



Termoszonikus arany mikrohuzalkötések mechanikai és anyagszerkezeti vizsgálata

TDK dolgozat

Készítette: Szécsényi János IV. éves villamosmérnök hallgató

Konzulensek: dr. Illyefalvi-Vitéz Zsolt (BME-ETT)

Bátorfi Réka (BME-ETT)

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Elektronikai Technológia Tanszék

2011

Tartalomjegyzék

Bevezető.....	2
A termoszonikus mikrovezetők [1].....	3
Termoszonikus arany vezetők paramétereinek vizsgálata	5
Mikrovezetők minősítése	7
A destruktív felhúzó teszt.....	7
A destruktív gölyös kötés letolási vizsgálat	9
Manuális letolás	11
A non-destruktív felhúzó teszt	12
A non-destruktív gölyös kötés letolási vizsgálat	13
Minőség javító speciális kötések.....	13
A problémafelvetés	14
Különböző bondolható felületi rétegszerkezetek.....	16
ENIG/ENEPIG struktúra [1]	17
Az egyes felületi rétegvastagságok megállapítása	18
Rétegvastagság mérés keresztmetszeti csiszolaton	18
Rétegvastagság mérés maszkolva maratott felületen	20
Pásztázó elektronmikroszkópos rétegvastagság mérés.....	22
Atomerő-mikroszkópos felszíni profilvizsgálat	26
Terminál kötések mechanikai vizsgálata	28
Eredmények értékelése.....	28
Összefoglalás	29
Köszönetnyilvánítás.....	29
Hivatkozások.....	30

Bevezető

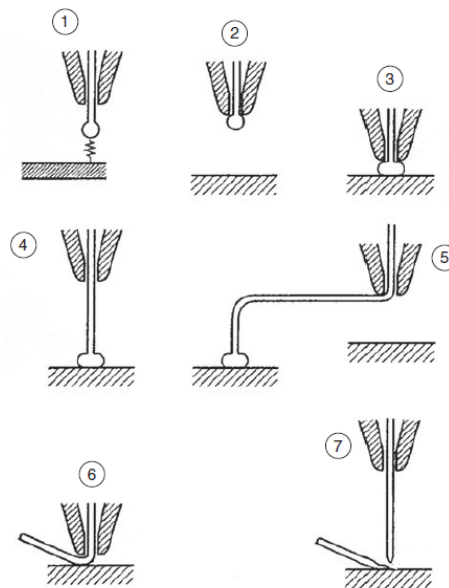
Az elmúlt évtizedekben az infokommunikációs, valamint az egyéb nagybonyolultságú és nagyintegráltságú áramköröket igénylő technológiák fejlődése a félvezetőgyártás és tervezés további fejlődését eredményezte. A miniatürizálás nem lassuló tendenciája a fentiekkel egyetemben maga után vonta az alkatrész-, moduláramkör-, és készüléktervezés valamint a gyártási technológiák fejlődését. Ez újabb kihívásokat támaszt az elektronikai ipar többi résztvevője felé. A miniatürizálás eredményeképpen a félvezető eszközök és az áramköri hordozó, vagy a tokozás kontaktusfelületeinek elektromos összeköttetései egyre inkább csak mikrohuzalkötésekkel, vagy még ennél is fejlettebb rétegtechnológiákkal, 3D-s integráció esetén furatfémzéssel (pl. TSV through silicon via technológiával) valósíthatók meg. Ezzel egyidejűleg a felhasználók által megkívánt szigorú minőségi elvárások és a gyártói oldal költséghatékonyságot szem előtt tartó magatartása újabb és újabb mérnöki megoldásokat hív életre. A tokozott félvezető alkatrészek használatát ma már egyre inkább átveszik a tokozatlan, az áramköri hordozóra (kerámia vagy pl. epoxi-üvegszövet nyomtatott huzalozású hordozók) közvetlenül forrasztással vagy vezető ragasztással beültetett félvezető eszközök alkalmazása. Az utóbbi két évben hazánkban is egyre inkább elterjednek ezek a tokozás hiánya miatt hely- és sok esetben költséghatékony, ámde igen magas szintű mérnöki tudást és fejlett folyamatokat, berendezéseket igénylő gyártási technológiák.

Kutatásom tárgya egy tokozatlan félvezető alkatrészekkel szerelt FR4-es moduláramkör, melyet a fröccssajtott tokba helyeznek. A fröccssajtott tok kivezetéseihez a moduláramkör megfelelő kontaktusfelületeit is termoszonikus mikrohuzalkötésekkel kötik be. A félvezető és a hordozó közötti összeköttetéseket is termoszonikus arany mikrohuzalkötésekkel hozzák létre, ezek vizsgálatát az Önálló tervezés tárgy keretein belül végeztem. Költséghatékonysági okokból a fröccssajtott tok fém kivezetőinek felületi bevonatát megváltoztatták, az aranyréteg vastagságát csökkentették. A kötési felületek anyagi és felületi minőségének változása a kötések minőségét és megbízhatóságát befolyásolhatja, a kötéstechnológiai paraméterek változtatását kívánja. Ezért célom a kétféle, korábban alkalmazott „vastag” aranyréteggel bevont valamint a jelenleg bevezetés alatt levő „vékonyabb” aranyréteggel rendelkező kivezetések vizsgálata volt, különös tekintettel a pontos rétegszerkezet meghatározására, anyagi jellemzők és a felület mechanikai és anyagi minőségének meghatározására, a különbségekre, és ezeknek a bondolhatóságra való hatására. TDK dolgozatomban ezen vizsgálatokról szólok.

A kutatás és az elvégzett vizsgálatok eredményei iparban felmerült kérdéseket is megválaszolnak.

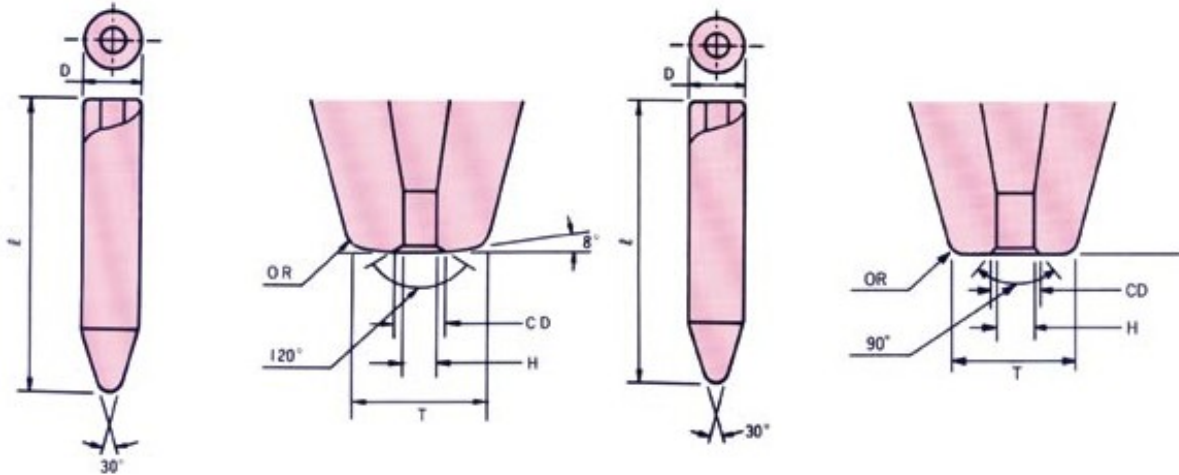
A termoszonikus mikrovezeték [1]

Aranyvezetékek termoszonikus kötése során az átlagosan 25 µm átmérőjű aranyvezeték kapilláris segítségével a félvezető tokozatlan integrált áramkörök felületén fém rétegből kialakított kontaktusfelületekre nyomóerő, ultrahangos rezgés és a beültetett chip melegítése segítségével rögzítjük. A vezeték másik végét pedig hasonló módon, a hordozóra erre a célra képzett megfelelő kontaktusfelületekre kötik. Az így kialakított kötés kiváló mechanikai és elektromos tulajdonságokkal rendelkezik. Az ultrahangos energiát a hőhatással először 1970-ben Alexander Coucoulas kombinálta. A tokozatlan integrált áramkörök bekötését ma már szinte kizárólag arany vezetékes termoszonikus gömbös kötésekkel végzik (1. ábra). Ilyenkor az első kötetést hívjuk gömbösnek (ball bond) az íves vezeték után képzett második kötetést pedig ékesnek. (Angolszász szakirodalomban a stitch, crescent, vagy tail bond megnevezést használják, a szerszámot tekintve kifejezetten ékes kötésnél a wedge bond az elterjedt.) Esetenként lehet találkozni az ékes-ékes megoldással is. A korábban használt termokompressziós vezetékötésnél a hordozóra beforrasztott vagy ragasztott tokozatlan chipet a hordozóval együtt 180-250 °C-ra felmelegítik, majd az aranyvezeték képzett gömböt a kapilláris kizárólag erőhatás segítségével rögzíti a forró chip kontaktusfelületeire. Ennél az eljárásnál a mechanikai és elektromos kapcsolatot, kötetést a hő és a nyomóerő alakítja ki. A termokompressziós eljárásához képest a hőmérséklet itt jóval alacsonyabb (125-175 °C), így a hőre érzékenyebb chippek is bekötődnek, illetve kevésbé kell tartani egyéb alkatrészek (tokozás, lapkaragasztás, laminált felületek) sérülésétől. A bondolási idő is kisebb, 10 ms-os nagyságrendű. Az ultrahangos energia segít a felületi szennyeződések, oxid rétegek és védőbevonatok eltávolításában, a részt vevő anyagok – a vezeték és a kötés felület – egymáshoz kötésében.



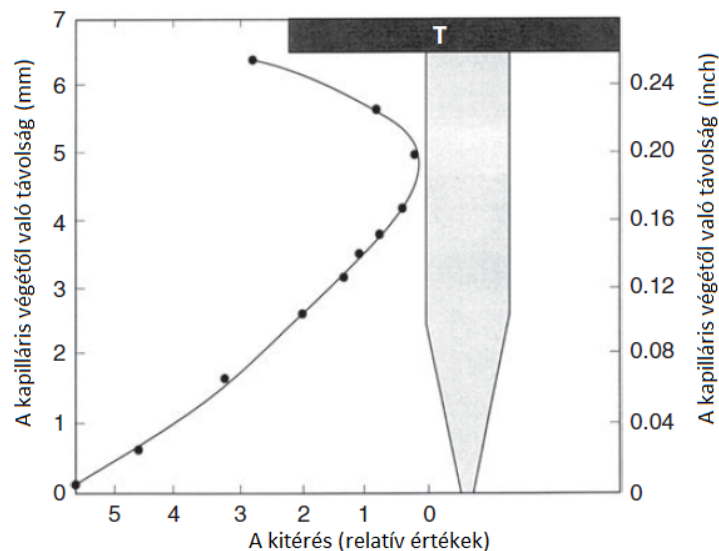
1. ábra A gömbös kötés. (1) A gömb formázása elektrosztatikus kisüléssel. (2) A vezeték visszahúzása a kapillárisba. (3) A gömbös kötés kialakítása nyomás, hő és ultrahangos rezgés segítségével (bump). (4, 5) Az eszközfej elemelkedése, hurokformázás, a kapilláris pozícióba hozása az ékes kötéshez. (6) Az ékes kötés kialakítása a 3-as lépéshez hasonlóan. (7) A vezeték elszakítása, egy kötés ciklus vége.

A huzal végi golyó kialakítása kezdetben hidrogén-gázos szúrólánggal történt, ma már elektrosztatikus kisülést alkalmaznak. A kötés formázásának meghatározó résztvevője a kapilláris (2. ábra). Hossza (l) 11 mm körüli, belső átmérője (H) a huzal átmérőjével megegyezik, anyaga kerámia. A kapilláris fölött helyezkedik el a huzalszorító. Fontos szerepe van a kötési ciklus végén történő elszakításban, amikor is az eszköz zárva van [1, 3].



2. ábra Termoszonikus és termokompressziós kapilláris.

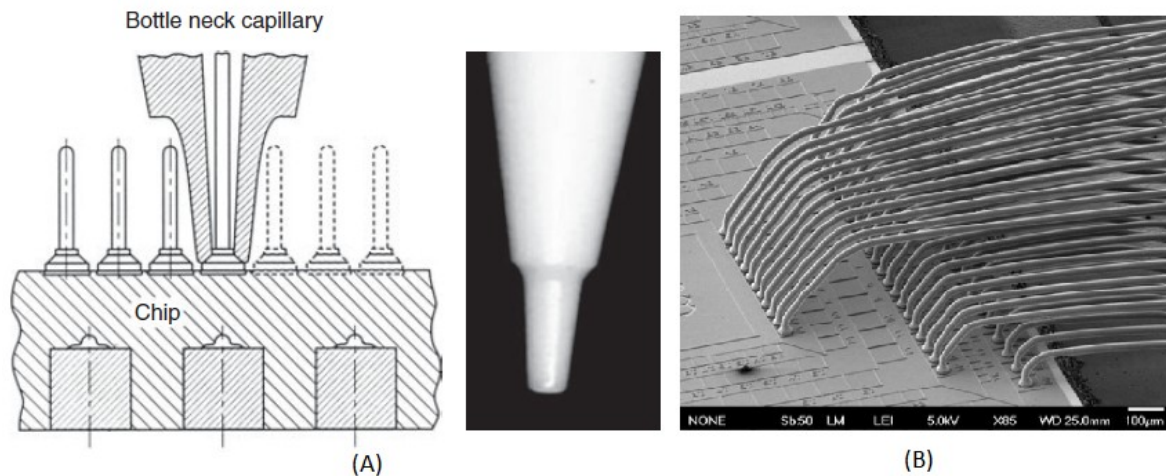
A kapillárison (ultrahangos ékes kötés esetén az éken) a kötési ciklusban mechanikai állóhullámok alakulnak ki (3. ábra). A hullámforma és a rezgési csomópontok (azon helyek a kapillárison, ahol a szerszám kitérése nulla) helye függ a terheléstől, a kötés kialakítása közben használt nyomóerőtől. A terhelt szerszám hegyének a kitérése kisebb, mint terheletlen esetben. Elmondható, hogy ez a kitérés (terhelt és terheletlen esetben egyaránt) 1-2 μm az 1 mil-es (25 μm -es) huzallal dolgozó golyós illetve ékes berendezések esetén.[1].



