannyal is, drága és rossz minőségű kötéseket lehet csak létrehozni rézhuzallal rajta. [12] Ráadásul nagyfrekvenciás (>1 GHz) áramkörök kialakítására nem optimális, mivel jelveszteség lép fel a skin-hatás miatt. [15]

Ezenfelül aggodalomra ad okot az úgynevezett „*black pad*” hibajelenség, mely a nem megfelelően kontrollált immerziós módon felvitt arany fémréteg használata során léphet fel. Tulajdonképpen ez egyfajta nikkel-korrózió, a kémiai nikkel bevonat és az immerziós aranybevonat közötti nemkívánt reakció. A jelenség a felületi bevonat rétegeinek szétválását, végeredményben a forrasztásnak a kontaktusfelületről történő leválását okozza.

Kialakulásának okai:

- az immerziós arany fürdő szennyezettsége, amely a már felvitt nikkell réteget korrodálja,
- az arany nem megfelelő koncentrációja a fürdőben,
- vagy a nikkelfürdő szennyezettsége. [21]

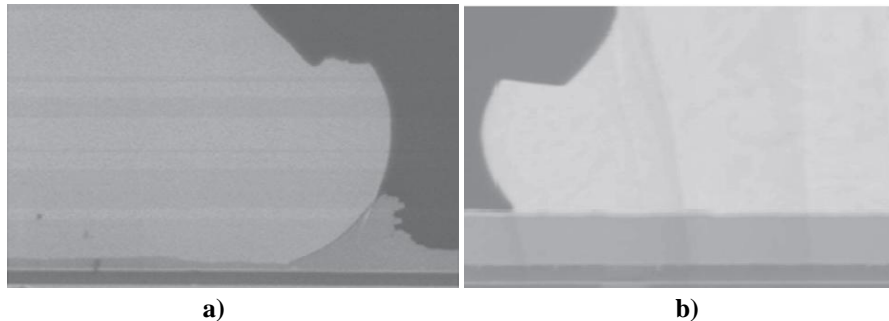
### 3.5.2. A palládium használata kontaktusfelület fémrétegeként

Nem olyan régi megközelítés a nikkell és arany réteg közé helyezendő palládium réteg, és az arany helyett a tiszta palládium felső réteg alkalmazása. A palládium plusz védőréteggént viselkedik, megszünteti a *black pad* hibajelenséget, jelentősen javítja a kötés stabilitását, a nikkell korrózióval és a fémezett rétegszerkezet nyomó erő hatásaival szembeni ellenállóképességét. A kész rétegszerkezet ellenállóbb a fém diffúzióval szemben a termikus folyamlépések alatt. A palládium használatával a nikkell réteg vastagságát 5  $\mu\text{m}$ -ról 3  $\mu\text{m}$ -re lehet csökkenteni, és helyettesítheti a szokásos, sokkal drágább, vastagabb arany réteg alkalmazásának szükségességét, mint köthető felső réteg. [13] A palládiumnak pedig olyannyira kell vastagnak lennie, hogy megfékezze a nikkell felszínre való diffúzióját.

A kémiai palládium használata sokkal költséghatékonyabb és könnyen köthető arannyal és rézzel is. Relatív kemény, nemesfémként a palládium korrózió ellenálló és mechanikailag erős. A nikkell, arany vagy réz diffúziója a palládiummal nagyon lassú, ami igen stabil fém-fém kapcsolódási felületet biztosít. [12] Még hosszan tartó magas hőmérséklet hatására is szilárd, zárvány és intermetallikus vegyület mentes marad a palládium-arany között létrejött kötés, magas megbízhatóságú elektromos vezetőképességet biztosítva. Így akár használható magas hőmérsékletű környezetben is ez a fajta kombináció. [36]

Az NiAu, NiPdAu, NiPd struktúrák nagyrészt elterjedtek és több félvezetőgyártónál és elektronikai eszközökben használatosak. [13] Az NiPd(Au) bevonatnak a nagy előnye, a kiváló ellenállása a kontaktusfelület károsodással szemben. Az árammentes rétegfelvitellel felvitt NiPd és NiPdAu kontaktusfelület bevonatok sokkal erősebb alapot nyújtanak a huzalkötésekhez, mint a szabványos alumínium. Ezek a felületi rétegek felülmúlják az alumíniumot minden tekintetben: kötés erősség, kontaktusfelület sérülés hiánya és megbízhatóság. A vastagabb nikkell és palládium rétegek további mechanikai védelmet nyújtanak a mélyen fekvő struktúráknak. [12] Az NiPd, NiPdAu, és a NiAu

bevonatok kiváló robusztusságot mutatnak, nagy folyamatablakkal, rétegfelgyűrődés nélkül (3.5. ábra.) és nagyszerű megbízhatósággal, rézhuzal kötésénél. [13] Az ENEPIG egyre népszerűbb kezd lenni a nagy megbízhatóságú termékek gyártásánál (pl. orvosi és légi területek). [20]



**3.5.ábra. Rézhuzal kötése a) alumínium kontaktusfelületre b) Ni-Pd-Au bevonatú alumínium kontaktusfelületre. [31]**

Forraszthatóságukat tekintve az ENIG és ENEPIG ólommentes forrasztásokor a nikkell és az ón egy sűrűbb, törékenyebb intermetallikus réteget (Ni6Sn5) képez, mint az OSP, ImAg, HASL és ImSn esetében. Ez a nagyobb mechanikai igénybevételek esetén (rázkódások, ütődések) töréseket okozhat. Éppen ezért nem javasolt a használatuk olyan területen, ahol nagy, vagy gyakori mechanikai behatásnak lehetnek kitéve. Továbbá, ügyelni kell lenni a gyártási, és szállítási folyamatok megbízhatóságára is (kezelés, furatszerelt alkatrészek, prés csatlakozók beültetése, ICT tesztelés, vagy chassik-be való kapcsolódás). [20]

### 3.5.3. A rétegvastagságok hatása

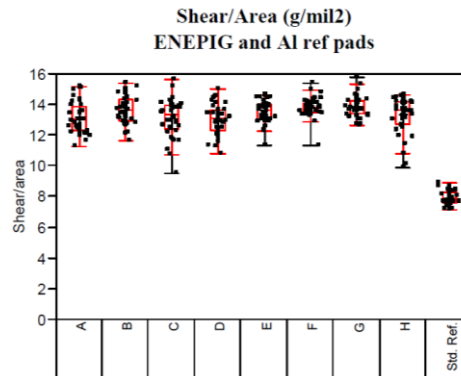
Alumínium, ENIG és ENEPIG kontaktusfelületek rétegszerkezeteinek paramétereit tartalmazza a 3.1. táblázat.

**3.1.táblázat. Különböző rétegvastagságú felületek adatai**

Réteg	alsó	középső	felső
Azonosító	Ni ( $\mu\text{m}$ )	Pd ( $\mu\text{m}$ )	Au ( $\mu\text{m}$ )
Referencia	1 $\mu\text{m}$ alumínium		
A	3	0,3	0,03
B	3	0,3	0
C	3	0,1	0,03
D	1	0,1	0
E	1	0,1	0,03
F	1	0,3	0,03
G	3	0,1	0
H	1	0,3	0

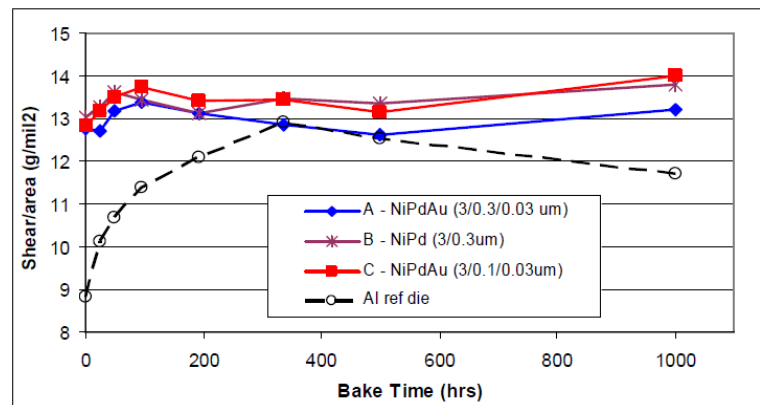


A különböző rétegvastagságokkal végzett nyírótesztek eredményei jól mutatják a 3.6. ábrán, hogy mennyivel erősebb kötések lehet létrehozni 20  $\mu\text{m}$ -es rézhuzallal nikkel és palládium (arany) bevonatokon, mint alumínium rétegen. Ráadásul nincs jelentős eltérés a különböző NiPd(Au) felületi konfigurációk között. [24]



3.6. ábra. A különböző rétegvastagságokon végzett nyírótesztek eredményei. [24]

Magas hőmérsékleten (175 °C) végzett élettartam vizsgálat eredményeiből (3.7. ábra) könnyen látható, hogy megbízhatóságban is jobb eredményeket mutatnak az NiPd(Au) rétegszerkezeteken létrehozott réz kötések a bevonat nélküli alumínium rétegen létrehozottakhoz képest. [24]



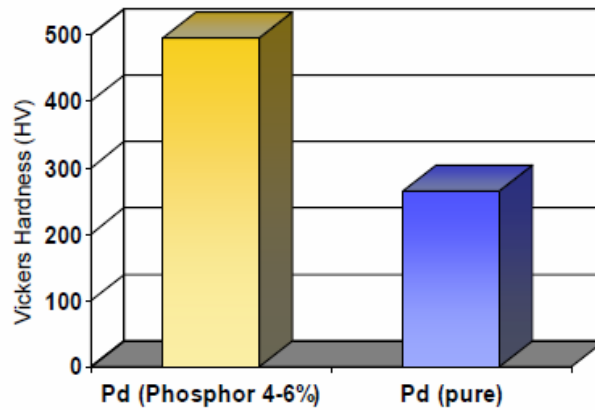
3.7. ábra. Magas hőmérsékleten végzett élettartam vizsgálat nyírótesztjének grafikonja. [24]

#### 3.5.4. A palládium típusának hatása

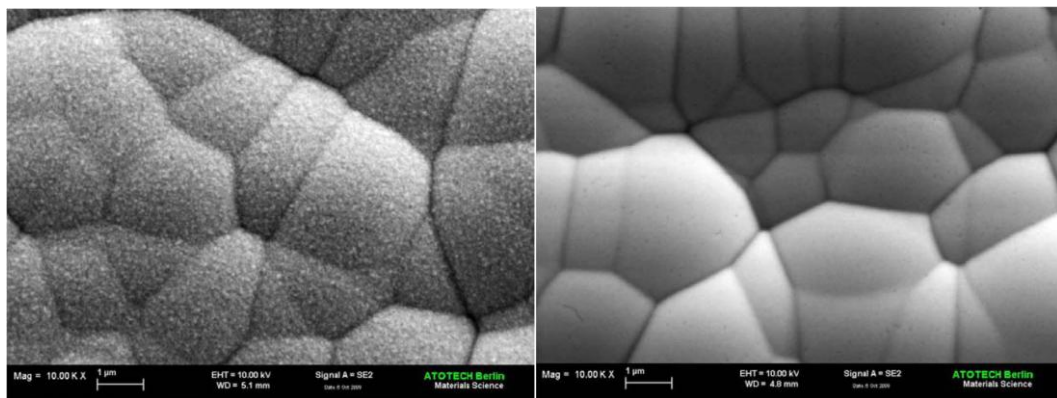
Árammentes rétegfelvitellel palládiumot kétfajta módon lehet felvinni: tiszta palládiumként vagy palládium-foszfor ötvözeteként. A kész rétegek különböző tulajdonságokkal bírnak. ENEPIG bevonatokat tiszta palládiummal az űrrepülésben, repülőgépeknél, műholdaknál és a gépjárműiparban is használják, mivel több kedvező tulajdonsága is van, melyek a következők: [35]

- a tiszta palládium 50%-kal puhább, mint a PdP (3.8. ábra),

- jobb nedvesítési tulajdonsággal rendelkeznek,
- más felületi struktúrával rendelkeznek, nano méretű érdessége van, sokkal simább a felszíne (3.9. ábra),
- kisebb a belső feszültsége, mint a PdP-nek.



3.8. ábra. A tiszta palládium és a foszfort tartalmazó palládium keménysége. [35]



a)

b)

3.9. ábra. Elektronmikroszkóppal készített kép a) PdP és b) tiszta Pd felületéről. [35]

ENEPIG, tiszta palládiummal sokkal szélesebb folyamat ablakkal rendelkezik arany huzalkötés esetében, mivel a puhább tisztább palládiumot használja a kemény PdP helyett. Ezenkívül nagyon jó húzóteszt eredményeket mutat vékony arany réteggel is és hosszútávon is nagyon megbízható. A vékonyabb arany réteggel ráadásul költséghatékonyabbak az ENEPIG bevonatok. [35]

### 3.6. A legelterjedtebb és újabb kontaktusfelület bevonatok összehasonlítása

A 3.2. és 3.3. táblázatban huzalkötés szempontjából a legfontosabb tulajdonságok szerint vannak összefoglalva a használt bevonatok.

3.2. táblázat. ImAg, Al, és ENEP felületi bevonatok összehasonlítása

	<i>ImAg</i>	<i>alumínium</i>	<i>ENEP tiszta Pd-vel</i>	<i>ENEP PdP-vel</i>
<i>rétegvastagság</i>	0,05-0,5 $\mu\text{m}$	0,8-2 $\mu\text{m}$	7-8 $\mu\text{m}$ ; 0,1-0,5 $\mu\text{m}$	7-8 $\mu\text{m}$ ; 0,1-0,5 $\mu\text{m}$
<i>törékeny szerkezetek védelme</i>	gyenge	gyenge	jó	jó
<i>arany huzallal köthető</i>	nem	igen	korlátozottan	nem
<i>Intermetallikus réteg kialakulása</i>	elfogadható	nagymértékű	elenyésző	elenyésző
<i>réz huzallal köthető</i>	gyengén	igen	igen	korlátozottan
<i>Intermetallikus réteg kialakulása</i>	lassú	elenyésző	elenyésző	elenyésző
<i>alumínium huzallal köthető</i>	igen	igen	nem	nem
<i>Intermetallikus réteg kialakulása</i>	lassú	nincs	közepes	közepes
<i>palládium réteggel borított rézhuzallal köthető</i>	nem	nem	korlátozottan	korlátozottan
<i>megbízhatóság</i>	közepes	közepes	magas	magas
<i>költségek</i>	közepes	olcsó	közepes	közepes

3.3. táblázat. Arany felsőrétegű bevonatok összehasonlítása.

	<i>ENIG</i>	<i>ENEG</i>	<i>galván Ni/Pd/Au</i>	<i>ENEPIG tiszta Pd-vel</i>	<i>ENEPIG PdP-vel</i>
<i>rétegvastagság</i>	3-6 $\mu\text{m}$ ; 0,075-0,125 $\mu\text{m}$	3-6 $\mu\text{m}$ ; 0,25-1,3 $\mu\text{m}$	0,5-20; 0,1-5; 0,03-2	2-5 $\mu\text{m}$ ; 0,1-0,5 $\mu\text{m}$ ; 0,02-0,15 $\mu\text{m}$	2-5 $\mu\text{m}$ , 0,1-0,5 $\mu\text{m}$ ; 0,02-0,15 $\mu\text{m}$
<i>törékeny szerkezetek védelme</i>	közepes	közepes	közepes	jó	jó
<i>arany huzallal köthető</i>	részben	igen	igen	igen	igen
<i>Intermetallikus réteg kialakulása</i>	nincs	nincs	nincs	nincs	nincs
<i>réz huzallal köthető</i>	nem	igen	igen	korlátozottan	korlátozottan
<i>Intermetallikus réteg kialakulása</i>	nincs	nincs	nincs	nincs	nincs
<i>alumínium huzallal köthető</i>	igen	nem	nem	igen	korlátozottan
<i>Intermetallikus réteg kialakulása</i>	gyors	gyors	gyors	gyors	gyors
<i>palládium réteggel borított rézhuzallal köthető</i>	igen	igen	nagyon jól	igen	igen
<i>megbízhatóság</i>	magas	magas	magas	magas	magas
<i>költségek</i>	drága	drága	drága	közepes	közepes

## **4. A huzalkötés folyamatát befolyásoló változók és a destruktív minőségellenőrzés**

### **4.1. Az ék hatása a kötés minőségére**

Az ék anyaga tipikusan titánium karbid vagy kerámia az arany huzalokhoz és szalagokhoz. A titánium karbid ék olcsóbb és könnyebben megmunkálható, mint a kerámia ék. Az alumínium huzalokhoz, ragasztott volfrám karbid a szokásosan használt ék anyag. [5]

Az ultrahangos és a termoszonikus kötésnél fontos, hogy az ék továbbítsa az ultrahang teljesítményét a kontaktusfelület és a huzal felületei közé. Ez jó ék talpazat tervezést igényel. A 25  $\mu\text{m}$ -nél nagyobb átmérőjű arany és réz huzalokhoz, egy kereszt barázda szükséges az ék aljára, annak érdekében, hogy az ultrahangos energia hatékonyabban átadódjon (nagyobb legyen az ultrahangos kapcsolati teljesítmény), jó minőségű kötetést létrehozva. A 20  $\mu\text{m}$ -nél kisebb átmérőjű arany huzalokhoz lapos ékeket használnak. Az alumínium huzalozású alkalmazások homorú felületű éket kívánnak meg. [5]

Tovább haladva a szereléstechológia miniaturizálása felé, az ék aljzatának méretei is tovább csökkennek. Az 1990-es években alapszabály volt, hogy az aljzat méret 2,5-szeresének kell lennie a huzal átmérőjének. Manapság a chipek méretcsökkenésének és a kis raszterosztású alkatrészeknek, az ék aljzat mérete szokásosan a huzal átmérőjének 1,5-2-szeresére van állítva. [5]

### **4.2. A huzal/szalag hatása a kötés minőségére**

Arany huzal/ék kötése arany kontaktusfelület-re rendkívül megbízható, mert az arany nincs kitéve határfelületi korrózióknak, intermetallikus réteg kialakulásának, vagy más kötés minőségét degradáló körülménynek. Aranyhuzal kötése előmelegített felületre a legjobb, habár szobahőmérsékletű ultrahangos arany-arany kötések is készíthetők. [5]

A termoszonikus kötésnél a huzal 99,99-99,999%-os arany, általában 17,5  $\mu\text{m}$ -tól 50-75  $\mu\text{m}$ -ig terjedő átmérőben. A nagyfrekvenciás alkalmazásokhoz 25  $\mu\text{m}$  vastag, 100  $\mu\text{m}$  széles arany szalag az általánosan használt. A huzalnak két fő jellemzője van: a százalékos megnyúlás és a nyújtási szilárdság. Általánosságban, a kemény huzal/szalag ad magasabb szakító szilárdságot és merevebb hurkot. Lágú huzalt/szalagot az ultrahangos behatásra érzékeny eszközöknél alkalmaznak. A tapasztalatok azt mutatják,

hogy a 8-13%-os nyúlással rendelkező szalaghoz kis erőre és alacsony ultrahang teljesítményre van szükség a jó kötéshez, míg az 1-4% közötti megnyúlással rendelkező kemény szalagnál nagyobb erőre és nagyobb ultrahangos teljesítményre van szükség. [5]

#### **4.3. A hordozó hatása a kötés minőségére**

A kontaktusfelületek paraméterei magában foglalják a kontaktusfelület fémezését, a rétegvastagságokat, a kontaktusfelület szennyezettségét, és az alátámasztás mértékét. Az aranyréteg vastagsága szintén kritikus szerepet játszik a köthetőségben. A minimum vastagsági követelmény az arany huzal/szalag kötésénél 1  $\mu\text{m}$ . Az ennél vastagabb aranyrétegek nem szükséges további kedvező hatással vannak a köthetőségre. [5]

Nagyon fontos, hogy a kontaktusfelületet távol tartsuk a szennyeződésektől. A felszíni szennyeződések rontják a köthetőséget és a huzalkötések megbízhatóságát. A két hatékony és elterjedt módja a szerves szennyeződések eltávolításának az UV ózon és plazmás tisztítás. [5]

A kontaktusfelületeknek jól alátámasztottnak kell lenniük a kötési folyamat során ahhoz, hogy magas minőségű kötések készíthessünk. A nem megfelelően alátámasztott felszínen úgy, mint a szabadon álló csatlakozásoknál történő huzalkötésnél az ultrahangos teljesítmény csillapodni fog. [5]

#### **4.4. A huzalkötés folyamatparamétereinek hatása a kötés minőségére**

A kötési folyamat változói:

- az ultrahangos teljesítmény,
- a kötési erő,
- a kötési idő,
- és a hőmérséklet.

Nem egyszerű megtalálni az optimális kötési paramétereket, mivel a folyamat változói között egymásra hatások vannak. A magas minőségű kötés magas szakítószilárdsággal (vagy nyíró erősséggel a golyós kötésnél) jellemezhető.

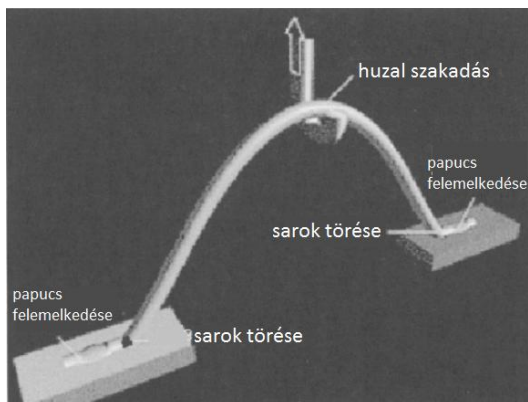
Kötés létrehozásának négyfajta kimenetele lehet: [37]

1. kötés felemelkedés a gyenge kötés miatt
2. tapadás hiánya, a felületi bevonat túlzott deformációja miatt
3. tapadás

#### 4. kötésnél szakadás a huzal túlzott deformációja miatt

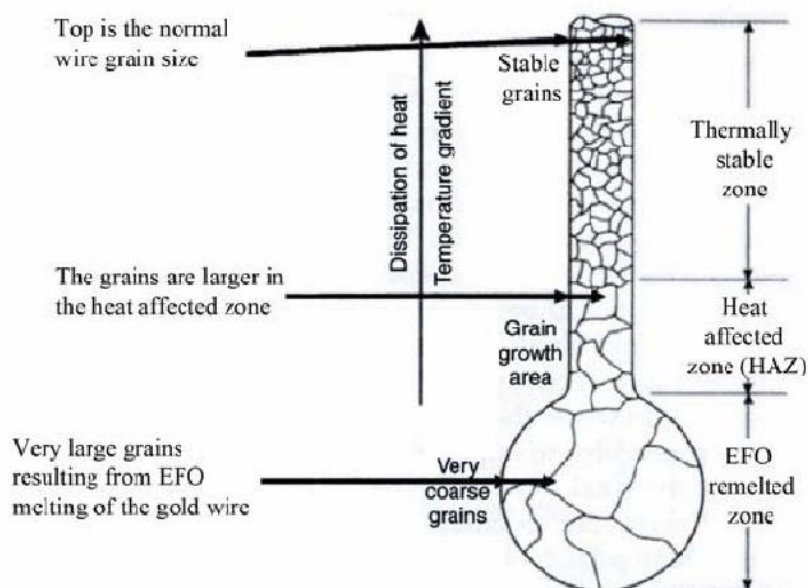
Háromfajta meghibásodási mód figyelhető meg húzóteszt során (4.1. ábra): [37]

1. a kampó közelében történő szakadás
2. törés/szakadás a kötés nyakánál/sarkánál
3. kötés elemelkedés



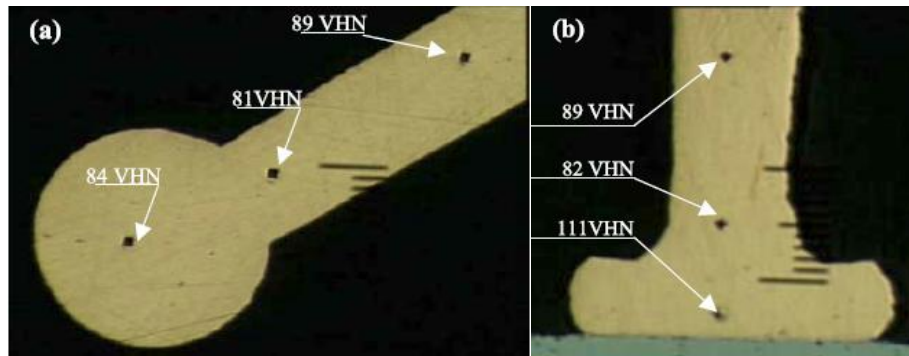
4.1. ábra. A húzóteszt közben bekövetkező meghibásodások. [9]

Az 1. fajta meghibásodás egyértelműen a jó kötés eredménye, míg a felvált kötés a gyenge köthetőségről árulkodik. [37] A kötés elemelkedés azt jelenti, hogy az egész kötés felemelkedik a destruktív tesztnél, míg a sarok törés a destruktív teszt alatt a huzal törését jelenti a sarkánál úgy, hogy a huzal lába/papucsa még a kontaktusfelületen marad. Éppen ezért megfelelő minőségű kötésről beszélhetünk, hogyha húzó teszt során a kötés nyakánál vagy fölötté, azaz ha a golyós kötés esetében a HAZ (*heat affected zone*) által érintett területen (4.2. ábra), ékes kötés esetében pedig a legnagyobb mértékű huzalhajlítás mentén történik a szakadás.



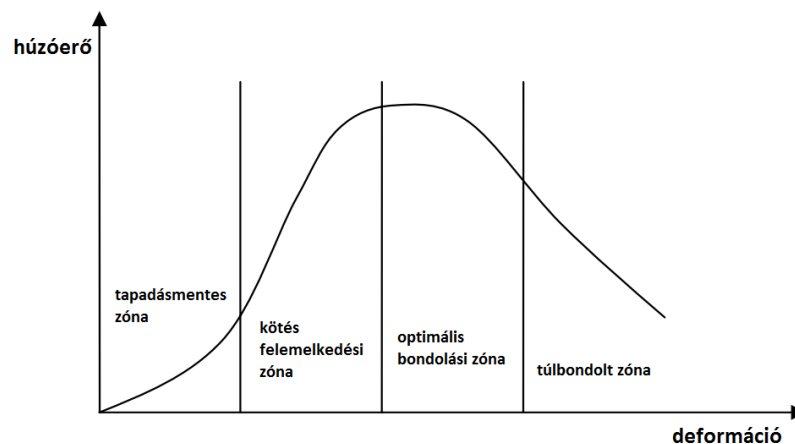
**4.2. ábra. A golyó kialakítása utáni szemcseméret eloszlás vázlata. [29]**

A golyó kialakítása közben a huzal hőhatásnak kitett részét nevezik HAZ-nak, mely átlagosan egy 100-150 µm-es sáv, a huzal többi részénél gyengébb mechanikai tulajdonságokkal (4.3. ábra). Réz esetében a jobb hővezetőképességének pozitív következményeként ez a zóna kisebb, mint arany huzal esetében. [31]



**4.3. ábra. Kialakított rézgolyó és környezetének keménysége szabad és kötés utáni állapotban. [30]**

A tapasztalat azt mutatja, hogy erős kapcsolat van a húzóerő és a huzal deformációja között, ahogyan ezt a 4.4. ábra is mutatja. A kapcsolatra alapozva kifejlesztettek olyan online huzalkötési folyamat vezérlőt, melyek a deformáció mérésén alapulnak. Gyengeségük, hogy ha erős szennyezés van a kapcsolódó felületeken, akkor a kapcsolat nem áll fenn. [5]

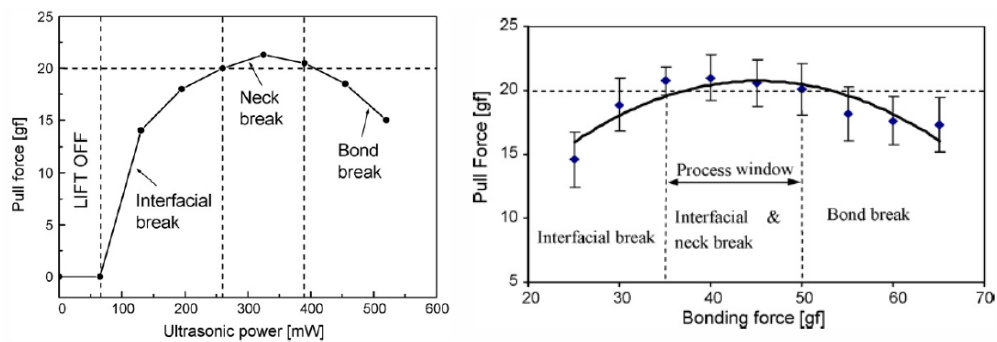


**4.4. ábra. Kapcsolat a húzóerő és a huzaldeformáció között. [5]**

Általánosságban elmondható, hogy az intermetallikus vegyület kristályosodásának kiterjedése összefügg a kötés időtartamával. Minél hosszabb a kötés folyamat, alumínium kontaktusfelület esetében a felületi alumínium oxid szétterjedése annál inkább szétterjedtebbé válik, végezetül létrehozva egy egybefüggő réteget, ami erősebb kötésekkel jelent. [27]

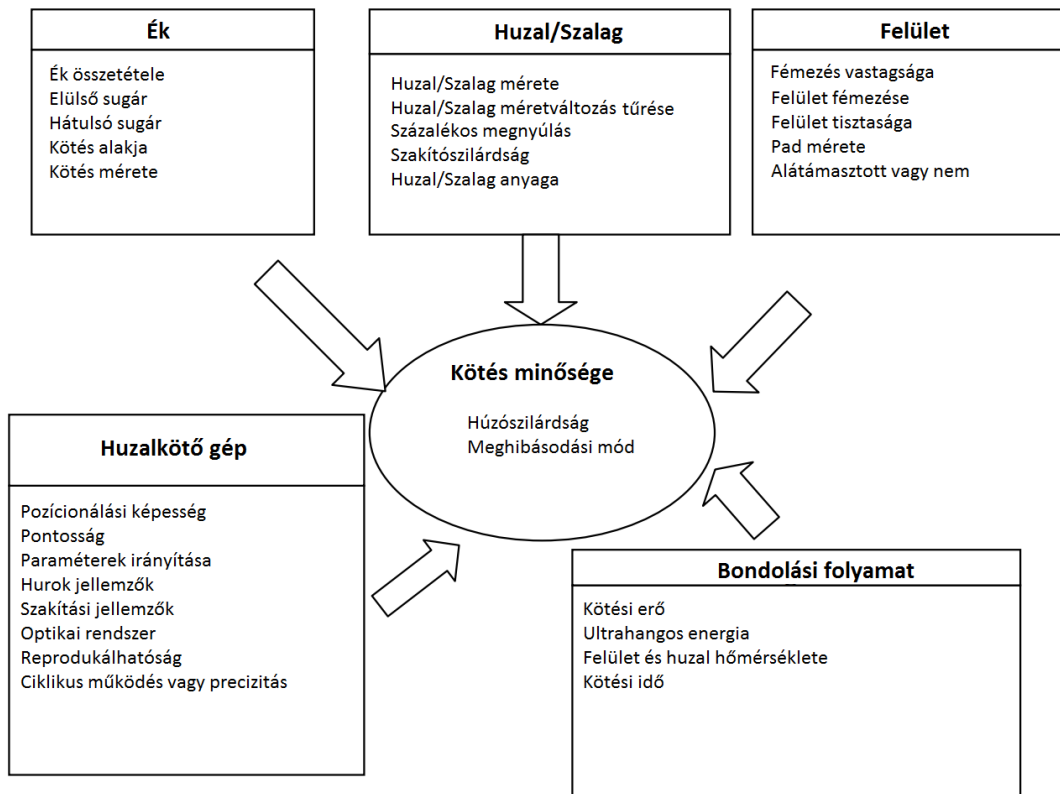
Az intermetallikus réteg és a kötés erőssége is függ a hordozó hőmérsékletétől. Szobahőmérsékleten csak néhány helyen alakul ki intermetallikus vegyület. A hordozó előmelegítése megkönnyíti az alumínium oxid feltöredezését és egyidejűleg felgyorsítja az anyagok kölcsönös diffúzióját, megkönnyítve az intermetallikus vegyületek kialakulását. Ezzel is növelve a kötés szilárdságát. A kötési paramétereiktől függetlenül a kialakult vegyület mindig  $\text{CuAl}_2$ . [27]

A 4.5. ábrán látható kísérleti eredményekből jól látható az alkalmazott ultrahangos energia és a kötési erő hatása a kötés minőségére (23  $\mu\text{m}$  réz, 7  $\mu\text{m}$  nikkel és 3  $\mu\text{m}$  arany struktúrájú rétegen).