3. ábra Terheletlen hullámforma egy kerámia kapillárison. T: a ormány vége. A frekvencia 60 kHz. (A kapacitív mikrofonnal végzett vizsgálat relatív értékeket szolgáltat.)

Volt olyan időszak, mikor a csökkenő méretek és a növekvő alkatrész sűrűség okozta finom raszterosztású (fine-pitch) áramkörök tervezése szempontjából, az ékes kötés alkalmazását találták a tökéletes eljárásnak. A '90-es évek vége felé a padméret elérte a 90 μm -t. A golyós

kötés, ami körülbelül háromszorosa volt az ékesnek, robusztussága miatt nem felelt meg az elvárásoknak. Ma már a tökéletesített anyagok, mérnöki fejlesztések lehetővé teszik ennek a megoldásnak az alkalmazását is. A finom raszterosztású bondolás a huzalkötés legdinamikusabban fejlődő területe. Jelenleg a raszterávolság 30-35 μm . Ekkora méretek különleges szerszámot igényelnek. Az úgynevezett palack nyakú (bottle neck capillary, 4. ábra) kapillárist az ilyen finom műveletek elvégzésére használják. Kialakítása miatt nem sérti meg a szomszédos kötések. A huzal átmérője nagyon finom raszterosztás esetén akár 15 μm is lehet, a golyó átmérője nem sokkal haladja meg a huzalét. [1, 3, 5].

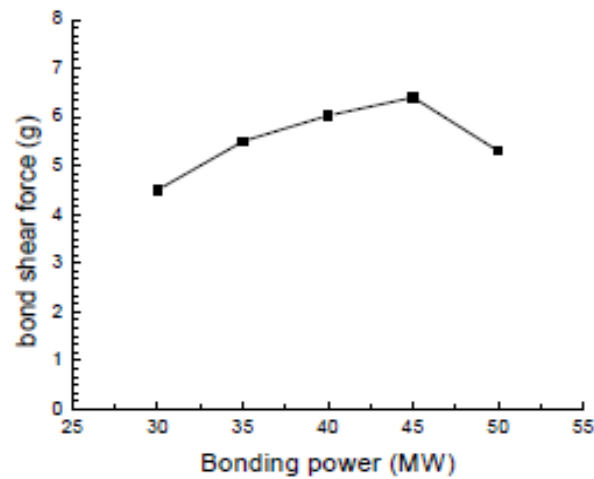


4. ábra (A) A palack nyakú kapilláris. (B) Finom raszterosztású (fine pitch) kötések. A golyós kötések átmérője 40 μm .

Termoszonikus arany huzalkötés paramétereinek vizsgálata

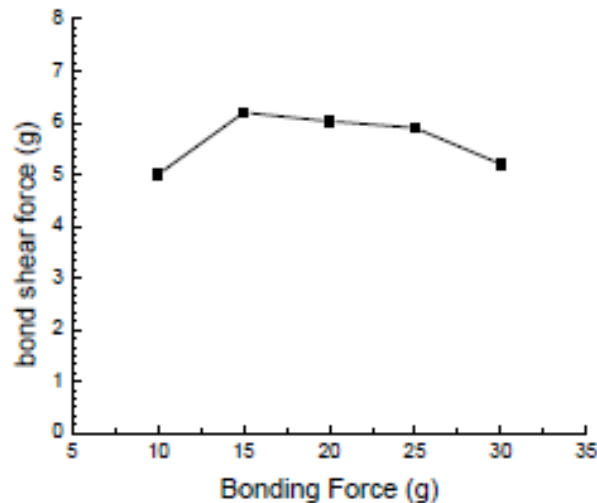
A kötés kialakítás négy legfontosabb paramétere: az ultrahangos teljesítmény, a nyomó erő és a nyomás időtartama és a hőmérséklet. Ez utóbbi ideális értéke a többihez képest tág határok között mozoghat. A gyártás során zónás fűtést alkalmaznak, az értékek 125-220 $^{\circ}\text{C}$ között változnak. A kötések megbízhatóságának egyik jelentős vizsgálati módszere a nyírás. Ezt a minőségi jellemzőt a letoló erővel írjuk le (BSF = Bond Shear Force).

A teljesítmény növelésével nagyobb felületközi hőmérsékletet érhetünk el, ami növeli a két anyag atomjainak egymásba irányuló diffúzióját, ezzel javítva a kötetést. A letoló erő egy bizonyos határig növekszik (50 mW) majd letörik, miközben a forraszgolyó egyre nagyobb deformáción megy keresztül. Ez végül könnyen a huzal nyaknál történő törését is okozhatja, de mindenképpen csökkenti a szakító erőt (5. ábra) [3].



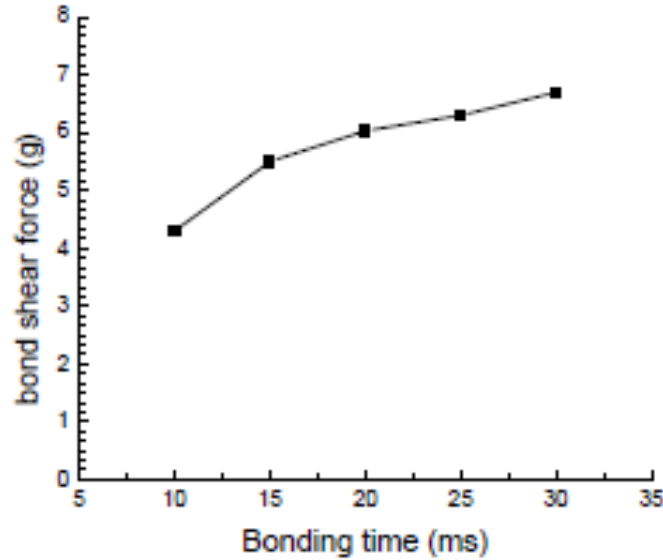
5. ábra A letolási erő a kötési teljesítmény függvényében.

A nyomó erő növelése nagyon hasonló hatást vált ki a deformáció szempontjából, de itt a letörés nem olyan hirtelen következik be. 0,15-0,20 N (15-20 g) között a nyomó-letoló erő függvény meredeksége pozitívból negatívba vált, ahogy azt a grafikon (6. ábra) is szemlélteti. Ennek oka vélhetően az, hogy a nagy nyomó erő olyan mértékben leszorítja a golyót, hogy az ultrahangos rezgés nem fejt ki rá akkora hatást, hogy a megfelelő kötés kialakulásához szükséges hő a súrlódásból, és a deformációból felszabaduljon [3].



6. ábra A letoló erő a kötési nyomóerő függvényében.

Érdekes jelenséget tapasztalunk a nyomás idejének növelésével. Az idő-letoló erő függvény növekvő tendenciát mutat (7. ábra). A kötési felület a vizsgált tartományban jelen esetben is nő, de 10-30 ms között 70 μm -ról 75 μm -re. A diffúzióhoz az atomoknak hosszabb idő és nagyobb felület áll rendelkezésükre, és így erősebb kötés alakul ki [3].

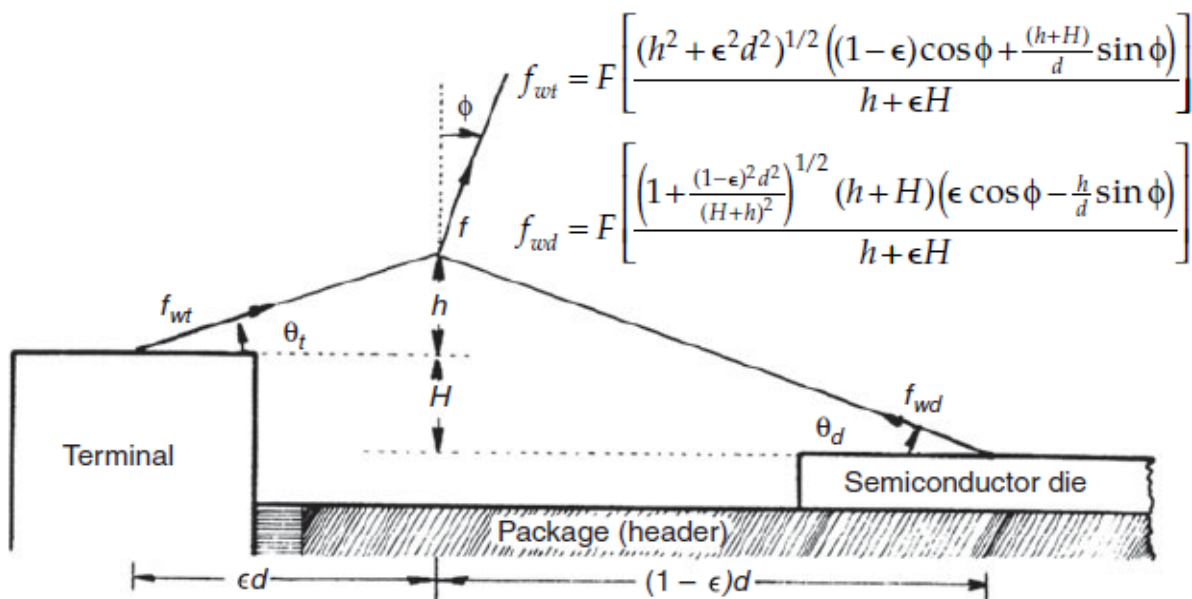


7. ábra A letolási erő a kötési idő függvényében.

Mikrohuzal-kötések minősítése

A destruktív felhúzó teszt

A felhúzó teszt a legáltalánosabban elfogadott kötés minőségellenőrzési eljárás. Hasonló módszereket alkalmaztak már az 1960-as évek előtt is hegesztett, illetve forrasztott huzalozásokhoz. A hurok húzása egy arra alkalmas méretű kampóval történik. Az húzalerő nagyságát számos tényező befolyásolja (8. ábra) [1].

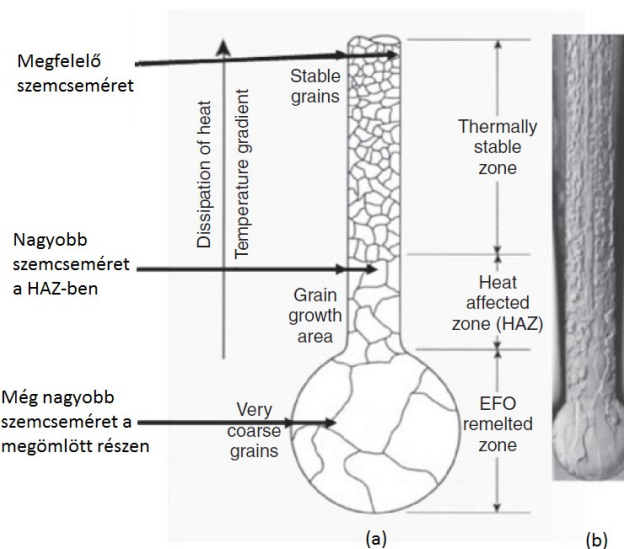


8. ábra A pull teszt mechanizmusa és a huzalban ébredő erők.

Ha a szintkülönbség a két pad között nulla ($H=0$) és a hordozóra merőleges ($\Phi=0$) hatásvonalú erőt fejtünk ki pontosan a huzal hurok felénél ($\varepsilon=0.5$, $\theta_t=\theta_d$), akkor az egyenletek a következő összefüggéssé egyszerűsödnek:

$$f_{wt} = f_{wd} = \frac{F}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2h}\right)^2} = \frac{F}{2 \sin \theta}$$