4.5. ábra. 25  $\mu\text{m}$  átmérőjű rézhuzallal végzett ékes-ékes kötések szakítószilárdságai. [28]

A 4.6. ábrán látható, hogy mennyi mindentől függ a kötés minősége.



4.6. ábra. Az ékkötés minőségét befolyásoló tényezők. [5]



## 5. A huzalkötő szerszám és a non-destruktív minőségellenőrzés

### 5.1. A huzalkötő szerszám felépítése és működése

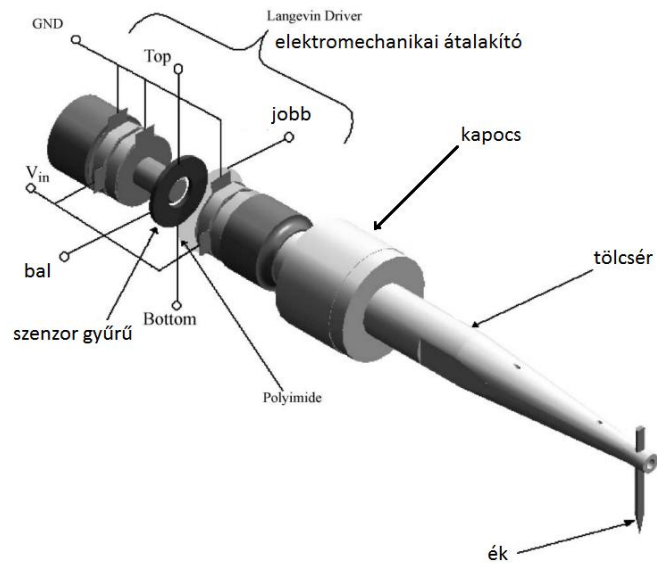
A sok különböző típusú termék gyártása nagymértékben megkeserítheti a mérnökök életét, mivel ezek több különböző kötési paramétert igényelnek. Bármennyire is komplex a huzalkötő gép felépítése és használata, a folyamatparaméterek közösek: [9]

- a kötési erő,
- a rezgés sebessége,
- a hőmérséklet,
- az idő,
- és az ultrahang teljesítménye.

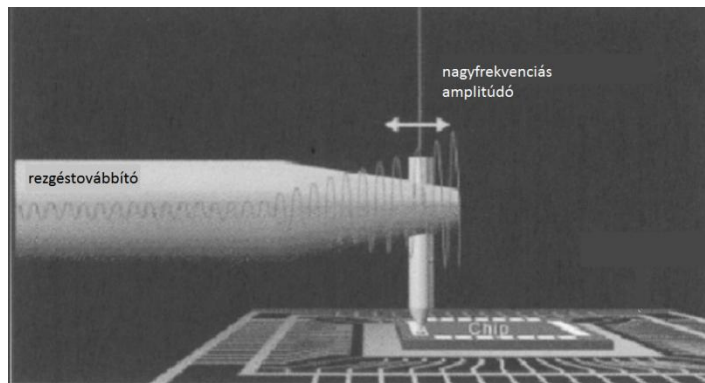
Előbbiek közül az optimális ultrahang teljesítmény beállítása a legnehezebb. Hogy tényleg megértsük az ultrahang teljesítményének a hatását a kötési folyamatra, először meg kell értenünk az ultrahang teljesítményét körülvevő problémákat. Az elektromos energia Piezo-kerámia átalakítóval történő konvertálásának eredménye az ultrahang teljesítmény. A átalakító különböző elemekből épül fel, arra tervezve, hogy az ultrahang teljesítményét maximális hatékonysággal közvetítse a kötési felülethez. Ha az átalakító tervezése vagy gyártása nem megfelelő, akkor ez az átalakító teljesítményére lesz hatással a huzalkötés során. [9]

Az ékkötő szerszámnak négy fő része van (5.1. ábra): [8]

1. Generátor és elektromechanikai átalakító. Általában egy piezoelektromos elem, mely a 60 kHz – 120 kHz frekvenciájú elektromos energiát mechanikai vibrációvá alakít és közvetít tovább az ék felé.
2. A kapocs (rögzítő, befogó). Egy vibrációs csomópontban helyezkedik el, ez kapcsolja össze az átalakítót és a rezgéstovábbítót. Ha nem csomópontban helyezkedne el, akkor az ultrahang teljesítményének egy része visszafele lenne táplálva a huzalkötő fej helyett.
3. A kúpos rezgéstovábbító, melyre néha tölcserként/ormányként utalnak, és a kúpossága következtében felerősíti az ultrahangos hullámok amplitúdóját.
4. Az ék/kapilláris függőlegesen van rögzítve a kúp tengelyéhez, így egy előre-hátra irányú vibrációra van kényszerítve (5.2. ábra).

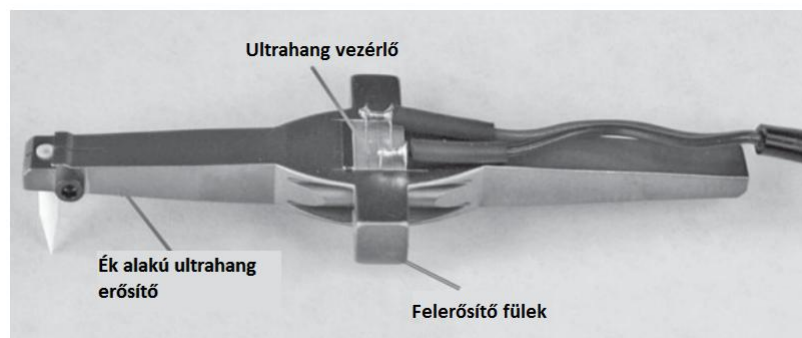


5.1. ábra. A huzalkötőgépek legérzékenyebb részének, az ékkötő szerszámnak a felépítése. [8]



5.2. ábra. Az ék mozgási iránya. [9]

A 5.3. képen látható 60 kHz-es egység körülbelül 120 mm hosszú. A modern 120 kHz-es automatikus huzalkötő átalakítók ugyanazokat a funkciókat látják el, mint az előbb tárgyalt társaik, csak sokkal kisebbek (~40 mm hosszúak), és kisebb tömeggel rendelkeznek a magasabb frekvenciás működés miatt. [8]



5.3. ábra. Egy régebbi huzalkötő fej. [8]

## **5.2. Az ultrahang generátor és átalakító**

### *5.2.1. Az ultrahang generátor felépítése*

Az ultrahang generátorral állítják elő az ultrahangos teljesítményt, ami az átalakítón keresztül jut el a rezgéstovábbítóhoz és az ékhez, ennek következtében a kontaktusfelülethez. Az ultrahang generátor egy tápegységből áll egy átalakítót vezérelve, ami az impedanciaillesztő mechanikai rendszer segítségével („horn”/tölcsér – egy akusztikus rezonátor) van összekapcsolva a hegesztő szerszámmal. [9]

Az ultrahang átalakító és a kúpos rezgéstovábbító (a megfelelő hosszúsággal) együtt egy mechanikai rezgőrendszert alkot, amely a vezérlő rendszer által gerjesztett éles rezonáns rezgést állít elő. Ha a gerjesztő feszültség és áram fázisa megegyezik és az impedancia a legkisebb, akkor ezt a frekvenciát nevezzük rezonanciafrekvenciának. Az üzemi frekvencia úgy van megválasztva, hogy mindkét komponens kompatibilis legyen a hegesztett struktúra méretével (pl. általában, minél magasabb a frekvencia, annál kisebbek a komponensek). A kicsi, kistömegű rezgéstovábbítók felgyorsítják a mechanikai mozgást. [8]

A fémek ultrahangos kötésénél megválasztandó működési frekvencia nagyban függ a hegesztendő anyag vastagságától. Általában az alacsonyabb frekvenciákat (10-40 kHz) a 0.5 mm és annál vastagabb anyagokhoz használják. Az ultrahangos huzalkötő gépek (huzal összeköttetések a chipen) 60-140 kHz-es tartományban működnek. A huzalkötő gépek egyfrekvenciás működésre vannak tervezve. A legtöbb gépbe tesznek egy önellenőrző rendszert, hogy megváltoztathassák az elektromos gerjesztési frekvenciát, ezzel kompenzálva a hegesztési ciklus alatt a belső változókból vagy a külső változókból adódó rezonancia frekvenciában bekövetkezett változásokat. A generátorok két fő tulajdonsága a fáziszárt áramkör és a működési mód. [9]

### *5.2.2. Az ultrahang generátor fáziszárt áramköre*

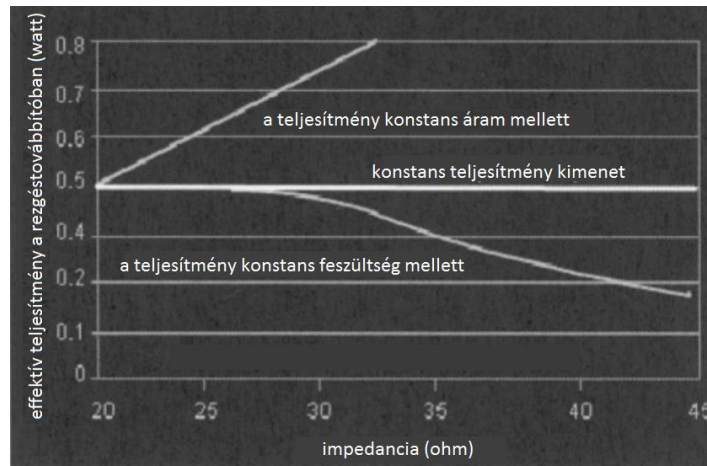
Az elektromos teljesítmény az ultrahangos teljesítményt szolgáltató tápból egy fáziszárt áramkörrel van stabilizálva, mely áramkörnek a rendeltetése az, hogy lokalizálja és fenntartsa a rezonanciát az átalakítóban minimális drift veszteséggel az áram és a feszültség között és, hogy az ultrahangos rendszert közel tartsa a rezonanciafrekvenciájához a huzalkötés alatt. [8] Ideálisan a nulla fáziseltolódás a kívánatos, de a 12 foknál nem nagyobb eltolódás már elfogadható. [9]

### 5.2.3. Az ultrahang generátor működési módjai

Az ultrahang generátort három különböző mód alatti működésre tervezik: konstans áram, konstans feszültség és konstans teljesítmény szerint. A konstans áram elméletileg az ék konstans mozgásával jár együtt, mivel az áramváltozások impedancia változást okoznak. Ez mind igaz szabad ékmozgás esetén, de a huzalkötés során eddig nem mutattak ki megfelelő összefüggést közöttük. Éppen ezért a konstans feszültség kívánatosabb, mivel az megengedi az áram jelének analitikai eszközként való használatát a kialakított hegesztés relatív minőségének megállapítása céljából. Sajnálatos módon az adatok kinyerése nem reprezentálja valós időben a kötés minőségét. Sok ultrahang generátor rendelkezik jelanalízis fajtákkal, de egyik sem képes valós idejű visszacsatolásra, csupán a kötés létrehozása után ad visszajelzést a kötés feltehető minőségéről. [9]

A kontaktusfelületre állandó értékű teljesítménytáplálásnak elméletileg és gyakorlatilag is a jó választásnak kell lennie. Az átalakító elektromos teljesítményét mérni lehet egy a rezonánsfrekvenciára érzékeny kapacitív, induktív és rezisztív elemekből álló áramkörrel. Minden egyes huzalkötés során, a külső paraméterek változásának köszönhetően módosul az impedancia. A felületi szennyeződések, az ék kopása, huzal keménysége, stb. megváltoztatják a rezonanciát, ami módosítást okoz az energiamennyiségben, de ha a rendszer képes mérni a változásokat amint megjelennek és hozzáigazítva megnöveli vagy csökkenti a feszültséget és az áramot, hogy fenntartsa a konstans teljesítményt, akkor az energiamennyiség ugyanaz marad. Ez a feltétel a kötések közötti reprodukálhatósághoz. Továbbá a paraméterek hordozhatósága gépről gépre is lehetségessé válik. [9]

A 5.4. ábrán látható az effektív teljesítmény az impedancia függvényében. Ha a kimenet konstans áram, akkor a kimeneti teljesítmény nő, míg állandó feszültségű állapotok mellett a kimeneti teljesítmény csökken az impedancia növelésével. Valós idejű ultrahangos teljesítményszabályozóval, lehetővé válik az állandó kimeneti teljesítmény biztosítása az átalakítónál. [9]



5.4. ábra. Az effektív teljesítmény az impedancia függvényében. [9]

Ahhoz, hogy analizáljuk az átalakító teljesítményét, meg kell vizsgálnunk a változók két speciális típusát: a belső változókat és a külső változókat. [9]

#### 5.2.4. Az ultrahang generátor és átalakító belső változói

Az átalakító készítési folyamatánál alkalmazott anyagok viselkedései és tulajdonságai határozzák meg a belső változókat. Az átalakító többféle Piezo-kerámia kristályból készülhet, úgy, mint ólom-titanát, ólom-cirkonát, bárium-titanát vagy ezen anyagok másfajta kombinációjából. Az alacsony impedanciájú átalakítók (10-30 Ohm 0,2 Watton) e kerámia kristályokból készülnek. A kutatások kimutatták, hogy az alacsony impedanciájú átalakítók szolgáltatják a legmagasabb minőségű kötések a legrövidebb idő alatt. Az impedancia értéke közvetlen kapcsolatban áll a súrlódási erő és a vibrációs sebesség hányadosával. Ezeket az átalakítókat kombinálják magas csúcssebességgel, kis vibrációs erő mellett. [9]

Az átalakító impedanciájára jelentősen hatással van két paraméter, a hőmérséklet és az éknél alkalmazott forgatónyomaték. Amint a nyomaték megnő, az impedancia csökken. A kémiai összetétele miatt válik érzékennyé az átalakító a hőmérsékletingadozásra, ami változást eredményezhet az átalakító teljesítményében. Még a huzalkötő gép megvilágító rendszere is megváltoztathatja az átalakító hőmérsékletét néhány Celsius-fokkal, ami végezetül hatással lenne az átalakító rezonanciafrekvenciájára. Ami pedig befolyásolná az ultrahangos csatolás stabilitását és kontaktusfelületre jutó energiát. Következésképp, a huzalkötő eszközök tervezésekor az átalakító állandó alacsony hőmérsékletét biztosítani kell. [9]

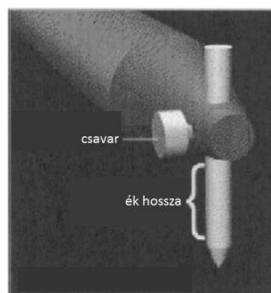
Hasonlóképpen, az átalakító testénél felhasznált anyagok (rozsdamentes acél, alumínium, titán, stb.) mindegyike különböző mechanikai és anyagi tulajdonsággal rendelkezik, melyeket figyelembe kell venni az átalakító tervezésénél, hogy hatásos összeköttetést és energiatranszfert valamint tartós teljesítményt produkáljon. A hőmérsékletváltozást, mechanikai igénybevételt és a végfelhasználói környezetet is figyelembe kell venni ezen anyagok kiválasztásakor. [9]

#### 5.2.5. Az ultrahang generátor és átalakító külső változói

A külső változók azok, melyeket a szabályozó rendszer, a gyártó vagy a végfelhasználó idéz elő. Ezek lehetnek a rezgéstovábbító készítése közben, vagy a végfelhasználónál történő összeszerelés során keletkezettek vagy az ultrahang generátor típusából adódóak. A rezgéstovábbító gyártása speciális figyelmet követel a részletekre és szoros minőségi folyamatellenőrzést mely kulcs a reprodukálhatóság, a maximális teljesítmény és a magasabb termelékenység elérésében. Kritikusan fontos problémák az alábbiak: [9]

- a kúpos rezgéstovábbító konstrukciója egy minimális energiavesztést szenved el, amikor már gépbe van szerelve,
- a rezgéstovábbító konstrukciója maximális energiatranszfert biztosítson a hegesztés határfelületére,
- a rezgéstovábbító reprodukálható dimenziós és tömegi tagokkal rendelkezzen.