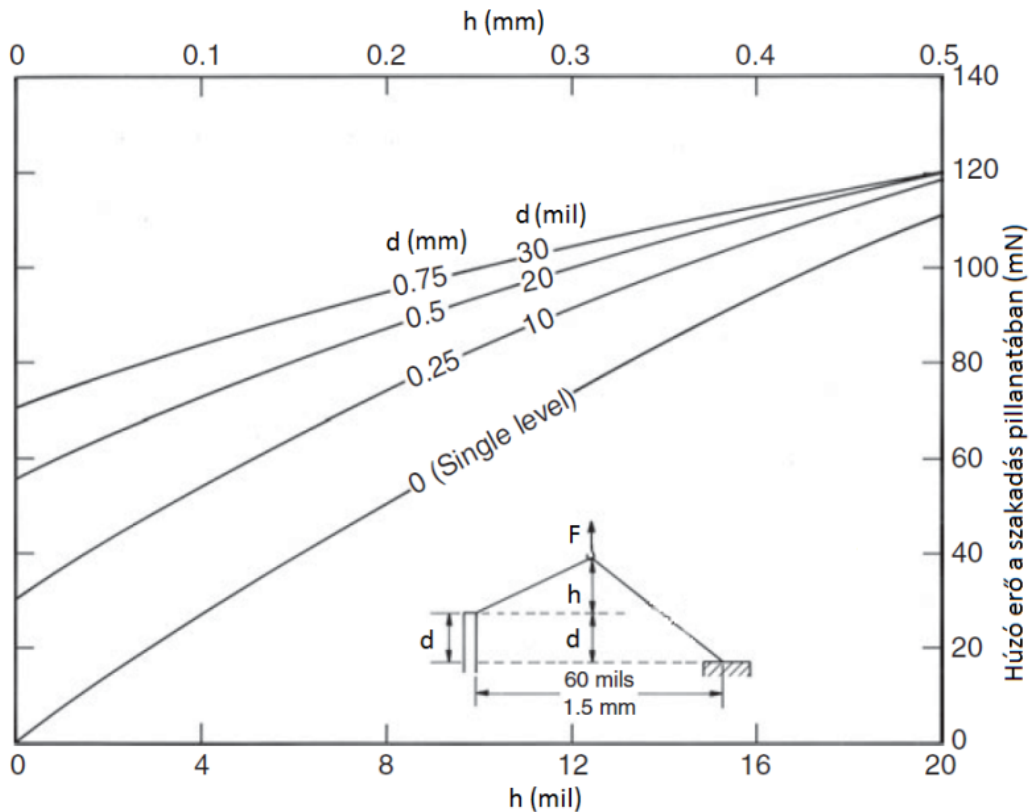
A huzal elszakadás pillanatában fellépő F húzóerő ismeretében f_t és f_d értéke a geometriai paraméterek segítségével egyértelműen meghatározható. Ezek az értékek általában alumínium ékes kötés esetében a huzal gyártó által specifikált terhelhetőségének 60-75 %-a, arany bondolásnál (golyós és ékes kötés) viszont közel 90 %-a. Golyós kötés vizsgálatánál a szakadás legtöbbször a golyó nyakánál következik be. Ez az úgynevezett Heat-Affected-Zone (HAZ) következménye (9. ábra). A golyóformálás következtében a huzalt hőhatás éri. Ennek mértéke akkora, hogy a kialakított golyóban, és e fölött egy rövid régióban az anyagban újrakristályosodás jön létre. Emiatt ez a rész mechanikailag kevésbé lesz ellenálló, keménysége 20 %-kal kisebb, mint a huzal többi része. Hideg megmunkálással a hurok formázás során lehetőség van a szilárdsága növelésére. Amikor a kapilláris felemelkedik a golyós kötésről, a második kötéshez képest először ellenkező irányba mozdulva (reverse motion) mechanikai megmunkálásnak teszi ki a HAZ-t, amitől az a kristályszerkezetben megnövekvő diszlokáció sűrűség növekedése hatására elkezd felkeményedni. Ezzel a kézenfekvő trükkkel, különböző adalékolásokkal, illetve a zóna minimalizálásával együtt is ez a leggyengébb, legsérülékenyebb szakasza a golyós kötésnek.



9. ábra (a) Vázlat a szemcseméret változásáról a huzal keresztmetszetében a golyókialakítás után. (b) Marószerszel kezelt huzalban a kristályszemcsék.

A legtöbb szabvány (MIL-STD-883G/H, ASTM F459-06) a középponti kampó elhelyezést írja elő. Ez a beállítás jól alkalmazható ékes kötések ellenőrzésére (10. ábra). Finom raszter osztású golyós kötések esetén viszont a kis θ szög miatt a golyó felválhat a hordozóról. Ugyan ezt a jelenséget tapasztalhatjuk két ékes kötés esetén is, ha a kampó helyzetét a középpontból jelentősen kimozdítjuk. Ebben az esetben, ha a kampó túl közel kerül az egyik ékhez, az f erők aszimmetrikus felosztása miatt, a közeli éken az említett felhámilást,

felszakadást tapasztalhatjuk. Ha a kötés hajlamos a jelenségre, kisebb szakítóerőt tapasztalunk [1].

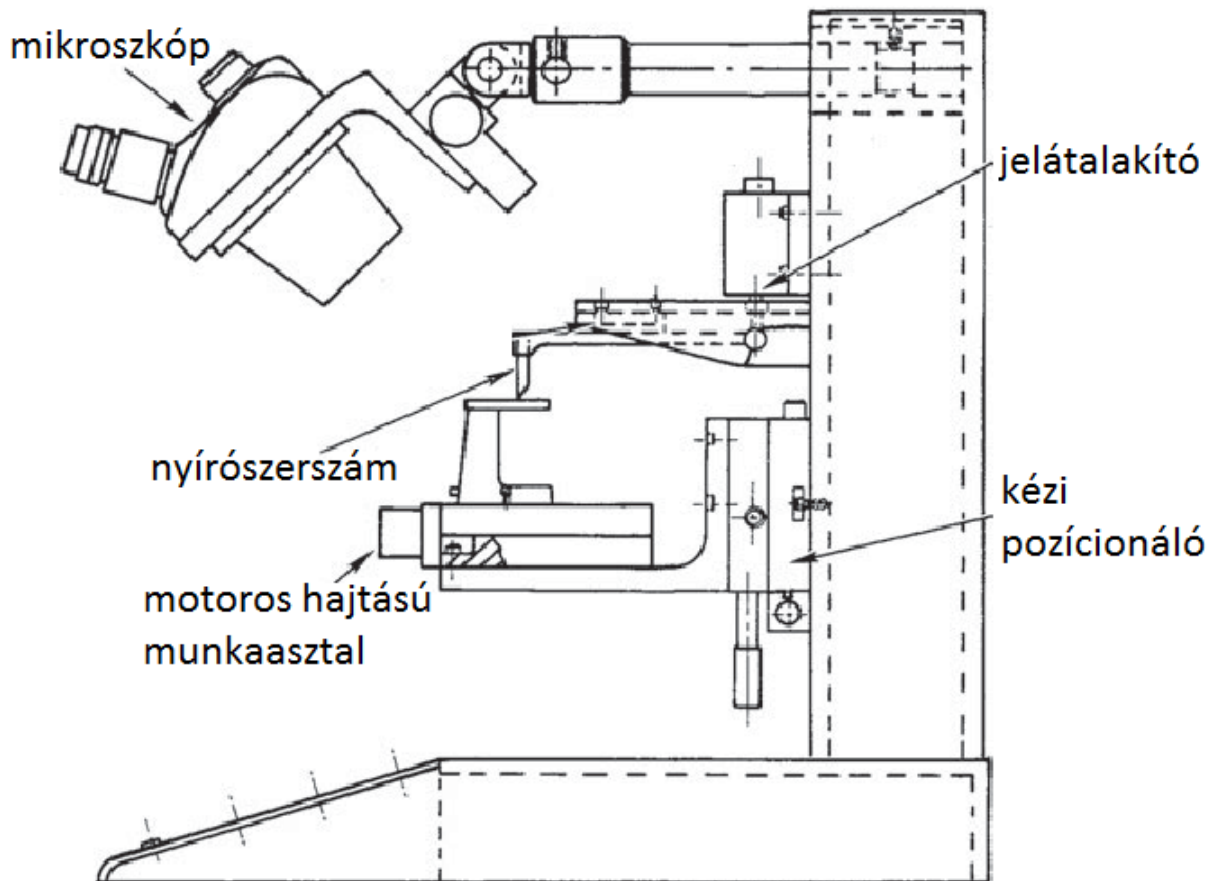


10. ábra Az F szakítóerő függése a szintkülönbségtől és a hurok magasságától. Ha a két pad távolságát csökkentjük, csökken a hurok magassága (h), ezáltal csökkennek a θ szögek, ami megnöveli az adott F húzóerő által a huzalban ébresztett erőket (f_t , f_a). Tehát a hurokmagasság növekedésével a szakítóerő nő.

A destruktív golyós kötés letolási vizsgálat

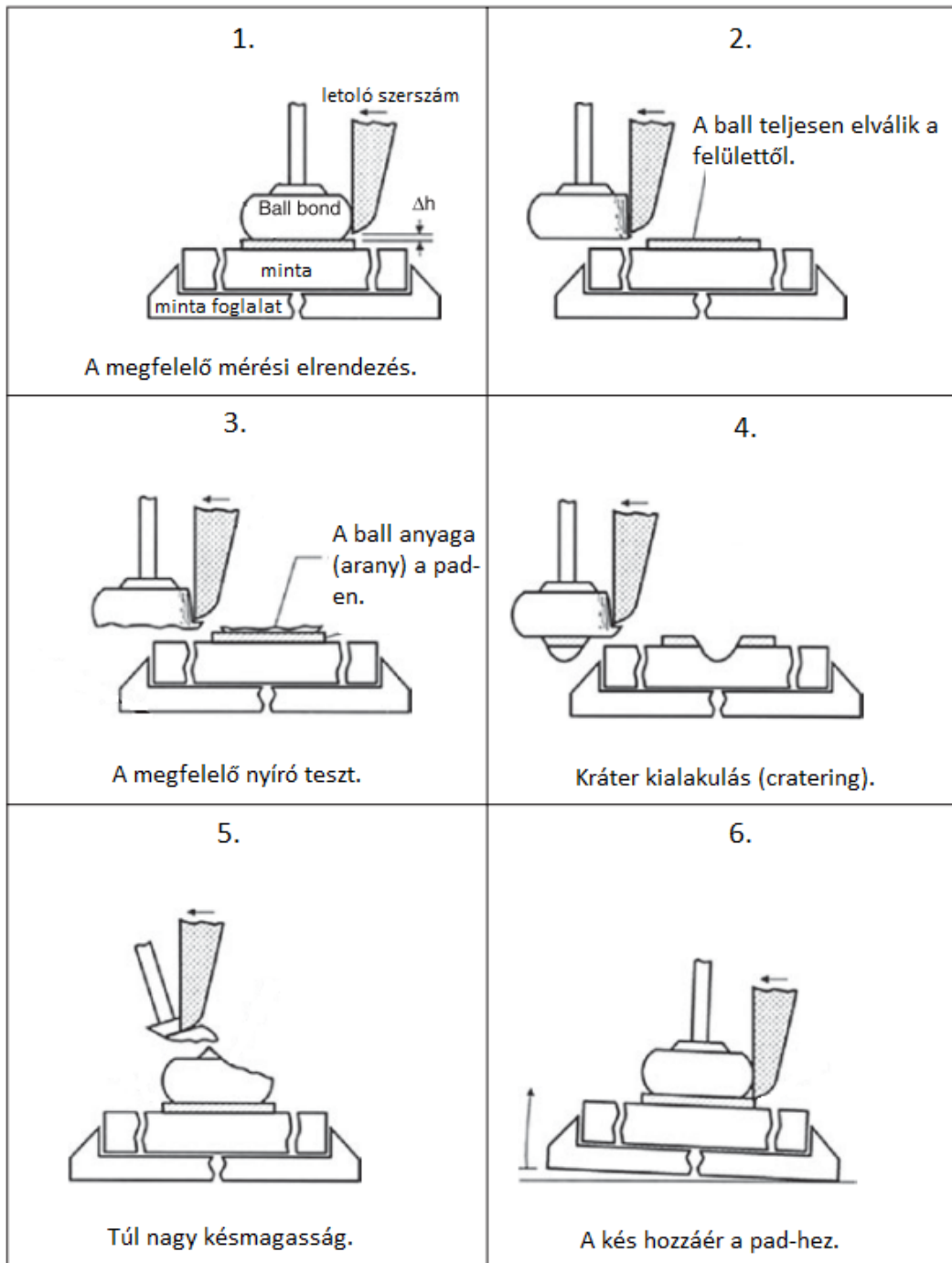
A felhúzó teszt az ékes-ékes kötések vizsgálatára alkalmasnak bizonyult. Ezzel az eljárással viszont a golyós kötések minőségéről nem kapunk megfelelő képet, mivel a huzal a golyó felválása előtt elszakad a HAZ-nál. A legtöbb információt a golyós kötésekről a letoló teszt szolgáltatja. A módszert 1967-ben vezették be, de csak később vált általánosan elfogadottá a mikroelektronikai gyártásban [1].

Egy kezdetleges letoló berendezésen (11. ábra) mérés közben a letoló szerszám pozíciója fix volt, a szabályozott mozgást a munkaasztal végezte. A mai készülékeken ez a szerep felcserélődött. A vizsgálat legfontosabb paraméterei a letolás sebessége és a szerszámfej magassága. A korszerű vizsgáló eszközök a magassági pozicionálást automatikusan elvégzik.



11. ábra A letoló erőt mérő berendezés (ball-bond shear tester).