A modern automatikus huzalkötő eszközök magasabb reprodukálhatóságot követelnek meg az rezgéstovábbító gravitációs középpontjának és az rezgéstovábbító tömegközéppontjának elhelyezkedését tekintve azért, hogy elérjenek egy precíziós szintet és kontrollt, amit a Z tengelyű működés kíván meg (huzalkötő fej). Ráadásul a rezgéstovábbító tervezésénél, további paraméterek is hozzájárulnak az optimális ultrahangos csatoláshoz a rezgéstovábbító és az ék között, ilyen a kúpon lévő csavar és a rezgéstovábbító alatt lévő ékhossz (5.5. ábra). [9]



5.5. ábra. A huzalkötő fej. [9]

### **5.3. A kötési folyamat ellenőrzése önérzékelős piezoelektromos átalakítón keresztül**

#### *5.3.1. Non-destruktív kötésminőség monitorozási technikák*

Köztudott, hogy az elektronikai rendszerek átlagos élettartama és megbízhatósága erősen függ az elektromos kapcsolatok minőségétől. A huzalkötés minőségének megállapítása non-destruktív teszttel történő megállapítása az első lépés egy még megbízhatóbb termék irányába. Ennek érdekében létrejöttek különböző kötés minőség monitorozó (folyamatos ellenőrzésű) technikák bizonyos folyamatparaméterek és azok ideiglenes változását figyelve a huzalkötés kialakítása alatt. [11]

A sikeres kötés meghatározására többfajta technikát fejlesztettek ki. [11]

Az úgynevezett „off-line módszerek” általában a folyamat végeztével értékelik ki a folyamat minőségét. Ezek a folyamatmonitorozó módszerek a folyamat egy statisztikus modelljén alapulnak, és az egyes teszteredmények véletlenszerű folyamat mintaként vannak kezelve. Ha a mintaeredmény nem tesz eleget bizonyos követelményeknek, a folyamat paraméterek javítása megtörténik és néhány mintadarab vagy még az összes is elutasításra kerülhet extrém esetekben. [11]

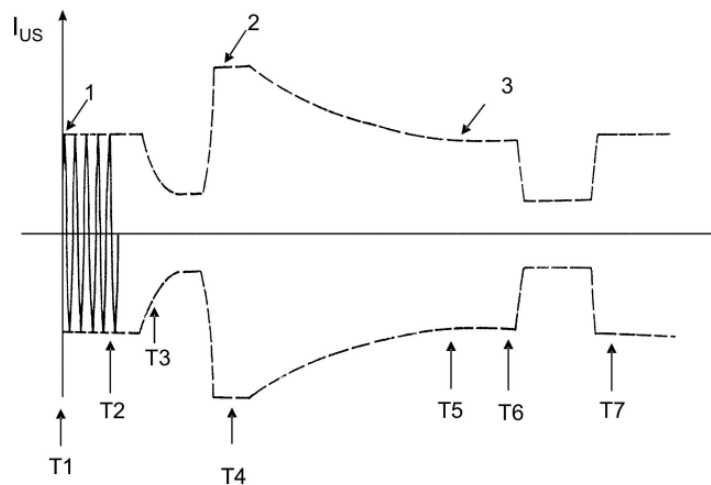
A legelőnyösebb off-line tesztmódszerek roncsolásos és roncsolásmentes húzó- vagy nyíró tesztek. Mindkét módszer követel egy „un-productive” (a gyártáshoz nem szükséges) kiegészítő folyamat lépést. A roncsolásos teszteknek van egy egyértelmű hátránya, hogy természetesen lehetetlen letesztelni az összes kötést ilyen úton. [11]

Összehasonlítva az off-line módszerekkel, az on-line módszerek a folyamat lépése alatt, valós időben hajtódnak végre. Az on-line módszerek részleges használatra, amikor összehasonlítjuk az off-line módszerekkel, hogy lehetővé tesznek egy automatizált visszacsatolást a géphez és ezáltal egy használható zárt-hurkú folyamatirányítási technikát kapunk eredményül. Végeredményként, a kutatások az on-line folyamat monitorozási technikák fejlesztésére koncentrálnak, amik rögtön a kötés kialakítása közben vagy a végén értékelnek ki. [11]

#### *5.3.2. A szabályozó áramának mérésén alapuló mérési módszer*

A legelőnyösebb kötés minőségellenőrzési módszerek egyike az, hogy megfigyeljük a szabályozó elektromos áramát állandó feszültségű működtetés mellett. Az 5.6. ábra egy tipikus ultrahangos áramjel és néhány sajátos jellegzetes görbének az idő diagramja. Hét tipikus idő periódus különböztethető meg a kötésformálás alatt:

- T1: A szerszám és a huzal saját szabad üzemmódjukban vibrálnak.
- T2: A szerszám és a huzal megérinti a kontaktusfelület-et.
- T3: A szerszámot és a huzalt egyre növekvő erővel a kontaktus felé nyomják.
- T4: Az ultrahangos energiát beletáplálják a rendszerbe, így a rezgési amplitúdó megnő és a kötési folyamat elkezdődik.
- T5: A kötés kialakítása.
- T6: A kötési folyamat vége.
- T7: A szerszám és a huzal felemelkedik és saját szabad üzemmódjukban rezegnek. [11]



5.6. ábra. Idő diagramban ábrázolva az áram jelének burkológörbéje. [11]

A görbék pontos alakja függ a kötési paraméterek beállításától és a külső behatásoktól. A kötés minőségellenőrzési rendszer alapötlete, hogy az áram mérésével és a görbe jellegzetes alakjából megkülönböztethetjük a jó és a gyengébb kötéseket. Az áramgörbe jelentős eltérését, a gyenge kötés jeleként értelmezték. [11]

### 5.3.3. A huzal deformációján alapuló mérési módszer

Goebel és Ziemann a huzal deformációjának a monitorozását javasolták a kötési folyamat alatt. Egy szenzort használtak, hogy megállapítsák a huzalkötő szerszám pozíció változását a folyamat alatt és gyenge minőségű kötésként osztályozták azokat a kötéseket, melyek deformációs értékei nem esetek az előre meghatározott huzal deformáció minimum és maximum értékein belülre. Ezt a technikát széles körben elterjedten használják az automata huzalkötő berendezésekben. [11]



Széles körben használt módszer a gyakorlatban, hogy a kötési folyamat során az előre specifikált huzaldeformáció létrejöttkor az ultrahangos teljesítmény táplálása leállításra kerül. Mindazonáltal a huzaldeformáció inkább a kötési folyamat eredménye, semmint egy állapotváltozó, ami magáról a kötési folyamatról szolgáltat információt. Ráadásul, megsemmisítő tapasztalati bizonyíték van arra, hogy a módszer nem képes kellően magas megbízhatósággal detektálni a hibás kötéseket. [11]

#### *5.3.4. A vibrációkon alapuló mérések*

Az ékkötés eszközének vibrációs állapotának mérésével is plusz információkhoz lehet jutni. Az átalakítók és rezgéstovábbítók karakterisztikájának megméréséhez lézer interferométereket, nonlaser fiber optikai érzékelőket, kapacitív mikrofonokat és mágneses érzékelőket alkalmaznak. [8] Melyek segítségével a huzalkötés során a rendszer alig észrevehető rezonanciafrekvenciabeli változásainak megfigyelése is lehetséges. A fő hátránya ennek a megközelítésnek az, hogy pl. a lézer interferométeres vibrációmérés még mindig nagyon költséges technológia, ami mellékesen terjedelmes és plusz súlyt ad a kötőfejnek. Ennél fogva nem kompatibilis a modern huzalkötőgépekkel és azok magas követelményeivel, azaz a gyors működéssel és a kis mérettel. [11]

#### *5.3.5. Az átalakító vibrációján alapuló mérés*

Míg az elsődleges kötést minőségellenőrző technikák az áram mérésére és az áramgörbétől való eltérésre fókuszálnak, addig Raben és Zschimmer voltak az elsők, akik az átalakító mechanikai vibrációjának rögzítését javasolták. Van Raben kifesztett mércét használt, hogy megmérje a normál kontakterőt a szerszám és a kontaktusfelület között. Az átalakító mechanikai rezgését piezoelektromos érzékelővel mérte. Ennek a módszernek a továbbfejlesztése, hogy a vibrációs jel második harmonikusára kell koncentrálni, mivel ez a jel erősebb kapcsolatban áll a nyíró erővel és így jobb előjelzést ad a kötés minőségéről. [11]

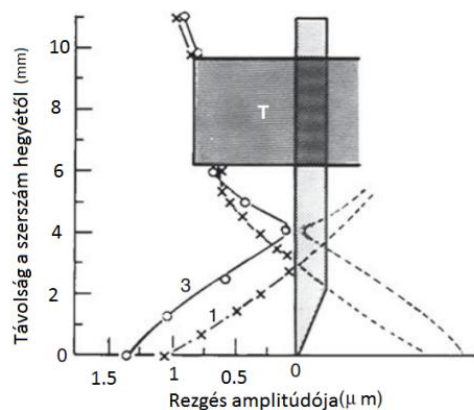
#### *5.3.6. Az ék vibrációján alapuló mérés*

Az ék vibrációján alapuló kötési folyamatszabályozó három alapkomponensből áll:

- A huzalkötés első fázisában az ultrahangos energia a táptól az átalakító felé halad, és ez úgy van kontrollálva, hogy a szerszám vibrációjának az amplitúdója egy előírt növekedési rátának megfelelően növekszik.

- A második fázisban az ultrahangos energia áramlása állandó értéken van tartva, mialatt a szerszám vibrációjának az amplitúdója monitorozva van. Ha a görbe egy bizonyos mintázatot követ, akkor a huzalkötés folytatódik. Ha szignifikáns eltérés mutatkozik a görbe referencia értékétől, akkor a folyamat megszakad, és a kötés hibásnak lesz értékelve.
- A harmadik fázis alatt a huzalt egy előírt értékig növekvő mértékben deformálják mialatt az ultrahangos energia kontrollálva áramlik. [11]

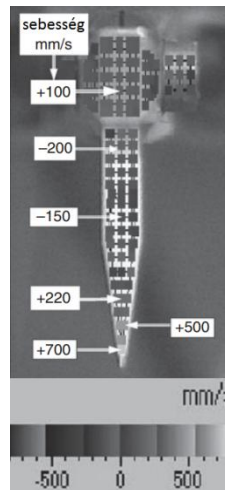
60 kHz-es frekvencián működő ék vibrációs módjai huzalkötés előtti (terheletlen) és alatti (terhelt) állapotban az 5.7. ábrán láthatóak az 1-es és a 3-as görbén. Jól láthatóak a vibrációs amplitúdó abszolút értékei, melyeket lézer interferométerrel mértek. A rezgés szimmetriáját a pontozott görbe mutatja az ék hátsó részénél. Az ultrahangos táp az átalakítóhoz fix 60 kHz-es frekvenciát és konstans amplitúdót szolgáltatott a huzalkötés alatt. Ezeken az ábrákon, a „T” jelöli a rezgéstovábbító végét. [8]



**5.7. ábra.** Alumínium ékes kötésénél az ék rezgésének amplitúdója 60 kHz-es gerjesztés esetén. [8]

A rezgési csomópontok helyzete a huzalkötés folyamata során az ék végének mechanikai lekötöttségének mértékétől függenek. Ez pedig elsősorban a kötés deformációval (~1.6 huzal átmérő) van kapcsolatban. Egy kisebb deformáció, mint például 1.2, eredményezhet egy 0.50-0.64 mm-es csomóponti emelkedést a terheletlen pozícióknál. Esetünkben ez nem mutatott szignifikáns változást az ék amplitúdó változásában a huzalkötés során, viszont ilyen változások várhatóak, ha a kötési erő és/vagy a kötés deformációja megnövekszik. Minden egyes ábrázolt pont három mérésnek az átlagát jelképezi. Az utóbbi időben, különböző lézertechnikákat kezdtek el használni az ék mozgáskarakterisztikájának meghatározására. [8]

Manapság az ék és a rezgéstovábbító teljes rezgésamplitúdó módjai megmérhetőek kereskedelmi eszközökkel. A kapilláris és a rezgéstovábbító sebessége látható a 20. ábrán ábrázolva, benne a maximális amplitúdó részletek és a tengelyen kívüli rezgéssel és rotációval megadva. Olyan műszerrel, mint a lézeres rezgésmérő, szintén ábrázolni tudjuk az ék rezgési sebességét (5.8. ábra) a frekvencia függvényében és a rezgéstovábbítóét egy kiválasztott frekvencia tartományban, megengedve a rendszer teljesítményének optimalizálását. [8]



**5.8. ábra.** A kapilláris egyes részeinek sebessége 150 kHz-es vezérlő frekvencia során. [8]

### 5.3.7. A termoszonikus huzalkötés valós idejű, in-situ (helyben végzett) megfigyelése

Hőmérséklet és erőmérő szenzorokkal vizsgálva egy teszchipet, a hőmérséklet és a kontaktusfelületek körül több helyen a huzalkötés során ébredő erők megméréséből egy kötésminőségi paraméter nyerhető ki. Ráadásul a kapott hullámprofil reprodukálható fixált gépi paraméterek mellett. A kerületi erőjelek által fontos konklúziók vonhatóak le a folyamat karakterisztikájáról és négy folyamati fázisra lehet bontani a huzalkötést:

- Kezdeti nyugvósúrlódás
- Csúszás
- Kötés növekedése
- Deformáció [11]

Összefoglalva az önellenőrzés egy biztató megközelítés a kötés minőség monitorozásában. Jelenleg azonban, a kötés minőség monitorozás egy az átalakítóba integrált kiegészítő szenzor jelein alapszik, elérhetővé téve egy sokkal jobb megkülönböztetést a jó és rossz kötések között, különösen a szennyezett felületek esetében. [11]

## 6. Gyakorlati munka

### 6.1. A félautomata huzalkötő gép használata

Az Elektronikai Technológia Tanszéki Laboratóriumban található Orthodyne Model 20 (OM20 - 6.1. ábra) félautomata ultrahangos huzalkötő gép bővített 2008-as kiadású angol nyelvű használati útmutatóját megszerezve a gyártótól, annak segítségével próbapanelokon kísérletezve a lehetőségekhez mérten optimalizáltam, az elkalibrált gép működését. Mindezek után saját tapasztalataim alapján és a használati útmutatót igénybe véve elkészítettem a gép operátor szintű magyar nyelvű használati útmutatóját. Ennek és megfelelő engedély birtokában bárki ki tudja próbálni, sikeres kötéseket tud vele létrehozni, és az esetlegesen felmerülő problémákat el tudja hárítani.