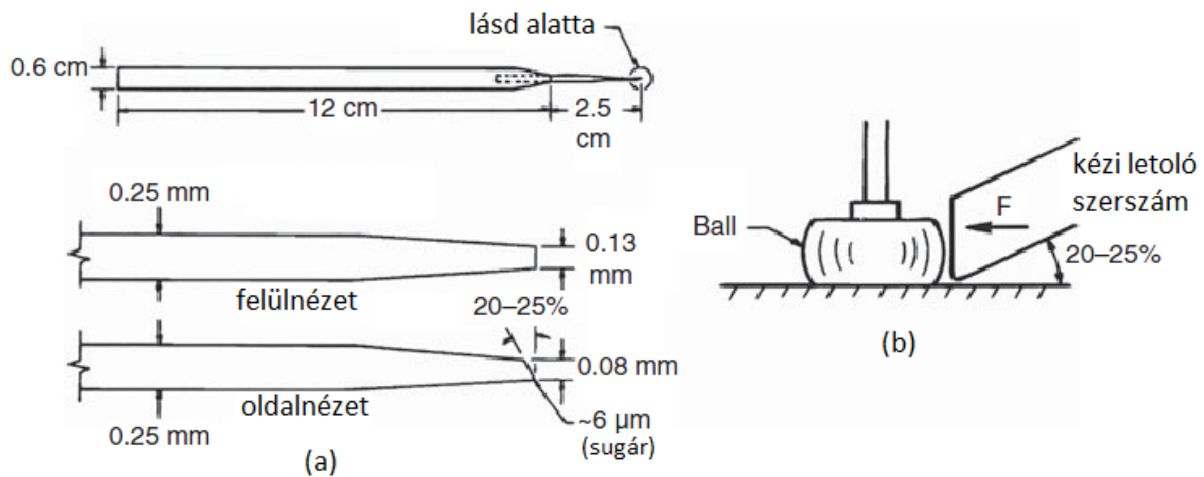
A szerszámfej és a hordozó közötti rést a golyó méretéhez kell beállítani, amit a huzalkötő gép befolyásol. Általában a távolság 2-5 μm , nagy golyóknál 13 μm -nél nem nagyobb. A letoló kés tisztán tartása nagyon fontos az ennyire finom beállítást igénylő folyamatoknál. Az elvárt és a nem megfelelő teszt eredményeket az 12. ábra szemlélteti [1]. 12. ábra.1: A megfelelő mérési elrendezés. 12. ábra.2: Hiba, ha golyó nyomtalanul felválk a pad-ról. A kötés nem tudott kialakulni, rossz gépbeállítás (force, power) okozhatja. 12. ábra.3: A megfelelő eredmény ha, a golyó letolás után nyomot hagy a pad-en. 12. ábra.4: Hiba, ha a golyó a pad illetve a hordozó anyagával együtt szakad fel. Ilyenkor nem a kötés minőségéről kapunk képet. 12. ábra.5: Hiba, ha a letoló kés túl magasan halad, mert könnyen elkenheti az aranyat, ezzel értékelhetetlenné téve a mérést. 12. ábra.6: Hiba, ha a letoló kés hozzá ér a hordozóhoz. A hordozó egyenetlensége, nem vízszintes beállítása is okozhatja.



12. ábra A letoló vizsgálat lehetséges kimenetelei.

Manuális letolás

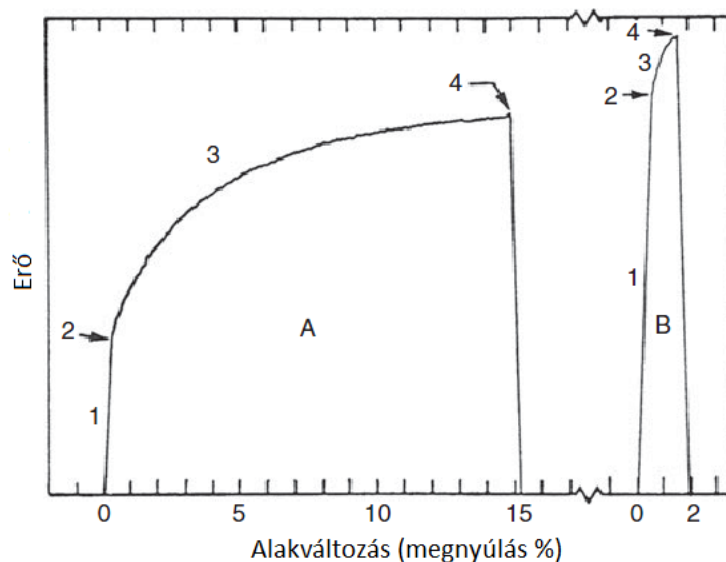
A gépi eljárás mellett laboratóriumi körülmények között, a nem túl finom raszterosztású kötéseknel gyakran alkalmazzák a kézi letoló vizsgálatot. Ennek eszköze egy finoman megmunkált, speciálisan kialakított hegyű tű (13. ábra) [1]. Jól használható 1.3 mil-nél (33 μm) nagyobb átmérőjű vezetékeknél. A teszt kvantitatív adatokat nem szolgáltat, viszont kézi huzalkötő gépek gyors beállítását segítheti.



13. ábra A kézi letoló szerszám vázlata (a) és használat közben (b).

A non-destruktív felhúzó teszt

A non-destruktív felhúzó teszt (14. ábra) során a hurkot nem szakítják el, az erőt egy adott mértékig növelik. Ez a határ a huzal folyáshatára. E fölött irreverzibilis alakváltozást szenved az anyag, a teszt során ennek elkerülésére kell törekedni [1]. A modern pull teszter berendezések képesek non-destruktív üzemmódban is működni. Előre beállított maximális húzó erőt fejt ki a hurkokra.



14. ábra A non-destruktív pull teszt. A és B két különböző anyag. 1. Rugalmas alakváltozás. 2. Folyáshatár. 3. Irreverzibilis alakváltozás. 4. A minta (huzal) elszakad.

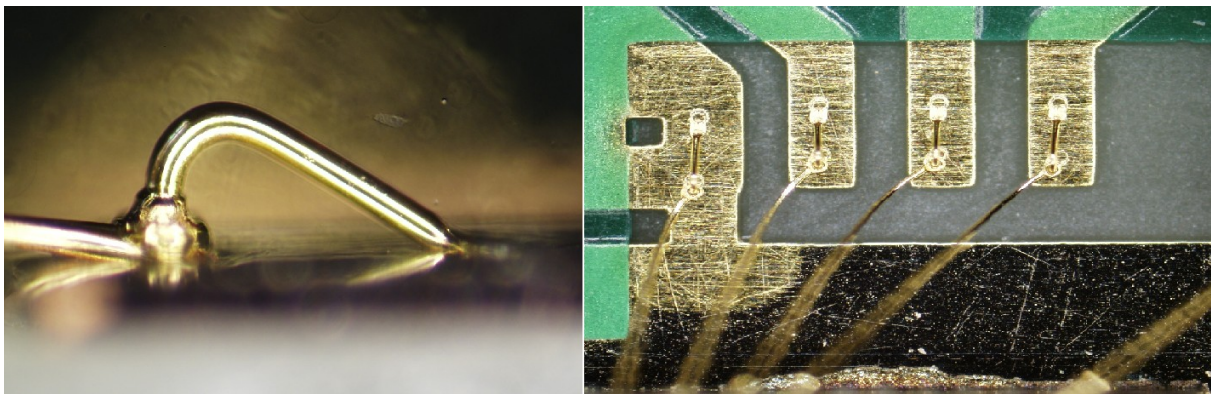
Jelenleg különleges felhasználású alkatrészekben, műholdakban, űrszondákban és beültethető orvosi eszközökben (pacemaker) lévő kötések ellenőrzésére alkalmazzák. Üzemekben vevői reklamációs darabok ellenőrzésére, nagy sorozatgyártások statisztikai vizsgálatára (Statistic Process Control) megfelelő.

A non-destruktív golyós kötés letolási vizsgálat

Vizsgálatok kimutatták, hogy a golyót a destruktív nyíró erő körülbelül 75 %-ával lehet terhelni, mert ekkor még nem következik be a végleges nyíróerő leromlása [1]. A teszt lassú, költséges és nem ad több információt, mint a destruktív változata. Nagy hátránya, hogy a mintadarab felülete a nyíró szerszám pozicionálása közben könnyen megsérülhet. Ez a finom raszter osztású alkatrészeknél a kis méretek miatt nagyobb valószínűséggel történhet a passzíváló rétegen, meggátolva a minta további alkalmazhatóságát.

Minőség javító speciális kötések

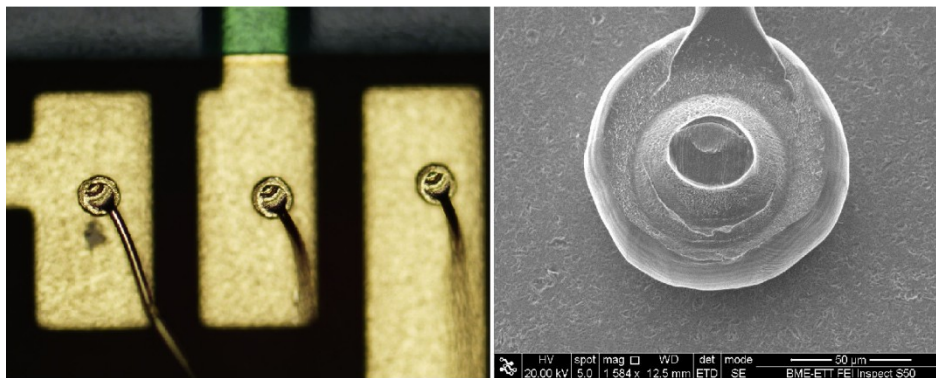
A kötések minőségét speciális eljárásokkal javíthatják. A klasszikus, pusztán golyós-ékes kötések minőségét safety bond, touch-down bump és under bump alkalmazásával növelik. Ezek a megoldások a kisebb felületen érintkező ékes kötések biztosabb rögzítését szolgálják. A safety bond (15. ábra) egy kisebb méretű golyós-ékes hurok, aminek a golyós kötését a megerősíteni kívánt ékes kötésre teszik. Ha a golyót rosszul pozicionálják (túlságosan a huzalra teszik) gyengítheti az áramkörü szempontról funkcionális kötés. Touch-down bump-nál (16. ábra) a gép a PCB pad-jére letesz egy golyós kötés nagy teljesítmény beállítás mellett, amitől az képlékenyebbé válik, jobban szétterül. Ezt követően a kapilláris 150-200 μm -t eltávolodik és egy hurkot képezve leteszi az ékes kötés a golyóra. Erre a golyóra kerül a szilícium chip felől jövő hurok ékes kötése. Az under bump (17. ábra) lényegében egy HAZ-nál elnyírt golyó amire ékes kötés tesz a gép. Ennek a fordítottja is javít a kötés minőségén. Ekkor a golyót helyezik rá az ékes kötésre. A bump kialakítása történhet úgy is, hogy a huzalszorító zárásával és a kapilláris emelésével a huzal elszakad a HAZ-nál. (Zárás előtt a kapilláris emelkedésével lehet biztosítani az elegendő huzal hosszát a következő golyóformázáshoz.) Több bump-ot egymásra ültetve egy stack formációt kapunk. Ezekkel az eljárásokkal készülhetnek flip-chip-ek bump-jai, vagy a TAB (Tape Automated Bonding = szalagkivezetéses) technológia során a szalagkivezetések rögzítéséhez használt bump-ok is.



15. ábra A safety bond oldal- és felülnézetből.



16. ábra (A) A touch-down bump. (B) A touch-down bump-ra kötött stich bond.



17. ábra Az under bump optikai- és elektronmikroszkópos képe.

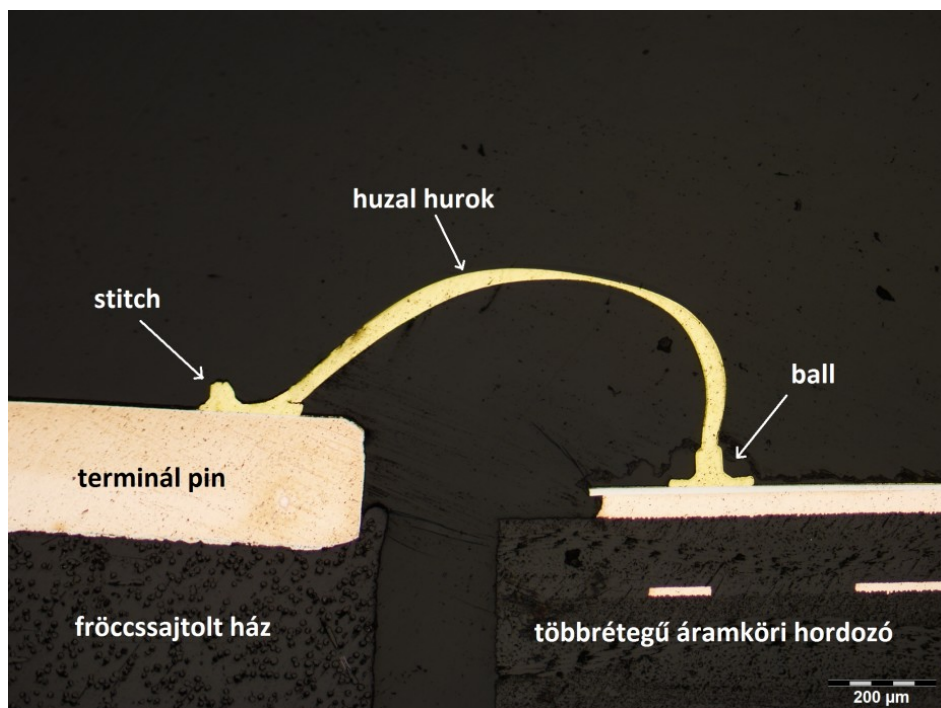
A problémafelvetés

Az arany mikrohuzalkötéseknek a különböző szabványok előírásain kívül a magas vevői követelményeknek is eleget kell, hogy tegyenek. Olyan geometriai paramétereknek mint a golyó átmérő, a nyakmagasság, vagy a hurokmagasság, adott alsó és felső határok közé kell eszenek, miközben a kötéseknél a húzalszakító (pull-up) és letoló (shear) teszteken is meg kell felelniük. A húzalszakító tesztek során egy kampóval felfelé húzzuk a hurkot, a letoló mérés során egy szerszámmal a golyós és az ékes kötéseket oldalsó irányból megtámasztva próbáljuk letolni a felületről. A hosszú követelmény lista mellé szerencsére számos, általunk ellenőrizhető és szabályozható paraméter párosul. Ezért, hogy optimális paraméter beállításokkal tudjunk dolgozni kialakítva a mechanikailag és esztétikailag is megfelelő kötést, a probléma több irányból is megközelíthető. Befolyásoló környezeti tényezők a hőmérséklet, a páratartalom illetve a gyártótér levegőjének a tisztasága, és nem szabad megfeledkeznünk az anyagparaméterekről sem, akár a huzalra, akár a felületre vonatkozóan. Esetünkben ez utóbbira, a kötésfelület minőségére szorítkozunk.

Kézzelfoghatóbbá téve a kérdést, nem elég hogy a golyós és ékes kötések vizsgálatánál magas letoló-erő értéket kapjunk, igyekeznünk kell, ezt minél alacsonyabb gépparaméter érték beállításokkal érjük el, különben a nagy nyomóerő a golyót nagyon ellapítja, az

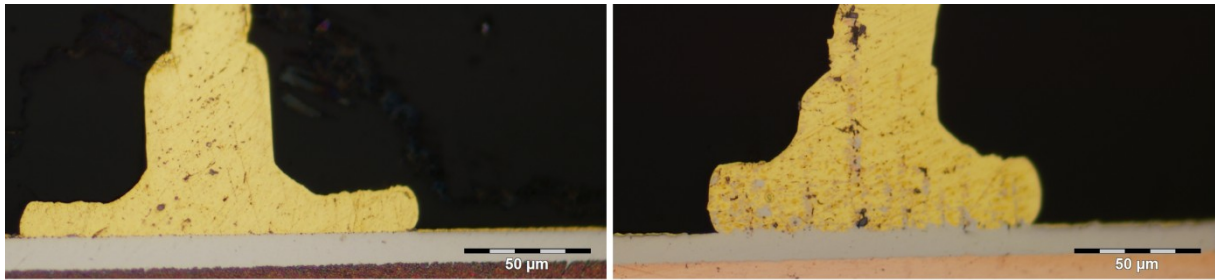
ultrahang jobban megterheli a nyakat (a mikrovezetők golyóhoz legközelebbi szakaszát), ami a továbbiakban hamarabb bekövetkező szakadáshoz vezethet, mellyel csökken a termék élettartama.

A vizsgálatot autóelektronikai szenzorok ún. terminál pinjein kialakított mikrovezetőkön végeztük. Terminál pineknek nevezzük a moduláramkör tokozóanyagába ágyazott fém kontaktusfelületeket, melyeket a tokozatlan félvezető alkatrészeket is tartalmazó nyomtatott huzalozású FR4-es hordozón kialakított pad-ekkel mikrovezetőkkel kötünk össze. Itt a huzalkötés a beültetett alkatrészeket tartalmazó nyomtatott huzalozású hordozó lap és a moduláramkör házának elektromos összekötését szolgálja. A bondolási folyamat első lépéseként a huzalkötő berendezés egy bumpot helyez a ház pinjére, majd erre rögzíti az áramköri hordozóról indított golyós kötés másik végén található ékes kötés (stitch bondot) (18. ábra). Ez a technika olyan megfontolásokat kíván, melyek a belső integrált áramkörök bekötésénél nem voltak szükségesek. A moduláramkörök megbízhatóságának vizsgálatára hivatott hősokk tesztek (thermal shock test, TST) során a hurkok a ball-ok felett, a nyakuknál elgyengülnek, feltehetően a ház és a hozzá ragasztott áramköri hordozó hőtágulások okozta mechanikai terhelés miatt. Ha a vezeték nyaka már a gyártás során jelentős terhelésnek van kitéve, a további dinamikus terhelés hamarabb vezet töréshez.



18. ábra Egy terminál hurok keresztmetszeti csiszolata. A huzal mindenütt 37,5 µm (1.5 mil) átmérőjű, a felső ív látszólagos elvékonyodása a csiszolás pontatlanságának a következménye.

Tehát összefoglalva a kérdést, nem elég hogy magas letoló-erő értéket kapjunk, igyekeznünk kell, ezt minél alacsonyabb gépparaméter értékek beállításával és alkalmazásával elérni (19. ábra), különben a nagy kötési nyomóerő a golyót nagyon ellapítja, az ultrahang jobban megterheli a nyakat, ami a továbbiakban hamarabb bekövetkező szakadáshoz vezethet. Ezért az egyik legfontosabb szempont a megfelelő felület biztosítása a könnyebb tapadás érdekében.



19. ábra Magas (bal oldali kép) és alacsony (jobb oldali kép) paraméterekkel készített ball. A képeken jól látszik, hogy a bal oldali jobban ellapul a nagyobb terheléstől. Mindkét kötés megfelel az előírásoknak.

Noha az általam vizsgált terminál pin-ek bevonata különbözik az áramköri hordozók bondolási felületétől, a fent tett megállapítások rájuk is egyaránt érvényesek. A vizsgálat tárgyát kétféle terminál pin képezi. Mindkét minta ENEPIG (Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold, a későbbiekben még szó esik a technológiáról) réteggel bevont réz szalag, a különbség köztük, annyi hogy az egyikben az arany rétegvastagsága specifikáció szerint kisebb. Feladatomban a rétegvastagságok megállapítása, majd bondolhatósági szempontból szakvélemény készítése volt a kétféle felület alkalmazhatóságára. A specifikációban megadott értékek a vastag aranyréteggel fedett felületre: Ni minimum 760 nm, Pd minimum 120 nm, Au minimum 20 nm; a vékony aranyréteggel fedett felületre: Ni minimum 750 nm, palládium 20-150 nm, arany 3-100 nm.

Különböző bondolható felületi fémezések, rétegszerkezetek

Hibrid moduláramkörök esetében a felületszerelt, általában vezető ragasztóval ragasztott chipok elektromos kontaktálása gyakran közvetlenül a hordozóra történik. A hordozó (általában FR4 (epoxi-üvegszövet) vagy kerámia alapú lemez) kontaktus felületeinek a kialakítása optimális esetben egyszerre alkalmazkodik a huzalkötés és az SMT (Surface Mount Technology = felületszerelési technológia) illetve THT (Through Hole Technology = furatszerelési technológia) szerelés feltételeihez. Ez esetben az FR4 alapú, többrétegű, réz vezetőkezelésű nyomtatott huzalozású lemezek (PCB = printed circuit board) kontaktusfelületeivel foglalkozunk, elsősorban az arany mikrovezetők tekintetében.

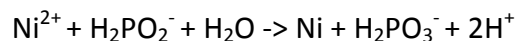
Az arany mikrovezetőkötést a chipen az erre a célra kialakított, általában alumínium, vagy alumíniumot nagy mennyiségben tartalmazó Al-Ti-Si ötvözet, illetve rétegszerkezeten hozzuk létre. Erre a felületre kerül a golyós kötés, a ball. A nyomtatott huzalozású hordozó kontaktusfelületein stitch bond-ot hoznak létre, esetlegesen valamilyen biztonsági technika (safety bond, under-, over bump) kíséretében. Szintén alkalmaznak termoszonikus arany mikrovezetőkötést a PCB lap és az áramköri modul tokozásán található kivezetők kontaktálásánál, ez alkalmazás függő, a kis teljesítményű áramkörökre jellemző. Ilyen esetben a kötés két, különböző felületi bevonatokkal ellátott réz alapú vezetőt köt össze.

Az arany huzal kötésénél a felületi oxid réteg és a szennyeződések döntően befolyásolhatják a megfelelő kötés kialakulását. A réz levegőn gyorsan oxidálódik, rontja a forrasztás mellett a bondolhatóságot is. Ezt a negatív tulajdonság valamilyen felületi bevonattal kiküszöbölhető, a forraszthatósági, bondolhatósági paraméterek javíthatók. Felületi réteggé gyakran alkalmazott anyag a nikkel, a palládium és az arany. A rétegfelvitelre több eljárás létezik. A legelterjedtebb módszerek a galvanizálás, az árammentes és immerziós rétegfelvitel. A két

utóbbinak előnye a galvanizálással szemben, hogy nem igényel drága fotolitográfias maszkolási és maratási eljárást, akkor kerülnek felvitelre mikor már a forrasztásgátló maszk eltakarja a vezetékezéseket. Elterjedt rétegszerkezet a nikkel/arany, nikkel/palládium, nikkel/palládium/arany struktúra. A szabad levegőn szintén gyorsan oxidálódó nikkel réteg nehezen bondolható, viszont megvédi az alatta lévő, kisebb keménységű rézet a mechanikai behatásoktól, így egy stabil felületet biztosít a huzalkötés számára is. A nikkelre felvitt palládium és arany réteg, esetenként mindkettő megfelelően bondolható felületet biztosít. Az említett két inert, illetve nehezen oxidálódó elem felületi oxid réteget nem vagy alig képez. Az aranyat a palládium további védelme miatt alkalmazzák. A palládiumra történő aranyhuzalkötésről számos értekezés született. Mindben megállapításra került, hogy a tiszta Pd felület az arannyal kiváló minőségű, tartós kötést létesít. Az anyagok között nem alakul ki intermetallikus vegyület, így a tartósan magas (150 °C) hőmérséklet nem rontja a mechanikai szilárdságot, nem alakulnak ki zárványok a kötés alatt. Ez extrém magas hőmérsékletre (400-500 °C) nem érvényes, viszont ennyire szélsőséges körülmények nem alakulhatnak ki integrált áramköri alkalmazásokban [1, 4].

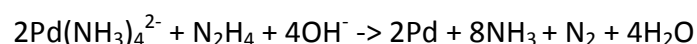
ENIG/ENEPIG struktúra [1]

Az arany mikrohuzalkötésnél kedvelt felület az ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold) és az ENEPIG (Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold) rétegszerkezet. Az árammentes nikkel felvitelére egy savas tisztítási lépéssel kezdődik, mely során eltüntetik a felületi szennyeződéseket, és oxid réteget. Ez után a rézre egy vékony palládium réteget visznek fel a későbbi nikkelezés katalizátoraként. A nikkelezés egy összetett vegyületelegy hatására megy végbe. A folyamat egyszerűsített kémiai egyenlete a redukáló szerként alkalmazott hipofoszfittal a következő:

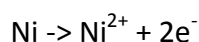


Mennyiségétől függően a folyamat meggyorsítását elősegítő foszfor a nikkel rétegbe beépülve módosíthatja annak fizikai tulajdonságait, mechanikai szilárdságát. A felület érdességét a rétegnövekedés befolyásolja. Lassabb növekedés mellett egy simább felület, nagyobb sebesség mellett egy érdesebb felület alakul ki, aminek a profilját a következő rétegek vastagságuktól függően lekövetik.

A palládium réteget elsősorban költséghatékonyság céljából az arany helyett kezdték el alkalmazni. Nagy sűrűsége miatt kiváló diffúziós záróréteggé funkcionál. Alkalmazzák a nikkellel alkotott ötvözetét is. Az egyszerűsített kémiai reakció a redukáló szerként alkalmazott hidrozinnal:



Az immerziós arany rétegekialakítás egy önlimitáló galvanikus folyamat. A nikkelre lerakódó Au^+ ionok helyet cserélnék az Ni^{2+} ionokkal.

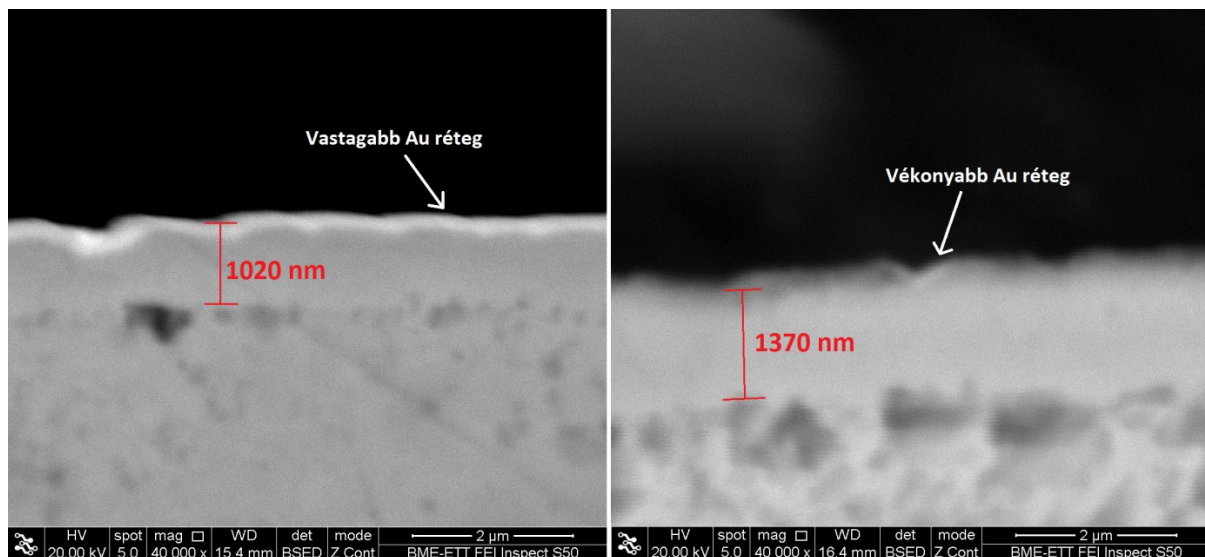


A folyamat addig tart, amíg az arany réteg vastagsága el nem ér egy bizonyos értéket. ENIG-nél ez 0,2 μm , ENEPIG-nél 0,05 μm körüli, a két elem méret- és tömegbeli különbsége folytán. Az eljárás során ügyelni kell a rétegnövekedés sebességére. Ez az immerziós Au fürdő összetételével szabályozható. A túl gyors Ni leválás porózus felületet hozhat létre, illetve visszamaradó Ni szemcséket az Au rétegben, ami később a levegővel érintkezve oxidálódhat. Mindkét jelenség rontja a felület bondolhatóságát. Az immerziós arany porózusságát a nikkel és az arany atomok közötti méretbeli különbség is okozhatja. Mivel a nikkel atom átmérője 86 %-a az arany atoménak, ezért a felépülő arany rétegben maradhatnak vakanciák. Az immerziós aranyréteget árammentes eljárással vastagíthatják. Ez egy puhább (soft gold), jobban bondolható, megbízhatóbb felületet eredményez.