6.1. ábra. Orthodyne Model 20 félautomata huzalkötő gép [41]

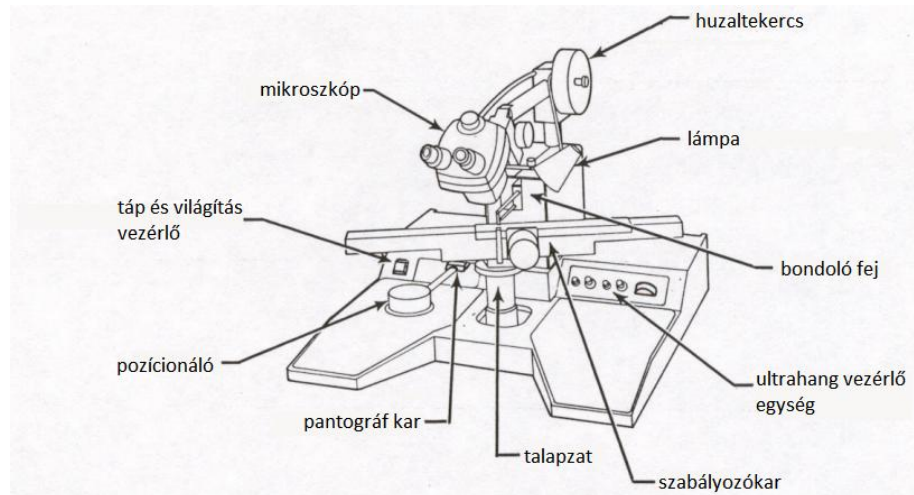
Az Orthodyne Model 20-as típusú huzalkötő gép néhány fontosabb jellemzője: [41]

- 1992-es modell
- automatikus hurkolást és visszalépést tesz lehetővé
- 100 – 500  $\mu\text{m}$  átmérőjű alumínium, 100 – 380  $\mu\text{m}$  átmérőjű arany huzalokkal használható,
- kiegészítő segítségével 75 – 635  $\mu\text{m}$  széles szalagkötésre is alkalmas
- egyenletes huzalkötés
- céltárgy megvilágítás
- mély hozzáférés, többszörös hurkok és manuális Z irányú választás

A tanszéken található huzalkötő gépbe jelenleg 250  $\mu\text{m}$ -es alumínium huzal van befűzve, de a gép képes más átmérőjű huzal kötésére is. A különböző vastagságú

huzalokhoz különböző kötési paraméterek tartoznak. Ezeket mindig be kell állítanunk jó kötés létrehozása érdekében.

A 6.2. ábra bemutatja a gép főbb részeit.



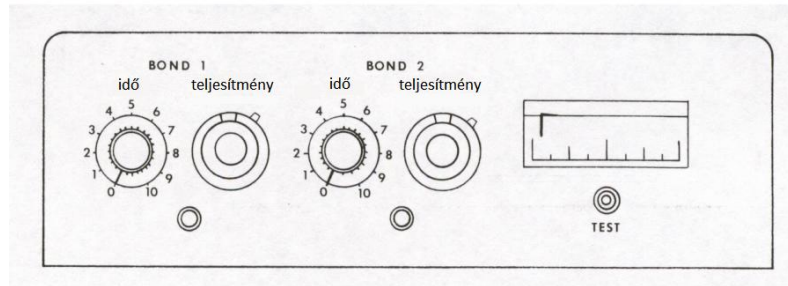
**6.2. ábra. Az Orthodyne Model 20 félautomata huzalkötő gép részei. [41]**

A 6.1. táblázat útmutatást ad a kiindulási értékeink megválasztásához, melyeket már a gép elhasználódásából, a különböző környezeti tényezők és az egyes paraméterbeállító csavarok helyzetéből adódó működésbeli változások miatt valószínűleg hangolnunk kell. Ezt próbakötések létrehozása során ajánlatos megtenni, melyet egy sima rézfelületű FR4-es hordozón meg is tehetünk. A jobb tapadás érdekében a paneljeinket, ha megtehetjük oxidmentesítsük és tisztítsuk meg a szennyeződésektől, mivel minden, ami a homogén, sima kontaktusfelület felületet megbontja, az csökkentheti a huzal tapadását.

**6.1. táblázat. OM20 Gramforce, idő és teljesítmény kiinduló értékei (egy időegység 50 ms). [41]**

Huzal átmérője	Első kötés		Második kötés		Erő
	idő	teljesítmény	idő	teljesítmény	
125	1-2	90	1-2	120	125
250	1,5-2,5	180	1,5-2,5	200	350
380	2-3	300	2-3	325	700
500	3-5	500	3-5	550	1000

Az első és a második kötés kötési idejét és teljesítményét az előlapi panelen (6.3. ábra) tudjuk beállítani.



**6.3. ábra. OM20 kötési paramétereit vezérlő panel. [41]**

A gramforce beállítása már nem ennyire egyértelmű. Azt, hogy mekkora a pillanatnyi értéke, egy dinamóméterrel tudjuk lemérni. A mérőszerszám végét éppen a rezgéstovábbbítón az ék elé kell helyezni és egy kicsit megemelni azt, majd leolvasni az értéket. Ha változtatni szeretnénk rajta, akkor az 1-es jelzésű csavarral (6.4. ábra) tudunk utána állítani. [41]

Az előlapi panelen található még egy teszteléshez használható nyomógomb a hozzátartozó kijelző skálával. Ezzel az átalakító impedanciáját tudjuk megmérni. Nagy hatással van ezen értékre az ék elhelyezkedése a tölcséren. Ha 0.5-nél kisebb értéket ad vissza, akkor nem létesíthető optimális kötés. A hiba oka lehet: [41]

- az ékbeállító csavar laza vagy elkopott
- az ék érinti a kapillárist vagy a huzal érinti az éket
- az ék túl magasasan vagy alacsonyan helyezkedik el az átalakító tölcséren
- a mutató beszorult
- a szorító az átalakító ellenében van
- a generátor kalibrálása

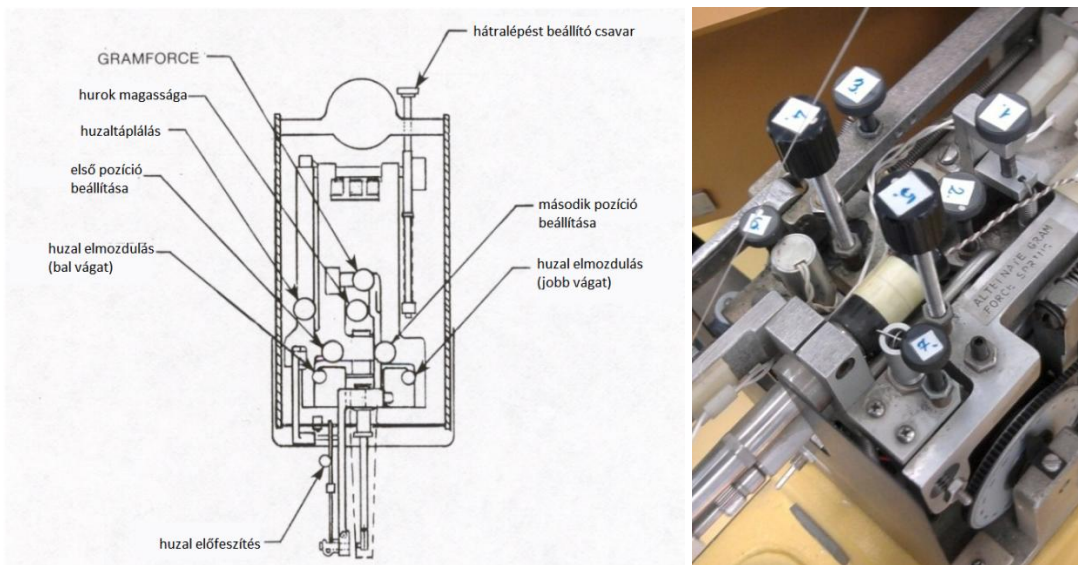
A nyomógombot nem szabad két másodpercnél hosszabban, ill. két másodpercen belül újra megnyomni, mivel akkor a generátor tönkremehet! [41]

A gépen 10 értékbeállító csavar található. Ezek közül a hallgatói mérések során csupán kettőnek a használata javasolt: Az 5-ös és a 6-os csavarokkal állíthatjuk be az első és a második kötés létrehozásának kiinduló magasságát. A javasolt érték 1 mm mindkét esetben. [41]

Köztük a hátralépésnek (10-es csavar) a maximális 7.6 mm-es értékétől kisebbet állítsunk be, mivel a nagyobb ugrás silány hurkokat és nem tapadó második kötéseket okozhat. [41]

A huzaltáplálásra (3-as csavar) vonatkozó ajánlás, hogy az első kötés létrehozása előtt kb. egy huzalátmérőnyire lógjon az ék elé a huzal. A rövidebb hosszak bizonytalan kötéseket okozhatnak. Itt megjegyzendő, hogy az első kötést a jobboldali rovátka tudja létrehozni, a másodikat pedig a baloldali a kialakításuknak köszönhetően.

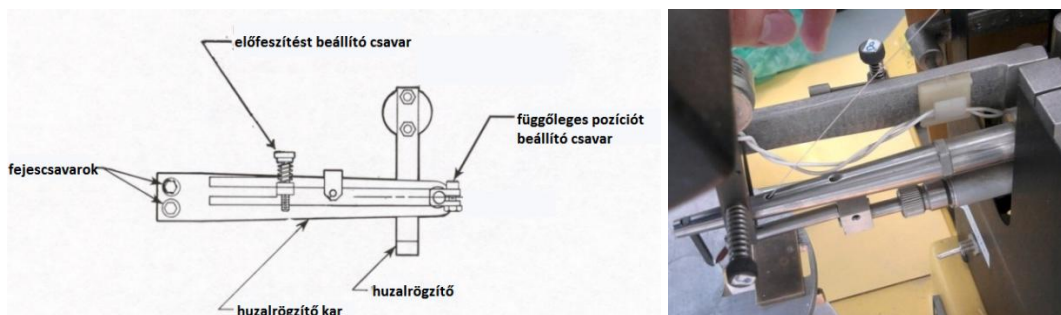
250 µm-es átmérőnél és felette előfordulhat, hogy a huzal az ék mögött is letapad, ez rossz szakítást és a következő első kötés végrehajthatatlanságát okozza. Ekkor a feszítő csavart (8-as csavar – 6.5. ábra) szükséges meghúzni, azért, hogy a huzalt hamarabb vágja el. Ezen kívül megoldás még az is, ha a kapillárist mozgatjuk közelebb az ékhez.



a) [41]

b)

6.4. ábra. Az OM20 beállító csavarjainak többsége a) rajzon b) valóságban



a) [41]

b)

6.5. ábra. Az OM20 huzalkötő fején lévő csavarok a) rajzon b) valóságban

A 6.2. táblázatban 9 csavar funkciójának rövid, tömör leírása található.

6.2. táblázat. OM20 értékbeállító csavarjainak funkciói. [41]

<i>Beállító csavarok</i>	<i>Funkciójuk</i>
<i>Huzal előfeszítés</i>	125 µm-es huzalokhoz lazán, 500 µm-es huzalokhoz szorosan
<i>Huzal elmozdulás (jobb vágat)</i>	CW (clockwise – óramutató járásával megegyező irányban) - balra mozdítja a huzalt
	CCW (counterclockwise – óramutató járásával ellentétes irányban) - jobbra mozdítja a huzalt
<i>Huzal elmozdulás (bal vágat)</i>	CW - jobbra mozdítja a huzalt
	CCW - balra mozdítja a huzalt
<i>Első pozíció beállítása</i>	CW - megemeli a fejet
	CCW - leengedi a fejet
<i>Huzal táplálás</i>	CW - csökkenti a farkok hosszát
	CCW - növeli a farkok hosszát
<i>Hurok magasság</i>	CW - csökkenti a hurok magasságát
	CCW - növeli a hurok magasságát
<i>Gramforce</i>	CW - növeli az erőt
	CCW - csökkenti az erőt
<i>Hátralépés</i>	CW - növeli a távolságot
	CCW - csökkenti a távolságot
<i>Első pozíció beállítása</i>	CW - megemeli a fejet
	CCW - leengedi a fejet

A gép közepén, a rezgéstovábbító alatt található egy 3 állású kapcsoló. Általános esetben megfelelő a középső pozíciója, mivel ekkor az „automatikus” program hajtódik végre: első kötés létrehozása előtt zárva van a huzalszorító, viszont a lehelyezése után rögtön kinyitódik és a második kötés létrehozásáig úgy is marad, amikor is a szakítás miatt is összezáródik.

Ha szükséges, vagy csak próbálkozni szeretnénk az ettől eltérő kötési folyamattal, akkor balra kapcsolva nyithatjuk, jobbra kapcsolva pedig zárhatjuk a huzalszorítót.

Alapesetben, egy új, jól működő gép működése így nézne ki: [41]

1. gombnyomás: megkeressük, hogy hova akarjuk letenni az első kötet



2. gombnyomás: elkészíti az első kötést, az ék a hurok magasságot állító csavar állásának megfelelő magasságba emelkedik, miközben a huzal az egyik rovátkából a másikba megy át
3. gombnyomás: az ék a hátralépésért felelős csavar állásának megfelelő távolságba ugrik el
4. gombnyomás: létrehozza a második kötést és elszakítja a huzalt

Esetünkben is működik ez a folyamat, csupán teljesen lapos hurkot hoz létre a hurokmagasság állító csavar (2-es csavar) állásától függetlenül, amivel így pl. nem lehet húzótesztet végrehajtani.

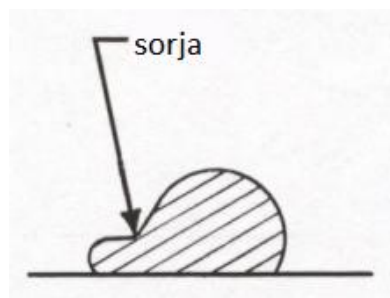
Éppen ezért, hogy szebb, tesztelhetőbb, magas hurkokat hozhassunk létre, a folyamat közben csipesszel saját kezűleg alakítsunk ki hurkot úgy, hogy a 2. és a 3. gombnyomás között magunk felé mozgatjuk a panelt kb. 10 mm-t, majd csipesszel ráfogva a vezetékre, egy kisebb visszafele mozgás során kialakítjuk a hurkot.

Az elkészült kötések vizuális minőségellenőrzését és a 6.6; 6.7; 6.8; ábrák alapján készíthetjük el. [41]

A hibás kötések visszacsatolást is adnak a lehetséges hibákról, úgymint: [41]

- 6.6. ábra esetében az egy oldalon lapult huzal, a nem megfelelő huzal elmozdulás beállítása miatt keletkezhetett.
- 6.7. ábra esetében a mindkét oldalon lapult huzal a túlságosan nagy értékű Gramforce vagy teljesítmény miatt jöhetett létre.
- 6.8. ábra esetében a túlkötött huzalok a) esetben a túlságosan nagy teljesítmény és gramforce következtében; b) esetben pedig a túlságosan nagy teljesítmény és időérték következtében alakulhattak ki.