Az egyes felületi rétegvastagságok megállapítása

Rétegvastagság mérés keresztmetszeti csiszolaton

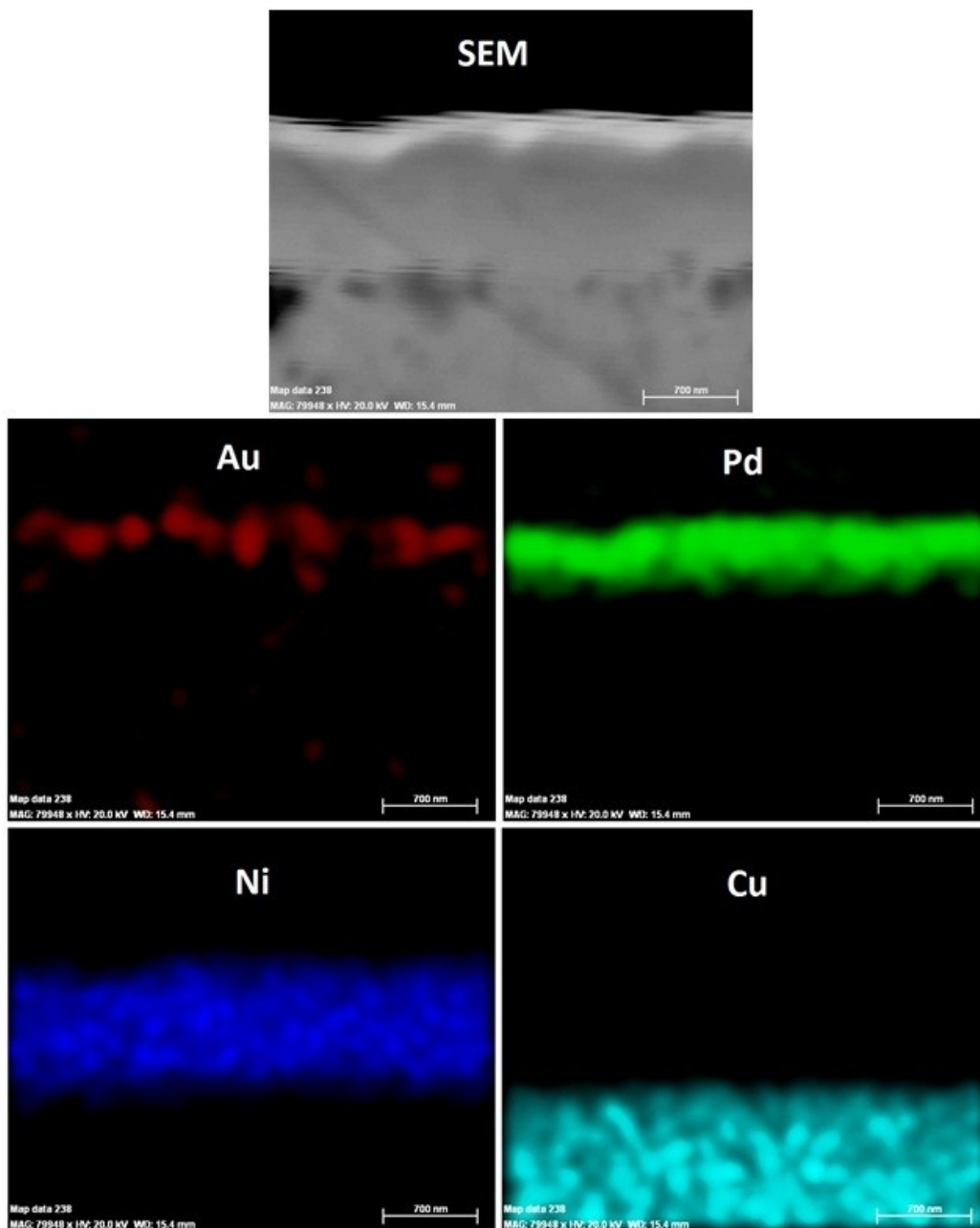
A kapott minták vizsgálatát nagy nagyítású optikai mikroszkóppal kezdtem. Keresztmetszeti csiszolatokat készítettem, viszont a mikroszkópos felvételeken a vastagságok nem mérhetőek, mivel az Au és Pd réteg az 1 μm alatti tartományba esik. Az elkenődő fémek okozta bizonytalanság is befolyásolhatja a mérést, viszont ezt megfelelő polírozással kompenzálni lehet. A darabokat elektronmikroszkóppal vizsgáltam tovább (20. ábra). A három réteg együttes vastagsága a nagyobb nagyításnak köszönhetően mérhető, 1020 nm és 1370 nm (10 ponton mért értékek átlaga). Viszont az Au/Pd és Pd/Ni határokat ezzel a módszerrel nem lehet megállapítani. Az elektronmikroszkópos felvételeken a világosabb területek mindig egy nagyobb rendszámú elem jelenlétére utalnak, tehát a felső felületen látható fehérebb réteg az arany-palládium, alatta a nikkel, majd a kivezető tömbi anyaga (lyukacsosnak látszik), a réz.



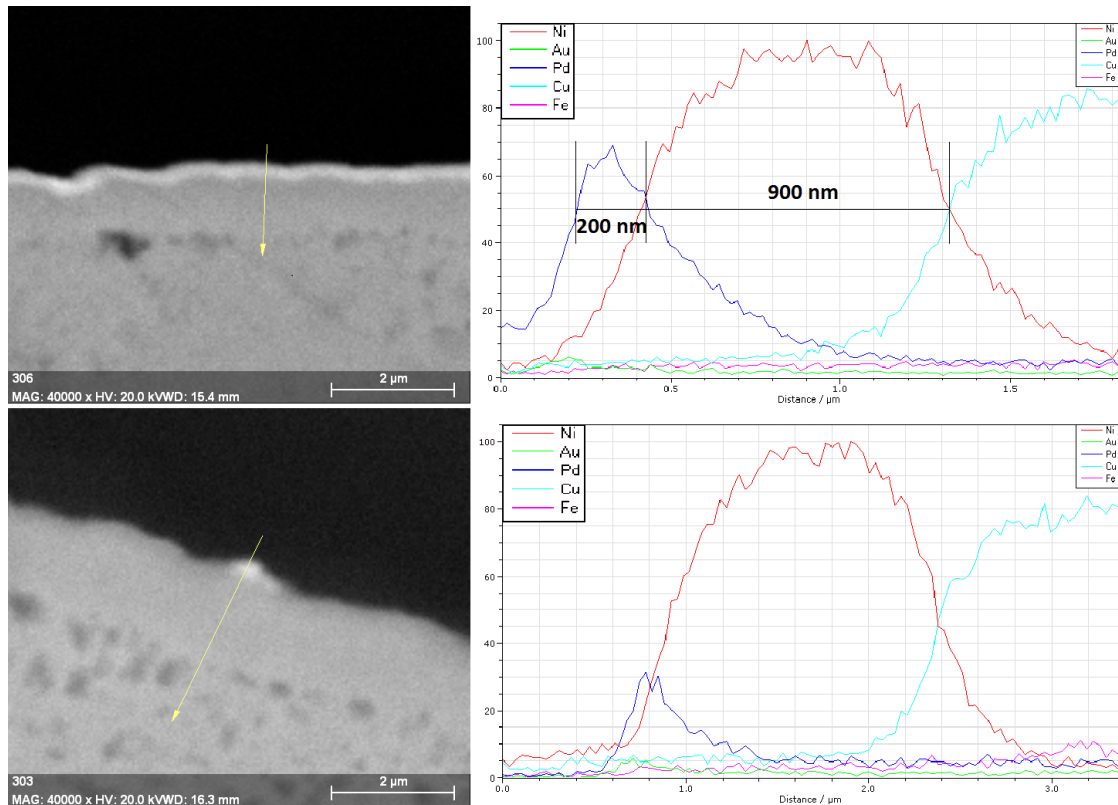
20. ábra A vastag és vékony Au réteggel fedett minták elektronmikroszkópos képei.

Az elektronmikroszkóppal lehetőségem volt a keresztmetszet elemtérképét (21. ábra) és vonalmenti anyagösszetételét vizsgálni (22. ábra). Látható, hogy az aranyréteg valóban nagyon vékony, folytonossága meg is szakad a csiszolatkészítéskor történt elkenődés miatt, a palládiumréteg igen kifejezetten jelentkezik.

A vonal menti anyagvizsgálat során, még ha el is tekintünk a rétegek összemosódásától, a grafikonon minden esetben átfedések lesznek, mert egy körfelületből mintavételezünk. Tehát az így „látott” felületen egyszerre több réteg is jelen lehet. Érdekes szemügyre venni a Ni/Cu átmenetet ahol a két görbe az 50-es magasságban metszi egymást. Ilyenkor a vizsgálóablak éppen a két réteg határán van. A vastag aranyréteges mintára a vizsgálat nagyobb nagyításnál történt, ezért a vizsgáló ablak a valós méretekhez képest kisebb volt, így szemléletesebb képet adva a rétegszerkezetről. A méretekről kevésbé, de a rétegszerkezet struktúrájáról jó képet ad a vizsgálat. pl. az arany vékony rétegben van a felület legkülső részén, és fokozatosan csökkenve „olvad bele” a palládiumrétegbe. a palládiumréteg kifejezett határokkal rendelkezik, mennyisége az adott mélységtartományon belül viszonylag állandó. Az arany a rézréteg megjelenésekor tűnik el véglegesen, viszont a palládium az arannyal is fokozatos átmenetet képez.



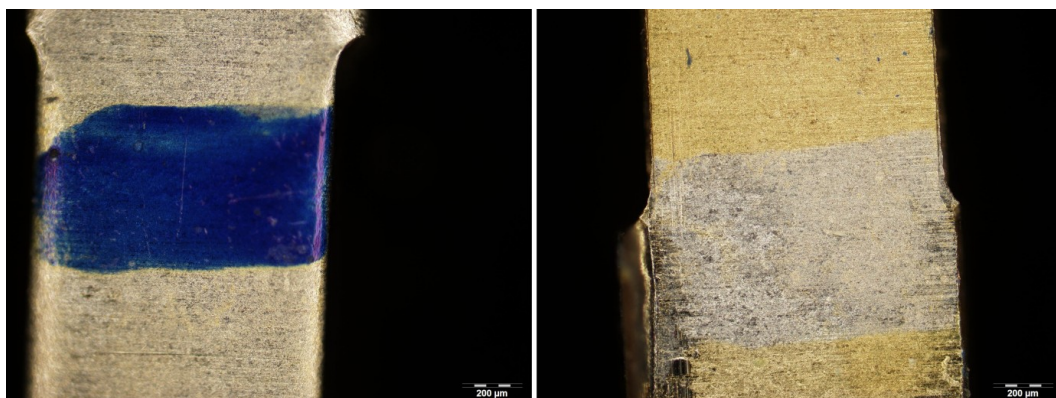
21. ábra A vastag aranyréteggel bevont minta elemtérképe. Az egyes ábrákon a méretvonal 700 nm



22. ábra Vonalmonti anyagvizsgálat a két mintán.

Rétegvastagság mérés maszkolva maratott felületen

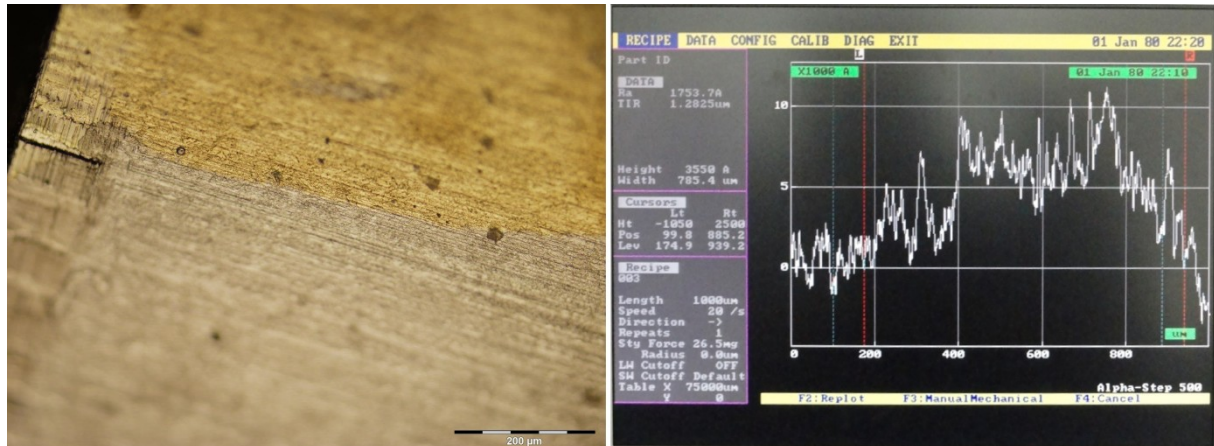
A következő kísérlet során a Ni/Pd/Au réteggel borított pinek aranyvastagságát más módszerrel, szelektív maratási eljárással próbáltam meghatározni. Szelektív arany maró szerként lugol oldatot használtam. Az oldat keverési aránya: $KI : I_2 : H_2O = 4 \text{ g} : 1 \text{ g} : 40 \text{ ml}$. A darabokon néhány keresztirányú sávot lakkfilccel maszkoltam, majd maratás után a maszkot izopropil-alkohollal leoldottam (23. ábra).



23. ábra A maszkolt és maratott pinek. (Balra a maszkolással, jobbra a maszk leoldása után.)