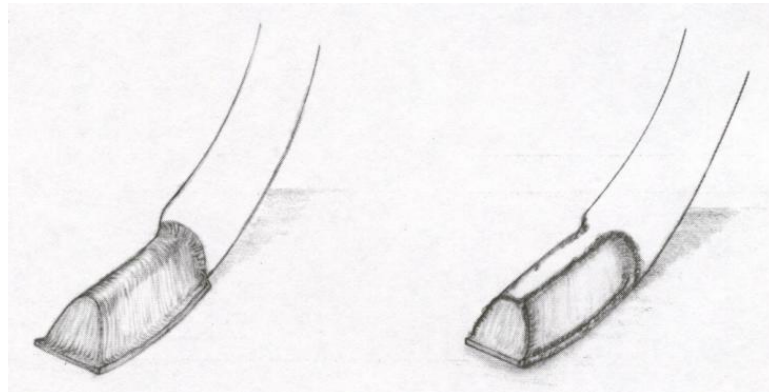
A 6.9. ábrán egy jó kötésre láthatunk példát. A jó kötés kb. olyan széles, mint a huzal; a tetejének pedig érintetlennek, fényesnek kell lennie. [41]



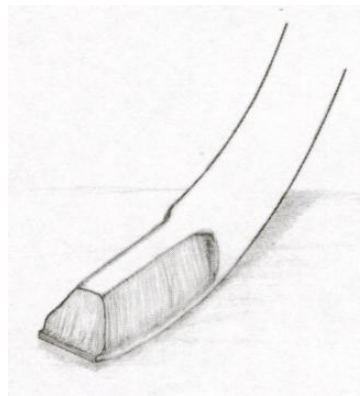
**6.6. ábra. Egy oldalon lapult huzal. [41]**



6.7. ábra. Mindkét oldalon lapult huzal. [41]



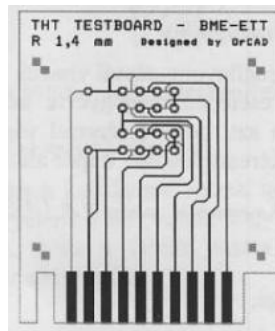
a) b)  
6.8. ábra. OM20 által túlkötött huzalok. [41]



6.9. ábra. OM20 által létrehozott jó kötés. [41]

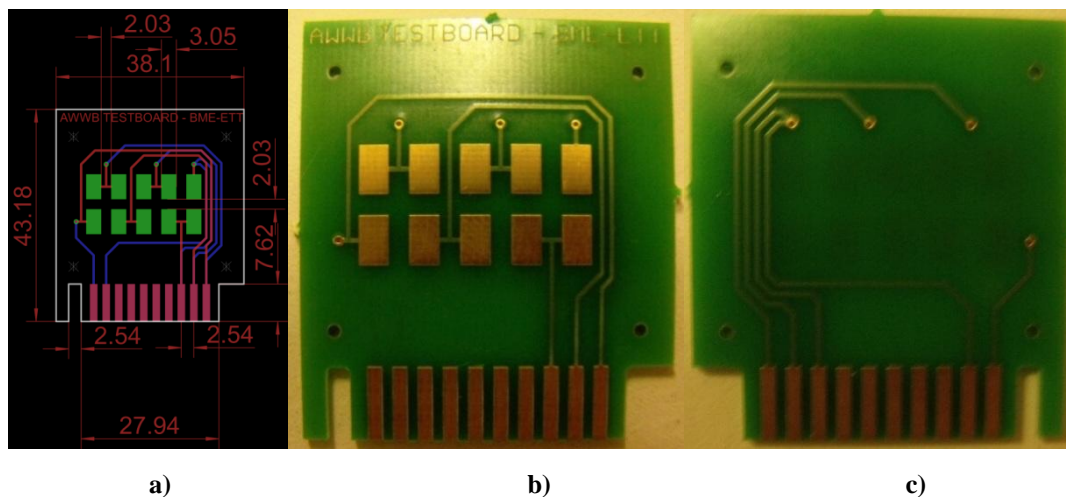
## 6.2. Tesztlemez tervezése összehasonlító vizsgálat elvégzéséhez

A panelt az Elektronikai Technológia 5. laborján („Furatszerelt alkatrészek szerelése újraömllesztés forrasztási technológiával”) használt kísérleti lemez (6.10. ábra) mintájára terveztem úgy, hogy a mérőáramkör sorcsatlakozójába illesztve a huzalkötéssel csatlakoztatott kontaktusfelületek között lévő ellenállást mérni lehessen négy-vezetékes méréssel.



6.10. ábra. Mintalemez a tervezéshez.

A kontaktusfelületek 3x5 mm-esek, a köztük lévő távolság pedig 0,2 mm. Ezek a méretek megengedik a 250 µm átmérőjű huzalok használatát – akár egy kontaktusfelületen többször is –, és a különböző hosszúságú hurkok kialakítását. A panel további méretei a 6.11. ábráról leolvashatók ill. a legyártott NYHL is látható.



6.11. ábra. A tesztpanel a) méretei b) top oldala c) bottom oldala.

Összesen 16 darab ENIG, 16 db ImAg, és ugyanennyi bevonatlan réz felületű panel került legyártásra. Előbbi két bevonatra az ipari trendeknek megfelelően esett a választásom, utóbbi réz pedig a várhatóan gyenge minőségű kötések referenciájaként szerepel. Az összegyűjtött információk alapján meg akartam vizsgálni, hogy mekkora a különbség az egyes kontaktusfelület fémezések között alumínium ékes-ékes ultrahangos kötés esetében.

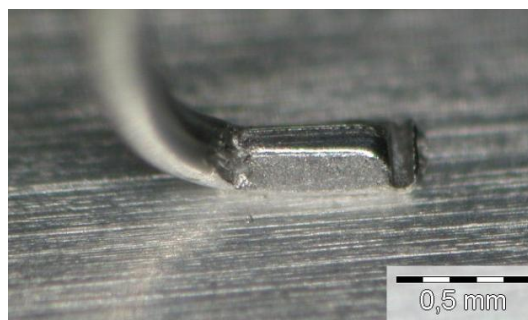
### 6.3. Az elkészített kötések

A huzalkötő gép elfogadható állapotba való kalibrálása után elkezdtem a legyártott panelekre kötéseket létrehozni.

A huzalkötés folyamata során használt idő és teljesítmény beállítások:

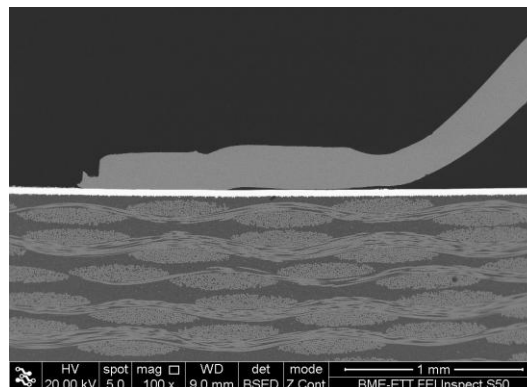
- első kötés: 125 ms/220,
- második kötés: 125 ms/200.

Az elkészült kötések nagy része a gép felhasználói kézikönyve alapján optikailag jól sikerült kötéseknek mondhatók, mint például a 6.13. ábrán látható.

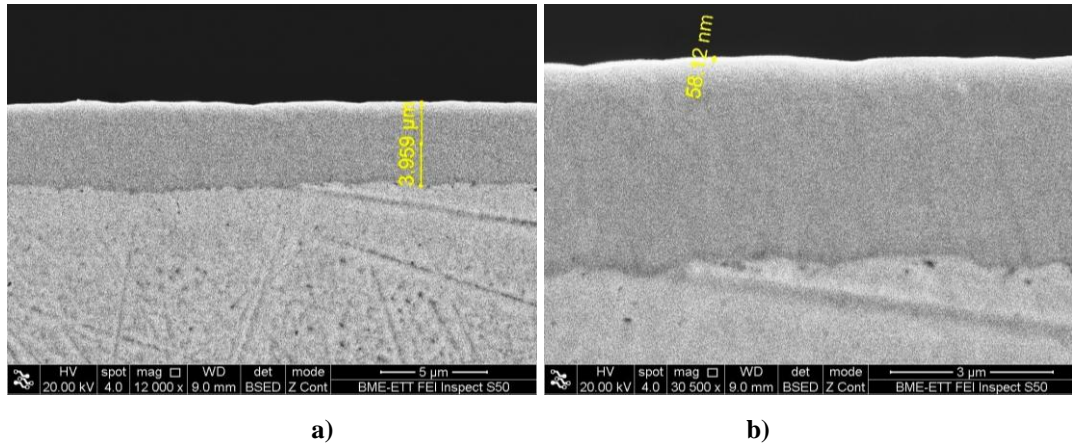


6.13. ábra. Általam készített ékkötés optikai mikroszkóppal készített képe.

Elektronmikroszkóppal végzett vizsgálatok alapján még nem lehetett kimutatni intermetallikus réteget (6.14. ábra), mely a gyenge kötési teljesítménynek tudható be. Azonban megmérve a nikkel és arany rétegvastagságokat (6.15. ábra) azok 4 és 0,06  $\mu\text{m}$ -esnek adódtak, melyek megfelelnek az irodalmazásban összefoglaltaknak.

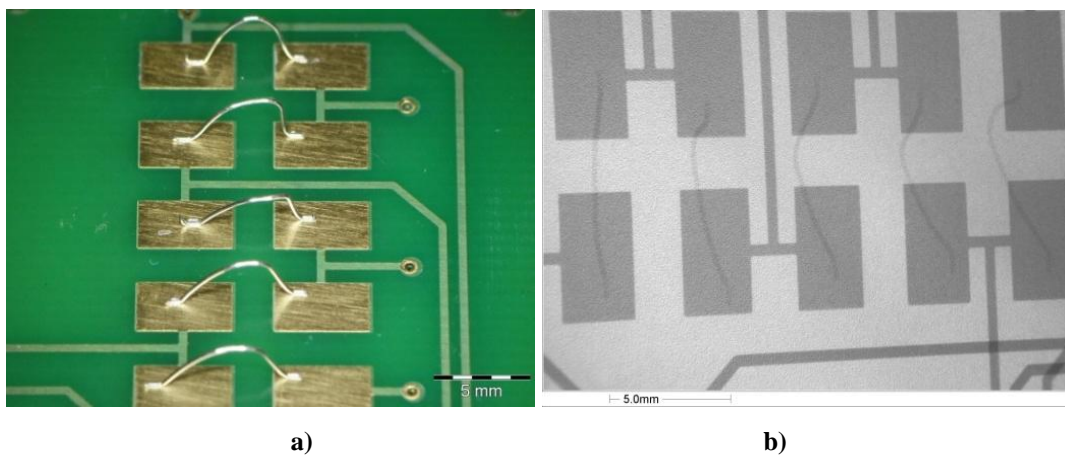


6.14. ábra. Egy kötésről elektronmikroszkóppal készült felvétel.

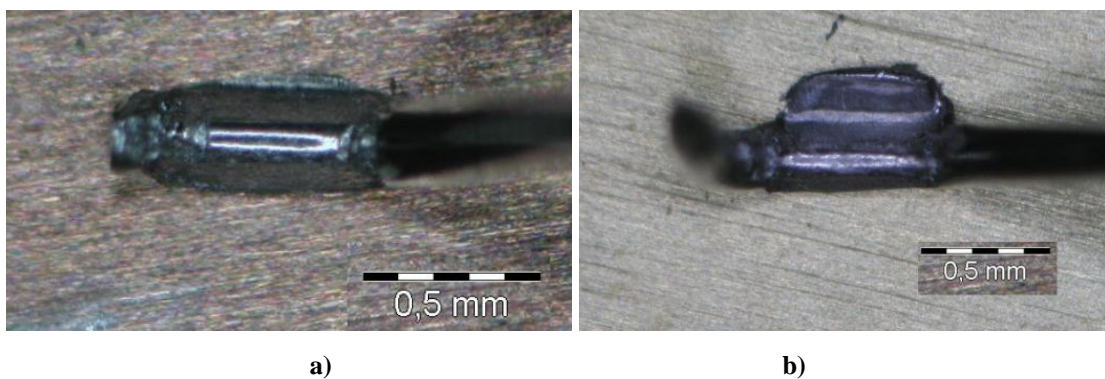


**6.15. ábra.** Elektronmikroszkóppal mért rétegvastagságok a) nikkell b) arany réteg esetén.

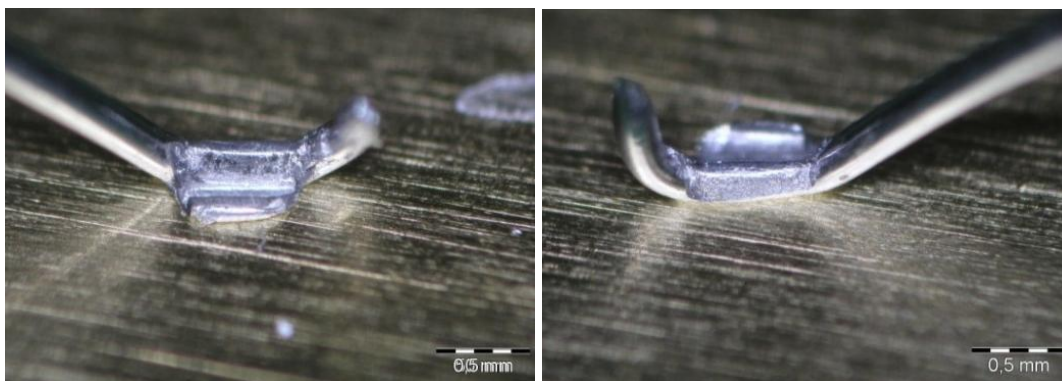
A kialakított hurokmagasságok lehetővé tették a húzó-teszt elvégzését. A kézzel formált hurkok a 6.16. ábrán látható módon néznek ki optikai és röntgen mikroszkóppal készített képeken. A röntgenmikroszkóppal készített kép 100 kV-os feszültségérték és 0,97 W-os teljesítmény mellett készült. A 6.17. és 6.18. ábrák vizuálisan egy jó és egy hibás kötésnek minősülő első kötésekre mutatnak példát.



**6.16. ábra.** ENIG bevonaton kialakított hurkok a) optikai b) röntgen mikroszkóppal készített képeken.

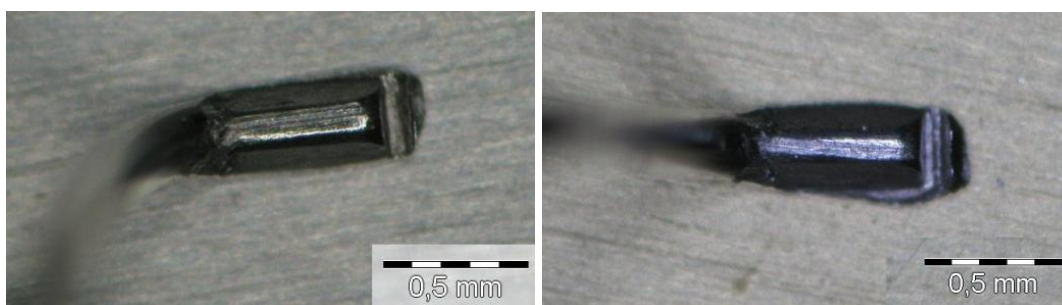


**6.17. ábra.** Egy első kötés formája a) az előírtaknak megfelelően b) hibásan kialakítva.



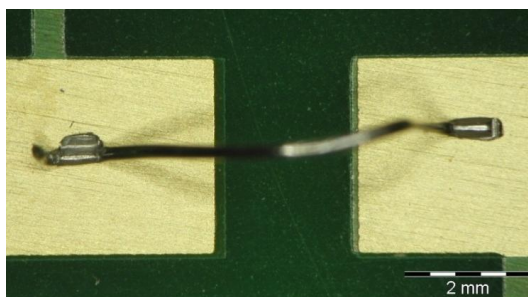
**6.18. ábra.** A hibásan kialakított kötés ~45°-os szögből mindkét oldalról.

Vizuálisan egy jó, és egy kicsit hibás kötésnek minősülő második kötésekre mutat példát a 6.19. ábra.



**6.19. ábra.** Egy szép és egy kicsit hibás második kötés felülnézeti képe.

Az első kötésnél mindig látható egy levegőbe nyúló huzalvég. A tanszéki huzalkötő gép könnyebb kezelhetősége miatt fontos, hogy ez a túlnyúló huzalvég az előírtnál (a huzal átmérőjénél) hosszabb legyen, ezzel tudjuk ugyanis az első kötés létrehozása előtt a huzalt a jobb oldali vájatba helyezni. Ennek is köszönhetően könnyen meg lehet különböztetni a huzalkötés folyamata során az első kötést a másodiktól (6.20. ábra).



**6.20. ábra.** Felülnézeti kép egy mindkét végén lekötött huzalról.

#### 6.4. A nyíró és húzó tesztek során kapott eredmények

A hurkok szimmetrikus volta miatt a húzótesztet a hurok felénél végeztem el, így egyenlő mértékben terhelve mindkét kötést. Réz felületű panelekből csak kettőre hoztam létre kötéseket, mivel egyáltalán nem tapadt meg az alumínium a felületen. A megtapadt néhány kötés pedig nagyon rossz teszteredményekkel rendelkezett.

A 6.3. táblázat a húzótesztek, a 6.4. táblázat pedig a nyírótesztek eredményeit tartalmazzák  $mN$  mértékegységben. Húzótesztek esetében ahol az első és a második kötéshez is ugyanaz az érték van beírva, a két kötésnél „egyszerre” történő törést/kontaktus elválást jelent. A közepen lévő értékek pedig a huzal szakadását jelentik a húzási pontban.

6.3. táblázat. Húzótesztek értékei.

panel azonosító		1.	2.	3.	4.	5.
ENIG-3	2. kötés		6082			2158
	1. kötés	4415		4905	1422	
ENIG-4	2. kötés		4905	3924	6033	
	1. kötés	4218				3483
ENIG-6	2. kötés					4660
	1. kötés	932	3679	2207	3090	
ENIG-8	2. kötés		4365		932	
	1. kötés	3041		5396		2011
ENIG-9	2. kötés	6916	6916	6082	6573	6033
	1. kötés					
ENIG-10	2. kötés		4709	3434	3728	
	1. kötés	5592				6278
ImAg-1	2. kötés		4464	4611	2502	
	1. kötés	4807	4464			3434
ImAg-2	2. kötés		4071			
	1. kötés	2747		3875	1668	3532
ImAg-3	2. kötés	4120	3826			
	1. kötés			5199	3924	4660
ImAg-4	2. kötés		2796		3188	
	1. kötés	4267		4120		2256
ImAg-9	2. kötés		4513			5248
	1. kötés	4905		5641	4071	
ImAg-10	2. kötés					
	1. kötés	6720	6965	6720	4365	6573
Cu-1	2. kötés	2600		1570	2600	
	1. kötés	2600	1570			1717
Cu-2	2. kötés		1521	2894	2845	1177
	1. kötés	1668	1521	2894		1177

**6.4. táblázat. A nyíró tesztek értékei.**

<i>panel azonosító</i>		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>ENIG-1</i>	2. kötés	3571	5033	4797	3904	7387
	1. kötés		4915	5131	6445	7662
<i>ENIG-2</i>	2. kötés	6681	5111	8034	5523	5935
	1. kötés	6151	6308	5091	2570	3296
<i>ENIG-5</i>	2. kötés	7171	7151	6877	5327	3885
	1. kötés	5111	6838		3041	2080
<i>ENIG-7</i>	2. kötés	5091		5660	4797	4915
	1. kötés	6484	2139		3689	
<i>ENIG-9</i>	2. kötés		7132	8466	6484	7485
	1. kötés	9231	11017	11448	7132	9270
<i>ENIG-10</i>	2. kötés	7014				7838
	1. kötés		9172	4326	2433	8034
<i>ImAg-5</i>	2. kötés	6896	6269	7564	6445	5739
	1. kötés	8545	8505	7151	7564	4797
<i>ImAg-6</i>	2. kötés	7269	7014	7485	6072	6484
	1. kötés	6484	6465	4503	4424	3375
<i>ImAg-7</i>	2. kötés	5935	5602	4542	4797	5974
	1. kötés	4621	6386	4679	4954	5641
<i>ImAg-8</i>	2. kötés	3080	6995	7917	6877	3747
	1. kötés	6583	6288	3865	7034	4679
<i>ImAg-9</i>	2. kötés	9310		9074	5700	
	1. kötés		7269			9153
<i>ImAg-10</i>	2. kötés	6602	7465	7838	8760	9221
	1. kötés	7642	8015	7544		9663
<i>Cu-1</i>	2. kötés		5150			5719
	1. kötés	4954		7720	1256	
<i>Cu-2</i>	2. kötés	5503				
	1. kötés				4189	

A húzó- és nyírótesztek (6.5. táblázat) átlagértékei:

- ImAg 4331 mN,
- ENIG 4271 mN,
- Cu 2025 mN.

**6.5. táblázat. A nyírótesztek átlagértékei.**

ImAg	2. kötés	6667 mN
	1. kötés	6378 mN
ENIG	2. kötés	6051 mN
	1. kötés	5961 mN
Cu	2. kötés	5458 mN
	1. kötés	4530 mN



Jól látszik, hogy a rézre silány minőségű kötések létesíthetők, köthetőségre pedig az ENIG és immerziós ezüst bevonatú kontaktusfelületek ajánlottak. Utóbbi kettő közül, az adatokból és a kötések létrehozása során tapasztaltakból az immerziós ezüst tűnik a megfelelőbbnek. Ezt támasztják alá az irodalmazásban foglaltak is.

A nyíró- és a húzótesztekre kapott értékek közötti eltérés (nagyobb terheléssel lehet oldalirányban a kötést elszakítani, mint függőleges húzással) a vártaknak megfelelő.

A használt 250  $\mu\text{m}$ -es alumínium huzal szakítószilárdsága az adatlapja szerint 3900-4900 mN. Ha megfigyeljük azokat az értékeket, melyeknél a huzal szakadt el a húzás helyén, még azelőtt, hogy a kontaktus vagy a papucs nyaka tört volna el, azt tapasztaljuk, hogy az előbbieknél megfelelő eredményeket kaptunk. A legkisebb érték 3924 mN, a legnagyobb 6916 mN az átlag pedig 5735 mN. Ebben a formában ezen értékek még nem a szakítószilárdságát jelentik, ahhoz el kell osztani kettővel őket, hiszen két huzalrészben oszlott meg a terhelés. Így 2868 mN-os terhelhetőséget kapunk, mely csak egy becslés a huzal szakítószilárdságára, mivel már alaptól hajlított (igénybevett) huzalt nem is hosszanti irányban, hanem oldal irányú erővel húztuk, mely csökkenti a tényleges terhelhetőséget.

A nyíró teszt után maradó nyomatok ugyan olyanok, csak halványabbak, mint azok, amelyek a húzóteszt után a kontaktus felszakadása után maradtak. Ezeken megfigyelhető egy vékony, a huzalból származó réteg, mely a nyíró teszt elfogadhatóságát jelenti.



**6.21. ábra.** Nyíró teszt utáni rétegmaradvány.

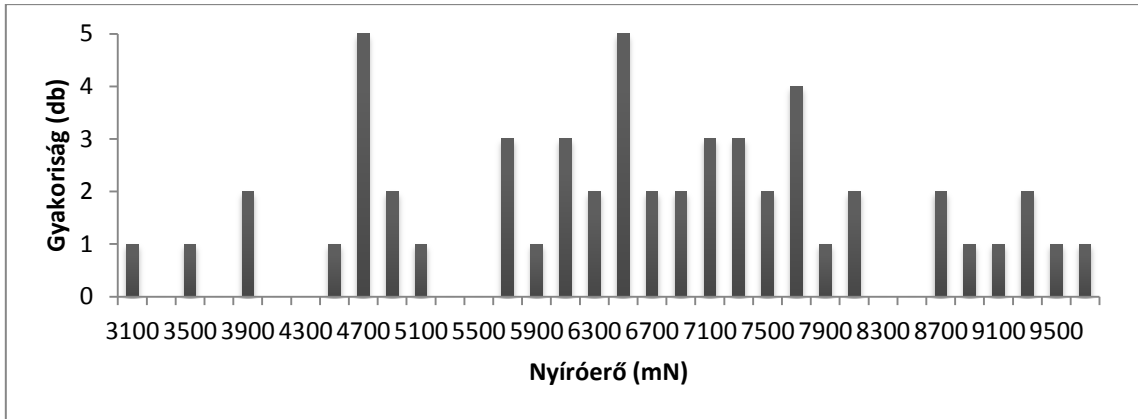
A kapott eredmények és a tapasztaltak alapján a második kötés minőségének javítása érdekében már csak apró finomhangolásokat tehetünk meg a paraméterek változtatásával. A kisebb hibák a bal oldali vágatban elfoglalt pozícióhibából adódtak.

Ugyanezen ok miatt léptek fel az első kötésnél is a féloldalasan nyomott struktúrák, csak gyakrabban. Ennek korrigálását a 4-es csavarral tehetjük meg. Mindkét esetben még közrejátszik a *Gramforce* pontatlan beállítása, ezt alkalmas mérőműszer hiányában nem tudtam megtenni, így tapasztalataimra és megérzéseimre hagyatkozva állítottam be. Az idő/teljesítmény értékeken változtatva is módosulna az ékes kötés alakja – ezek bonyolult összefüggésben állnak egymással, így a kötés alakjának még pontosabb beállításához sokkal több kísérlet szükséges.

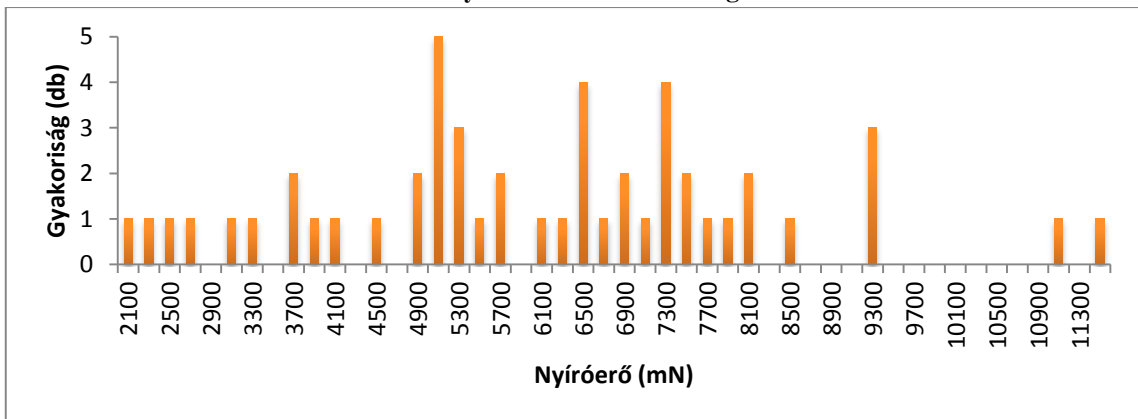
A tapasztaltak alapján rézre volt a legnehezebb kötések létrehozni, annak ellenére, hogy a kötési folyamat előtt a tárolás során keletkezett rézoxidot el is távolítottam a jobb tapadás érdekében. Az immerziós ezüst és arany felületekre pedig érezhetően jobban, és elsőre megtapadva jöttek létre a kötések. Ezeket vákuumcsomagoltan, fénytől elzárva tartottam a gyártásuk óta, egyedül a réz kontaktusfelületű nem volt légmentesen elzárva, de azt felhasználás előtt a tanszéken található rézmaró oldatba néhány másodpercig mártva a felületről egy vékony rézréteget és ezzel együtt a rézoxidot is eltávolítva sima elviekben jobban köthető felület maradt hátra. A kötések létrehozása alatt tett megfigyeléseket alátámasztják a tesztelés során kapott eredmények is.

Az értékeket diagramban megjelenítve is levonhatóak további következtetések a kísérletről. A nyíró teszt értékeinek ábrázolásánál (6.22. és 6.23. ábra) az első és a második kötés eredményeit már összesítve vettem számításba, mivel elfogadhatóan kis eltérés van köztük.

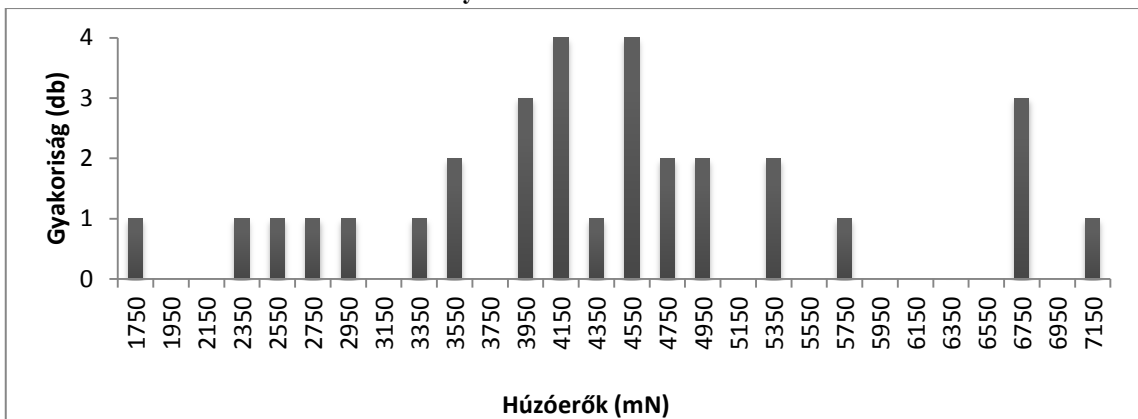
A számításba vett négy teszt közül mindnél találkozhatunk kiugróan magas és túlságosan kis értékekkel is az átlag körüli csoportosulás mellett, mely a normál (Gauss) – eloszlás fő tulajdonsága. A legjobb tesztértékek immerziós ezüst bevonaton végzett húzóerő eloszlásánál láthatóak (6.24. ábra), mivel ennek az alakja hasonlít a leginkább a haranggörbére. A nyíróerők eloszlását tartalmazó diagramoknál (6.22. és 6.23. ábra) egy-két kiugró adattól eltekintve jól látszik a normáeloszlás. Egyedül az ENIG bevonaton vizsgált húzó tesztek eredményei nem adják vissza a várt értékeket.



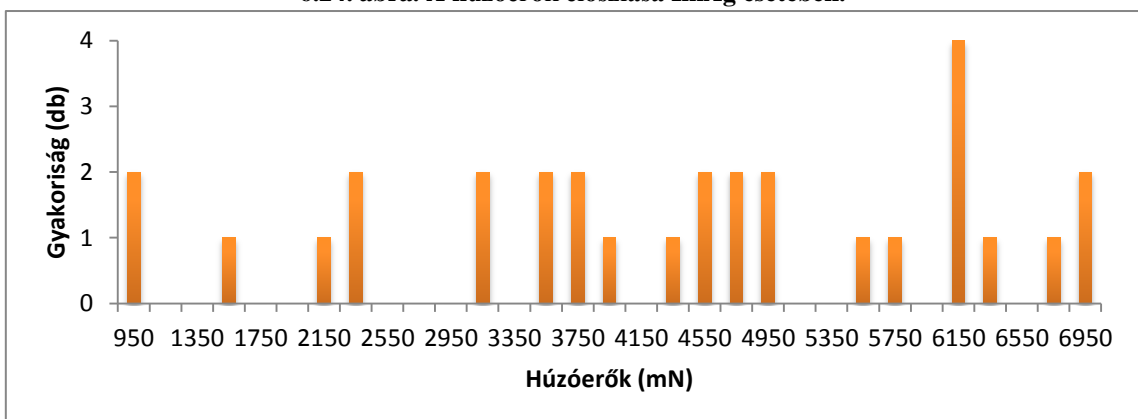
6.22. ábra. A nyíróerők eloszlása ImAg esetében.