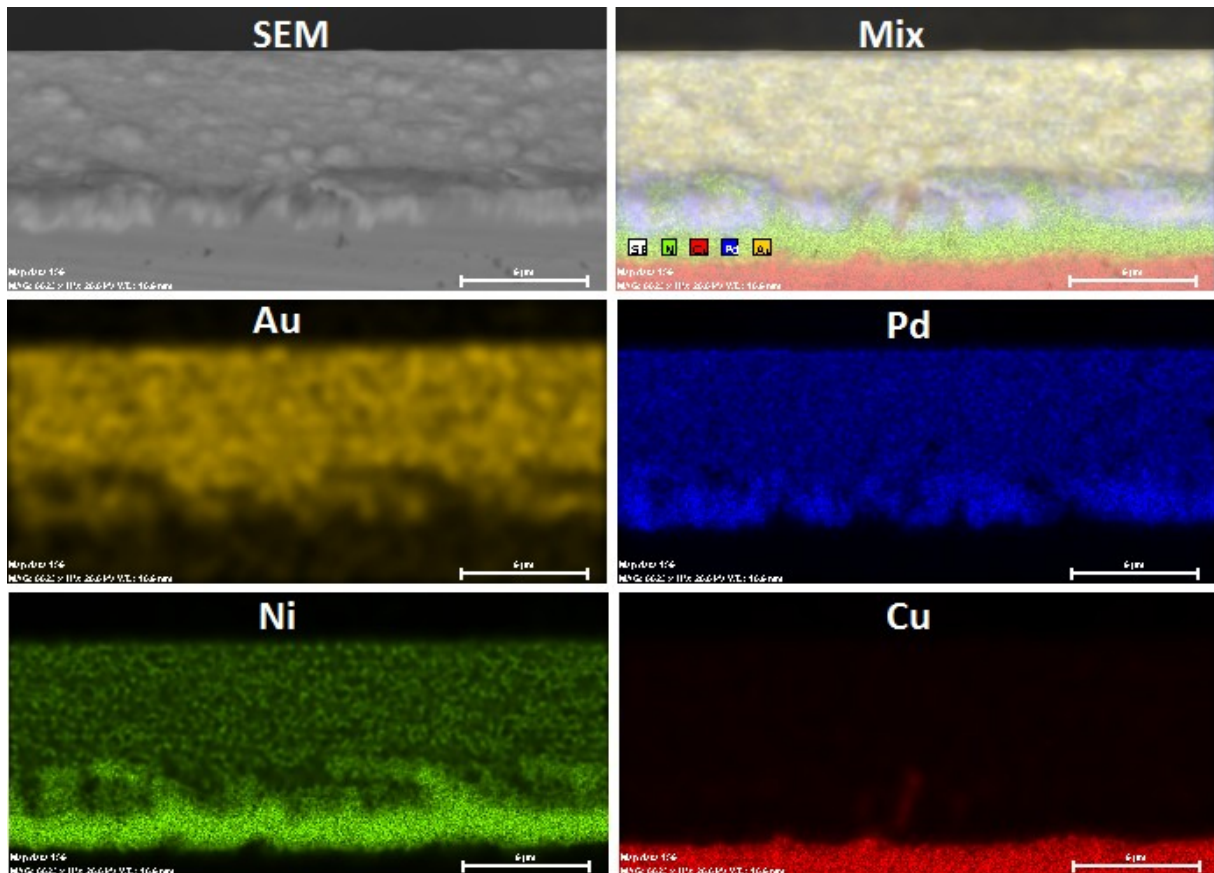
A mintákon az Alpha Step felületi profilvizsgáló berendezéssel végeztem méréseket. A maszkolt és a maratott felszín határán nem észleltem ugrást a nagy felületi érdesség miatt. Várhatóan a vastagabbik arany réteg vastagsága $0.1 \mu\text{m}$ körüli, ami az 24. ábra alapján a felületi profil maximális kitérésénél ($7 \mu\text{m}$) egy nagyságrenddel kisebb. Ez az érdesség a tiszta

réz lemez hengerlésekor kerül a felületre. Utólag felvitt rétegek vastagságuktól függően simíthatják a profilt. A vizsgálatot a vastag arany réteges mintákra végeztem el, a kapott eredmények alapján a vékony arany réteg vizsgálatára a módszert alkalmatlannak találva nem végeztem el a méréseket.



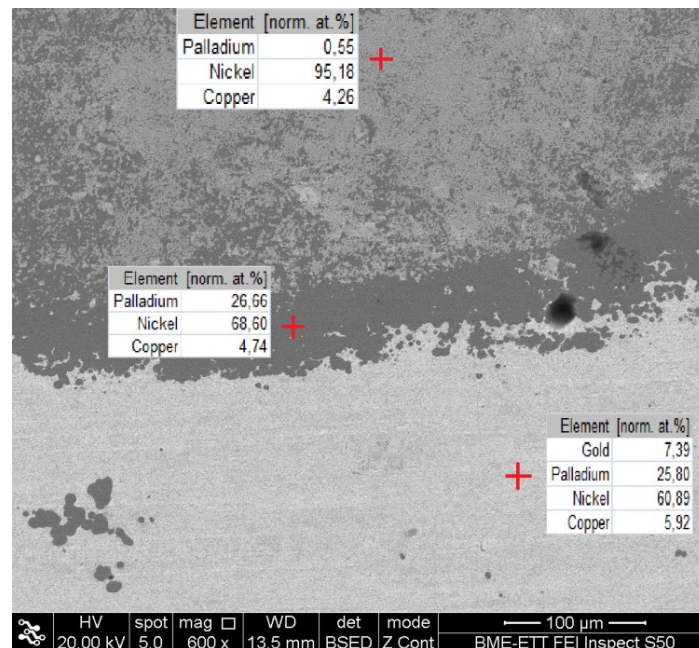
24. ábra A vizsgált felület és az Alpha Step grafikonja. Az optikai mikroszkópon is láthatóak a keresztirányú bordák.

A maratott pineket elektronmikroszkóppal is megvizsgáltuk. Elemtérképet készítettünk az egyik csiszolt végéről olyan nézetben, hogy a felületre is rálátásunk legyen (25. ábra). A felületen látható 1-2 µm átmérőjű szemcsék valószínűleg a nikkel szemcsék, ilyen a Ni réteg topológiája; a specifikáció szerint sem a palládium, sem az arany vastagsága nem esik ebbe a tartományba.



25. ábra Az elcsiszolt pin keresztmetszete és felülete.

A maratott és maszkolt felület határán készített anyagvizsgálat és elemtérkép kimutatta, hogy a lugol oldat kellően hosszú idő után a palládiumot is leoldja, és felszínre kerül a nikkel réteg (26. ábra).



26. ábra A lugol oldattal kezelt felület határa.

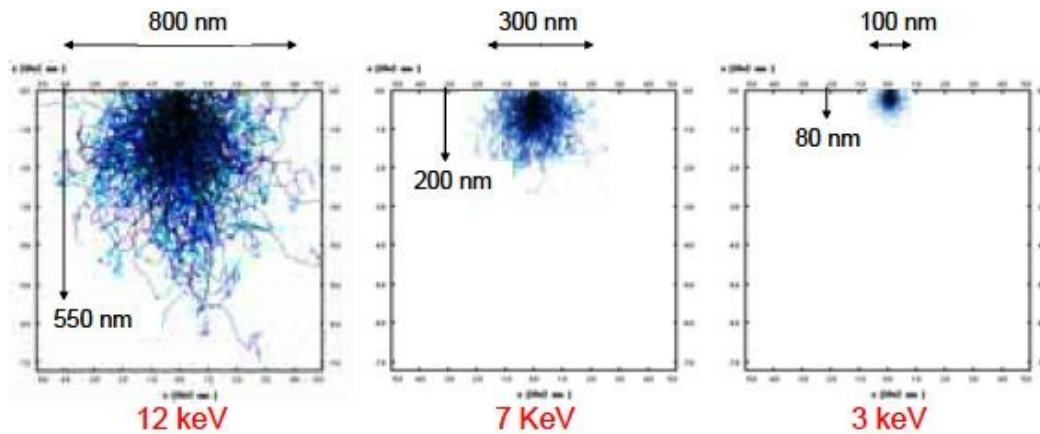
Az elektronmikroszkópos felvételen a világosabb felület az arannyal, a sötét a palládiummal, a köztes szürke a nikkellel fedett. A táblázatok a vörös keresztekkel jelölt helyeken detektált elemek atomszázalékait tartalmazzák, a pontszerű elemösszetétel mérések alapján határoztuk meg a képen látható rétegek anyagát.

Elmondható, hogy a maratás segítségével jól láthatóvá tehető a felületi rétegszerkezet, a módszer alkalmas a rétegek minőségi meghatározására. A rétegvastagságok számszerű meghatározásához viszont további mérések, módszerek kipróbálása szükséges.

Pásztázó elektronmikroszkópos rétegvastagság mérés

A vizsgálatra kapott kétféle arany rétegvastagságú ENEPIG minták tényleges, számszerű rétegvastagságára voltunk kíváncsiak. Keresztmetszeti csiszolatokon elektronmikroszkóppal láthatóvá vált a rétegszerkezet, viszont a csiszolás során elkenődött puha arany és a palládium pontos vastagságát nem tudtuk meghatározni. A vizsgálatokat a tanszéken található FEI Inspect S50 pásztázó elektronmikroszkóppal végeztük.

A pásztázó elektronmikroszkóppal lehetőségünk van a mintadarabon pontszerű anyagvizsgálatra. Az elektronokkal bombázott felületről detektálni lehet a felület anyagaira jellemző karakterisztikus röntgensugárzást. A gyorsító feszültségtől és a felület anyagától függően 100 nm – 2 µm-es mélységből kaphatunk információt (27. ábra).



27. ábra Szemléltető ábra az elektronmikroszkóp pontszerű anyaganalíziséről. A gyorsító feszültség növelésével egyre nagyobb térfogatból mintavételezünk, mélyebben lévő rétegeket detektálhatunk.

Az ábrán a grafikon négyzet alakú területe a vizsgált tömbi anyagot jelenti, a felső tengely a minta felszíne. Az elektronok becsapódási helye a felső tengely közepénél található. A minta anyagában az elektronok útja kék vonalakként látszik. Megfigyelhető, hogy kis gyorsítófeszültség esetén az elektronok mintába történő behatolásának mélysége kicsi, 80 nm-nyi. Az elektronok az anyagban a vizsgált tömbi anyag kristályszerkezetétől és kristályorientációjától függően különböző irányokba haladnak, tehát nem csak a minta felszínére merőlegesen, hanem oldalirányban is. Ezért a gerjesztett térfogatot (ahova az elektronok eljutnak) gömbszerűnek tekinthetjük. A gyorsító feszültség növelésével az elektronok nagyobb energiával rendelkeznek, így nagyobb sebességgel csapódnak be, és nagyobb mélységekbe képesek eljutni az anyagon belül. A gerjesztett térfogat az az anyagtérfogat, melybe az elektronok bejutottak és kölcsönhatásba léptek az anyag elektronjaival, atomjaival. A kölcsönhatások során különböző energiájú sugárzások, elektronok hagyják el az anyagot. Jelen esetben a berendezés a karakterisztikus röntgensugárzás segítségével határozza meg az anyagösszetételt (EDX mód, EDX = Energy Dispersive X-ray spectroscopy, energiadisziperzív röntgen spektroszkópia). A gerjesztett elektronok visszatérve alacsonyabb energiaszintű pályájukra, a gerjesztési energia és a pálya energia különbségét röntgenfotonok formájában kisugározzák.

Kanaya és Okayama a Bethe-Bloch formulából kiindulva felírt elméleti képlete becslést ad arra, hogy egy kizárólag egyféle atomot tartalmazó rétegből milyen mélyről kapunk információt (1. képlet). A képletben A a moláris tömeget (g/mol), E_0 a gyorsító feszültséget, ρ a sűrűséget (g/cm³), Z az atom rendszámát jelöli [7].

$$R(nm) = \frac{27,6 * A * E_0^{1,67}}{\rho * Z^{0,89}} \quad (1)$$

Az egyenletben szereplő $27,6A/(\rho Z^{0,89})$ tag minden elemre különböző állandót ad. Ez az érték mondja meg, hogy egy kívülről belőtt elektron számára az anyag mennyire áthatolható, mennyire sűrű. A képlet felírva aranyra, palládiumra és nikkelre, szembetűnő a különbség a három különböző méretű és tömegű elem között (2., 3., 4., képlet).

$$R_{Au}(nm) = 5,76 * E_0^{1,67} \quad (2)$$

$$R_{Pd}(nm) = 9,38 * E_0^{1,67} \quad (3)$$

$$R_{Ni}(nm) = 8,09 * E_0^{1,67} \quad (4)$$

Az összefüggés 5 keV és 30 keV gyorsító feszültség között érvényes. F. L. Ng méréseket végzett szilíciumra felvitt különböző vastagságú Al, Ni és Au rétegeken. Több mérést végzett különböző gyorsító feszültségekkel majd a rétegvastagság számításához tartozó gyorsító feszültséget a szilícium 5 atom %-os detektálószög rögzítette. (ábrák) Tapasztalatai szerint az így kapott értékeknek körülbelül 60 %-a volt a tényleges vastagság. Ezért az együtthatókat módosította, nikkelt esetében 9.38-ról 5.94-re, arany esetében 5.76-ról 3.36-ra, (alumínium esetében 28.24-ről 15.61-re) [7].

Réteges minták esetén a számítás bonyolódik. Léteznek Monte Carlo szimuláción alapuló programok a különböző rétegvastagságok becslésére, esetünkben viszont ezektől eltekintve pusztán a megfontolásokra hagyatkozunk. Először a vastagabb arany réteggel borított pineket vizsgáltuk. A gyorsító feszültséget kis értékről növeltük az egyes réteg határokig, az alsó réteg körülbelül 5 %-os láthatóságáig. Mivel csak közelítő becslést adunk és a láthatóság-gyorsítófeszültség görbe a kezdeti szakaszon viszonylag meredeken nő, nem szükséges mereven ragaszkodni az 5 %-hoz.