6.23. ábra. A nyíróerők eloszlása ENIG esetében.



6.24. ábra. A húzóerők eloszlása ImAg esetében.



6.25. ábra. A húzóerők eloszlása ENIG bevonat esetében.

## 7. Összefoglalás

A Mikrohuzalkötések és minőségellenőrzésük című dolgozatom első részében szakirodalmi összefoglalót készítettem a mikrohuzalkötések három technológiai csoportjáról, nevezetesen: a termokompressziós, az ultrahangos és a termoszonikus kötésről, valamint a kétféle kötési módszerről: a golyós-ékes és az ékes-ékes kötési módszerekről, továbbá a napjainkban elterjedő réz huzalkötésről.

Összefoglaltam, hogy a huzal átmérőjének, anyagának, valamint a kötési technológiának a függvényében a legfontosabb kötési paraméterek jellegzetes értékei a következők:

- F (Force), nyomóerő: 10 – 40 cN
- T (Temperature), hőmérséklet: ultrahangos - termokompressziós: 20 – 500 °C
- t (time), tényleges kötési idő: 5 – 100 ms
- P (Power), energia: termokompressziós - ultrahangos: 0,5 – 1 W (100 kHz-en)

Részletesen tárgyaltam a huzalkötések területén alkalmazott kontaktusfelület fémezések típusait és készítési eljárásaikat, és összegeztem a különböző típusú huzalokhoz használt bevonatok tulajdonságait. A dolgozat második fejezetében részleteztem az ultrahangos huzalkötő berendezés legfontosabb részegységeit, ezek konstrukciós kialakítási formáit, valamint a kötések minőségi paramétereire kifejtett hatásukat.

A legfontosabb részegységek a következők:

- ultrahang-generátor (100 kHz),
- piezoelektromos rezgés-átalakító és rezgés-továbbító,
- szerszám (ék).

Összefoglaltam azokat a – részben még csak kísérleti állapotban lévő – módszereket, amelyeket a huzalkötés minőségének folyamat közbeni ellenőrzésére (monitorozására) fejlesztettek ki, bizonyos folyamatparamétereket és azok időbeni változását figyelve a huzalkötés kialakítása alatt. Ennek során bemutattam az ultrahang-generátor áramának, az átalakító vibrációjának, a huzal deformációjának és az ék rezgésállapotának mérésén, valamint a termoszonikus huzalkötés valós idejű, in-situ megfigyelésére az átalakítóba integrált kiegészítő erőmérő szenzor jeleinek mérésén alapuló monitorozási módszert. Ennek az utoljára említett módszernek különösen nagy a jelentősége, mert lehetővé

teszi a jó és a szennyezett felület miatt esetlegesen kialakuló rossz kötések megkülönböztetését.

Gyakorlati munkám során teoretikusan megközelítve tanulmányoztam az Elektronikai Technológia Tanszéken lévő Orthodyne Model 20 félautomata ultrahangos huzalkötő gép működését. A gyártótól beszereztem a berendezés új, kibővített gépkönyvét és megállapítottam, hogy az egyes technológiai paramétereket mely beállító eszközökkel és milyen módon lehet beszabályozni. A géphez magyar nyelvű kezelési utasítást készítettem.

Az összegyűjtött információkat felhasználva olyan tesztpanelt terveztem és használtam a kísérleti kötések készítéséhez, amely lehetővé teszi a kötések ellenállásának négyvezetékes mérését, valamint a húzó és a nyíró erő tesztelését a rendelkezésre álló eszközökkel. A gépkönyv által ajánlott módszerrel és értékekkel beállítottam a technológiai paramétereket, és a tesztlemezekre kötéseket készítettem. Háromféle kötési felületű – bevonat nélküli réz, immerziós ezüst és ENIG bevonatú – tesztlemezt vizsgáltam, minden esetben 250  $\mu\text{m}$  átmérőjű alumínium huzallal. Az ajánlott technológiai paraméterekkel ezüst és az arany felületi bevonattal rendelkező lemezekre jó formájú, megfelelő szilárdságú kötéseket készítettem, a réz felületen a kötések szilárdsága jelentősen gyengébb volt. Valószínű, hogy a nyomóerő, az ultrahang teljesítmény és/vagy a kötési idő növelésével a réz felületre készített kötések szilárdsága is javítható lenne. A paraméter-optimalizálás és a kötések gyorsított élettartam vizsgálata még további munkát igényel.

A továbbiakban szeretnék modern, az iparban is alkalmazott automata ultrahangos huzalkötő gépekkel ENEPIG és ENEP felületi bevonatokra sima és palládiummal borított rézhuzallal különböző vizsgálatokat elvégezni.

## 8. Hivatkozott irodalom

- [1] Technológiai folyamatok és minőségellenőrzésük laboratórium sillabuszok - 2. b. „*Forraszthatósági vizsgálatok, forrasztások és mikrohuzal-kötések készítése és vizsgálata*” 2012-02-04, <http://www.ett.bme.hu>) pp. 20-21
- [2] Ifj. Lambert Miklós: „*Mikrohuzalos kötések a mikroelektronikai technológiában*”. Heiling Média Kiadó Kft. Elektronet XV. évfolyam (2006) 4. szám pp. 14-17
- [3] Szécsényi János: „*Termoszonikus arany mikrohuzalkötések mechanikai és anyagszerkezeti vizsgálata*”. BME-TDK 2011 (2012-02-18, <http://tdk.aut.bme.hu/Files/TDK2011/Termoszonikus-arany-huzalkotesek.pdf>) pp. 3
- [4] CoorsTek – Gaiser precision bonding tools – „*Small Wire Wedges*” (2012-02-25, [http://www.gaisertool.com/pub\\_catalog.php?menu=pub](http://www.gaisertool.com/pub_catalog.php?menu=pub)) pp. 60-61
- [5] Jianbiao Pan, Patrice Fraud „*Wire Bonding Challenges in Optoelectronics Packaging*”, 2004, SME Technical Paper TP04PUB284, Society of Manufacturing Engineers, pp. 2-3 [http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1049&context=ime\\_fac](http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1049&context=ime_fac)
- [6] Kulicke & Soffa – „*Bonding Wire products*”. Literature ID# WBD-420/Revision 10/03 (2012-02-25 <http://ebookbrowse.com/kns-wirecatalog-pdf-d150821149>) pp. 1-5, 12
- [7] Barabás György: „*COB (Chip-On-Board) technológia a Balluff Elektronika Kft.-nél*”. Heiling Média Kiadó Kft., Elektronet XXI. évfolyam (2012) 1. szám pp. 16-17
- [8] George G. Harman: „*Wire Bonding in Microelectronics*”. McGraw-Hill Publishers, 3rd edition, New York, 2010. pp.14-17; 20-21; pp 4, figure 1-3; pp 35, figure 2-16
- [9] Shankara K. Prasad: „*Advanced Wirebonding Interconnection Technology*”. 1-4020-7762-9, Kluwer Academic Publisher, 2004 pp. 120-127; 18/fig.2.1.1; 167/fig.4.1.3; 4/fig.1.2; 13/fig.17; 28/fig.2.1.12; 517/fig.5.1.32
- [10] dr. Illyefalvi-Vitéz Zsolt – „*Mikrohuzalkötések tervezése és technológiája*” ppt. - Elektronikai gyártás és minőségbiztosítás (2012-02-18 <http://www.ett.bme.hu>) pp. 15
- [11] Brökelmann, M; Wallaschek, J: „*Bond Process Monitoring via Self-Sensing Piezoelectric Transducers*” 2004 IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference 2004 IEEE. pp. 125-129
- [12] Horst Clauberg, Petra Backus, Bob Chylak: „*Nickel–palladium bond pads for copper wire bonding*” Microelectronics Reliability Volume 51, Issue 1, January 2011, Pages 75–80 fig.2. fig. 5.

- [13] „*Next Generation Nickel-Based Bond Pads Enable Copper Wire Bonding*” (2012-09-03 [http://www.atotech.com/fileadmin/pdf/papers/el/Nickel-palladium\\_bond\\_pads\\_for\\_copper\\_wire\\_bonding.pdf](http://www.atotech.com/fileadmin/pdf/papers/el/Nickel-palladium_bond_pads_for_copper_wire_bonding.pdf))
- [14] EPEC: „*Surface finishes*” (2012-09-24 <http://www.epectec.com/downloads/surface-finishes.pdf>)
- [15] MULTEK: „*PCB Surface Finishes*” (2006) (2012-09-18 <http://www.scribd.com/doc/14277601/PCB-Surface-Finishes-Presentation-by-Multek>)
- [16] Johal, K.; Roberts, H; and Lamprecht, S.: "*Electroless Nickel/Electroless Palladium/Immersion Gold Process For Multi-Purpose Assembly Technology*"; SMTA International Conference; 2004
- [17] Atotech: „*Electroless Nickel - Immersion Gold (ENIG)*” (2012-09-18 <http://www.atotech.com/products/electronics/final-finishing/electroless-nickel-immersion-gold-enig.html>)
- [18] Atotech: „*ENEPIG*” (2012-09-20 <http://www.atotech.com/products/electronics/final-finishing/electroless-nickel-electroless-palladium-immersion-gold-enepig.html>)
- [19] Atotech: „*Universal Finish SolderBond (UFSB)*” (2012-09-20 <http://www.atotech.com/products/electronics/final-finishing/electroless-nickel-electroless-palladium-immersion-gold-enepig/universal-finish-solderbond.html>)
- [20] Randy Schueller: „*Considerations for selecting a printed circuit board surface finish*” (2010) (2012-09-08 [http://www.dfrsolutions.com/pdfs/SMTAI\\_2010\\_Schueller.pdf](http://www.dfrsolutions.com/pdfs/SMTAI_2010_Schueller.pdf))
- [21] E-Learning Education and Continuing Training to Electronics Assembling Technology: „*Felületi bevonatok hibái*” (2012-09-24 [http://www.elect2eat.eu/elect2eat.eu/Components/ETE%2004-1/Data/Text\\_hu/4.txt](http://www.elect2eat.eu/elect2eat.eu/Components/ETE%2004-1/Data/Text_hu/4.txt))
- [22] Horst Clauberg, Ivy Qin, Paul Reid and Bob Chylak: „*Fine Pitch Copper Wire Bonding*” Chip Scale Review Nov/Dec 2010 pp.20-22 fig. 2; 3; 4
- [23] Usman Chaudhry, Danytza Corral, Greg Ryan: „*TI's journey to high-volume copper wire bonding production*” May 2012 (<http://www.ti.com/lit/wp/sszy003/sszy003.pdf> 2012-10-10)
- [24] Bob Chylak: „*Developments in Fine Pitch Copper Wire Bonding Production*” 2009 11th Electronics Packaging Technology Conference
- [25] Xiangquan Fan, Techun Wang, Yuqi Cong, Binhai Zhang, Jiaji Wan: „*Oxidation Study of Copper Wire Bonding*” 2010 11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging pp. 246-249 fig 1

- [26] I. Qin, A. Shah, C. Huyn, M. Meyer, M. Mayer, Y. Zhou: „*Role of process parameters on bondability and pad damage indicators in copper ball bonding*” *Microelectronics Reliability* 51 (2011) 60–66 fig. 5.
- [27] H. Xu, C. Liu, V.V. Silberschmidt, Z. Chen, J. Wei, M. Sivakumar: „*Effect of bonding duration and substrate temperature in copper ball bonding on aluminium pads: A TEM study of interfacial evolution*” *Microelectronics Reliability* 51 (2011) 113–118
- [28] Yanhong Tiana, Chunqing Wang, Ivan Lumb, M. Mayerb, J.P. Jungc, Y. Zhoua: „*Investigation of ultrasonic copper wire wedge bonding on Au/Ni plated Cu substrates at ambient temperature*” *journal of materials processing technology* 208 (2008) 179–186
- [29] Dong Liu, Haibin Chen, Fei Wong, Kan Lee, Ivan Shiu and Jingshen Wu: „*Effect of Heat Affected Zone on the Mechanical Properties of Copper Bonding Wire*” 2011 Electronic Components and Technology Conference pp. 1523-1528 fig.1
- [30] N. Srikanth, S. Murali, Y.M. Wong, Charles J. Vath III: „*Critical study of thermosonic copper ball bonding Thin Solid Films*” 462–463 (2004) 339–345 fig. 3.
- [31] Peisheng Liu, Liangyu Tong, Jinlan Wang, Lei Shi, Hao Tang: „*Challenges and developments of copper wire bonding technology*” *Microelectronics Reliability* 52 (2012) 1092–1098 fig7
- [32] A. Pequegnat, H.J. Kim, M. Mayer, Y. Zhou, J. Persic, J.T. Moon: “*Effect of gas type and flow rate on Cu free air ball formation in thermosonic wire bonding*” *Microelectronics Reliability* 51 (2011) 43–52 fig. 5. fig. 10.
- [33] [http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0268\\_wb/index.html](http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0268_wb/index.html) Martin Tarr “*Bonding to the Chip Face*”, Figure 6
- [34] [www.electroniccomponents.geaviationsystems.com](http://www.electroniccomponents.geaviationsystems.com) Application Specific Integrated Circuits (ASICs)
- [35] Mustafa Oezkoek, Joe McGurran, Dieter Metzger, Hugh Roberts: „*Wire Bonding and Soldering on Enepig and Enep Surface Finishes with Pure Pd-Layers*” IPC Conference USA 2012
- [36] Y. HUANG,<sup>1</sup> H.J. KIM,<sup>1,3</sup> M. MCCRACKEN,<sup>1</sup> G. VISWANATHAN,<sup>2</sup> F. PON, M. MAYER,<sup>1</sup> and Y.N. ZHOU: „*Effect of Pd Surface Roughness on the Bonding Process and High Temperature Reliability of Au Ball Bonds*” *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, Vol. 40, No. 6, pp 1444-1451, 2011
- [37] Liang Yi Hung, Yu Cheng Pai, Men Yeh Chiang, Kevin Hung, Don Son Jiang and C.M. Huang: „*Investigation of Ultrasonic Palladium Coated Copper Wire Wedge Bonding on Different Surface Finish*” *International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology conference* 2011 pp. 122-125 fig. 3; 4;



- [38] Petar Ratchev, Serguei Stoukatch, Bart Swinnen: „*Mechanical reliability of Au and Cu wire bonds to Al, Ni/Au and Ni/Pd/Au capped Cu bond pads*” *Microelectronics Reliability* 46 (2006) 1315–1325
- [39] Mustafa Oezkoek, Nigel White, Horst Clauberg: „*Copper Wire Bond investigation on Multiple Surface Finishes -Enabling Wire Bond Packages without Gold*” *International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology conference 2011* pp. 37-41
- [40] Dr. Csokán Pál, Dr. Nádasi Endre: „*Felületnemesítés fémbevonatokkal*” Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979, pp. 15-17, 77, 88, 104, 124, 135, 136, 146-148, 161-163, 171, 172, 193, 251-257, 267, 329-333, 359
- [41] Orthodyne Electronics Corporation: *Orthodyne Model 20 Large Wire Bonder User's Manual & Brochure*