	4,5 keV	10,7 keV	20 keV
Element	[norm. at.%]	[norm. at.%]	[norm. at.%]
Gold	96,43	67,87	7,26
Palladium	3,57	30,38	26,64
Nickel	0,00	1,75	59,70
Copper	0,00	0,00	6,40
Sum	100,00	100,00	100,00

1. táblázat

A képletbe behelyettesítve a 4,5 keV-os gyorsítófeszültséggel mért adatokat (1. táblázat), az aranyréteg vastagsága 70 nm-nek adódik. A palládium réteg vastagságát a táblázat 10,7 keV-os oszlopából számoljuk. Közvetlenül a palládium rétegvastagságát nem tudjuk becsülni, viszont közelítést adhatunk a Pd/Au réteg együttes vastagságára. A módszer lényege, hogy a palládium és az arany atomokat egy köztes atommal modellezzük, melynek az F. L. Ng-féle egyenletben szereplő együtthatója az arany és a palládium együtthatóinak, mért atomszázalékos értékeikkel súlyozott átlaga (5. képlet).

$$R_{Pd,Au}(nm) = \frac{28,38*5,76+70,38*8,09}{28,38+70,38} * 10,7^{1,67} \approx 390 \text{ nm} \quad (5)$$

A két réteg együttes vastagsága tehát 390 nm, ebből a palládium 320 nm. Ugyanezzel a módszerrel számítjuk a nikkelt réteg vastagságát is, a táblázat 20 keV-os oszlopából (6. képlet).

$$R_{Pd,Au,Ni}(nm) = \frac{7,26*5,76+26,64*8,09+59,7*9,37}{93,6} * 20^{1,67} \approx 1300 \text{ nm} \quad (6)$$

A számítás szerint a nikkel vastagsága 910 nm. Optikai és elektronmikroszkópos felvételeken megállapítható, hogy a rézre felvitt ENEPIG réteg 1-1,5 μm vastag, tehát nem élünk az F. L. Ng által használt 60 %-ra történő csökkentéssel a számított vastagságértékeinkre. Ellenőrzésképpen alkalmaztam a súlyozott számítást F. L. Ng által vizsgált 100 nm Au és 100 nm Ni kettős rétegre. A rétegvastagsághoz tartozó gyorsítófeszültséget 9,5 keV-nál állapította meg. A számítás eredménye 325 nm, melynek 60 %-a 195 nm. Tehát a vastagság értéket jó közelítéssel visszakaptuk, ami megnyugtató a mi mérési eredményeinkre nézve.



28. ábra Az ENEPIG réteg optikai mikroszkópos felvételén.

Ugyanezt az eljárást alkalmaztuk a vékony aranyréteges mintára is. A mért értékek a 2. táblázatban láthatók.

	20 keV
Element	[norm. at.%]
Gold	0,37
Palladium	6,84
Nickel	89,14
Copper	3,65
Sum	100,00

2. táblázat

Először a három réteg együttes vastagságát számoljuk (7. képlet).

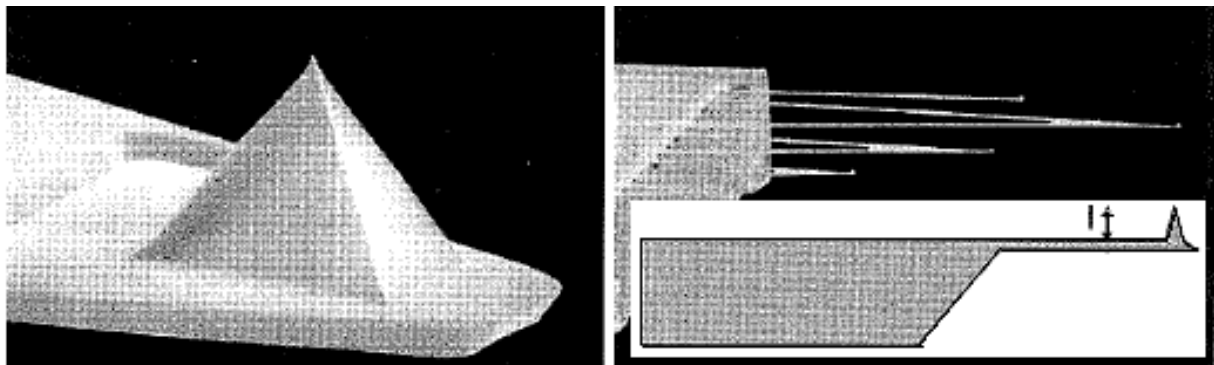
$$R_{Pd,Au,Ni}(nm) = \frac{0,37*5,76+6,84*8,09+89,14*9,37}{96,35} * 20^{1,67} \approx 1380 \text{ nm} \quad (7)$$

3 keV környékén az elektronmikroszkópos vizsgálat százalékos értékei nem megbízhatók az alacsony foton beütésszám miatt, ezért a 20 keV-os mérésből dolgoztam tovább. Ha hengerrel közelítjük a vizsgált térfogatot, és az atomátmérők közötti különbségeket elhanyagoljuk, az aranyréteg vastagsága a teljes vastagság (táblázat szerinti) 0.37%-a, azaz 5 nm. Ugyanígy a palládium vastagsága 90 nm, a nikkelé 1230 nm. Az három vastagság összege nem egyezik meg a számítás eredményével a közelítés pontatlansága miatt. Ugyanezt a közelítést használva a vastag aranyrétegnél 20 keV-al mért értékekre, hasonló eredményeket kapunk, mint a súlyozásos módszerrel.

A számítást finomítani lehet a vizsgált geometria és az atomátmérők figyelembevételével, illetve pontosabb értékeket kapunk szimulációs szoftverek alkalmazásával. A vizsgálat eredménye, hogy látható az egy nagyságrendbeli különbség a kétféle immerziós aranyréteg vastagsága között. A számításokat kísérő bizonytalanságok és közelítések miatt az itt kapott rétegvastagságokról nem állapítható meg egyértelműen, hogy megfelelnek-e a specifikációban előírt követelményeknek.

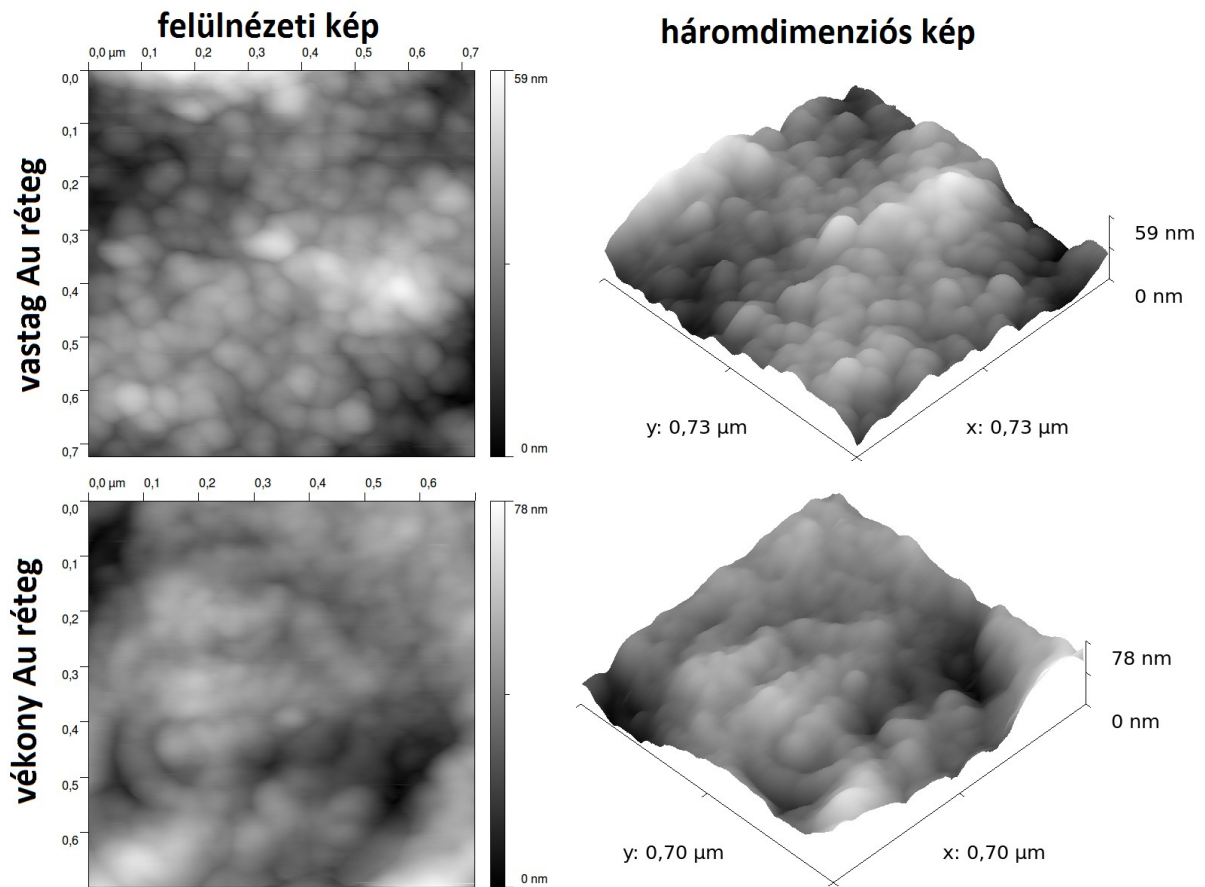
Atomerő-mikroszkópos felszíni profilvizsgálat

A vékony aranyréteges darabok szürke felülete, és az elektronmikroszkóppal detektált arany mennyisége felveti azt a kérdést, hogy a réteg egybefüggő-e. Ismeretes, hogy az aranyréteg 5-10 nm-es vastagságnál kezd el aranyszínűként látszani, ennél vékonyabb aranyrétegek esetén az aranyfelület csaknem átlátszó, az alapfém ezüstös színe látszik. Ha a felület túlságosan érdes, elképzelhető, hogy az immerziós fürdőbe merítve a „völgyekben” megrekedő légzárványok gátolják a réteg kialakulását, és a folyamat csak a magasabb részeken, „csúcsokon” megy végbe. Ekkora felbontásban a felületi topográfiát az atomerő-mikroszkóppal (AFM = Atomic Force Microscope) tudjuk vizsgálni (29. ábra). A vizsgálatokat a tanszéki Veeco di Innova típusú pásztázó atomerőmikroszkóppal végeztük. A berendezés tője egy néhány atomban végződő félvezető anyagú piramis, mely atomi közelségben pásztázza a minta felszínét. A karok atomi vonzás következtében történő mozgása piezoelektromos jelet generál. A kitérés méréséhez lézer is alkalmazható, ekkor az elhajlott karról más úton visszaverődő lézersugár más fotodiódát gerjesztve magassági információt szolgáltat.



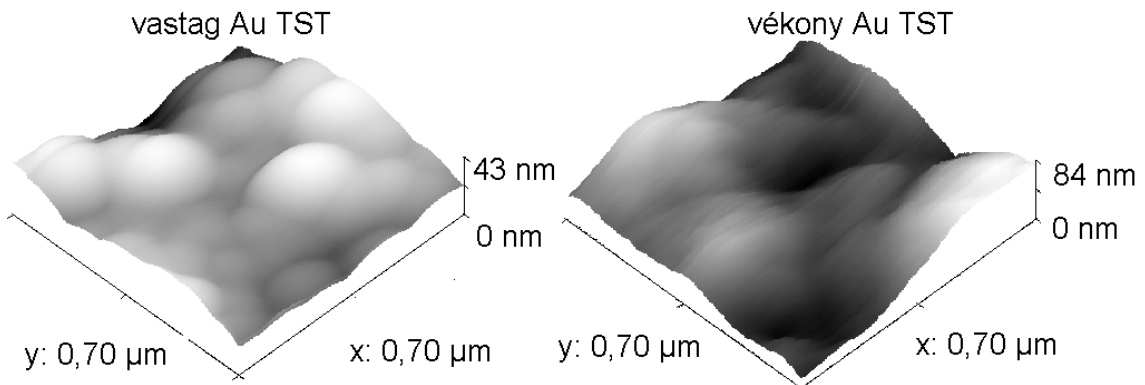
29. ábra Az atomerő-mikroszkóp tője (balra) és a tőket tartó karok (jobbra). A tű magassága (l) 2.5-3.5 μm .

Mindkét esetben egy $0.7 \mu\text{m} \times 0.7 \mu\text{m}$ nagyságú területet pásztáztunk (30. ábra). A vastag aranyréteggel fedett darabot beborító néhányszor 10 nm átmérőjű szemcsék magá az immerziós réteg. A felület itt látható makroszerkezetének egyenetlenségét a palládium és a nikkell réteg struktúrája adja. A vékony aranyréteges mintán kisebbek a szemcsék, mikroszerkezete simábbnak mondható. A felület legalacsonyabban és legmagasabban fekvő pontja között a különbség a felső mintánál kisebb (felülnézeti kép, oldalsó skála, vastag aranyra 59 nm, vékonyra 78 nm). Ez annak lehet az oka, hogy a vastagabb aranyréteg növekedése az alatta lévő rétegből származó érdességet jobban csökkenti, egyenletesebb felszín hoz létre. A felvétel alapján a vékonyabb aranyréteg összefüggőnek tekinthető, viszont egy több ponton végzett vizsgálat tágabb képet adna a nagyobb makroszerkezeti egyenetlenségek környékéről is. A vastag és a vékony aranyréteg AFM-es vizsgálatok kapott topográfiai képek a 30. ábrán láthatók.



30. ábra Az atomerő-mikroszkóp domborzati képei.

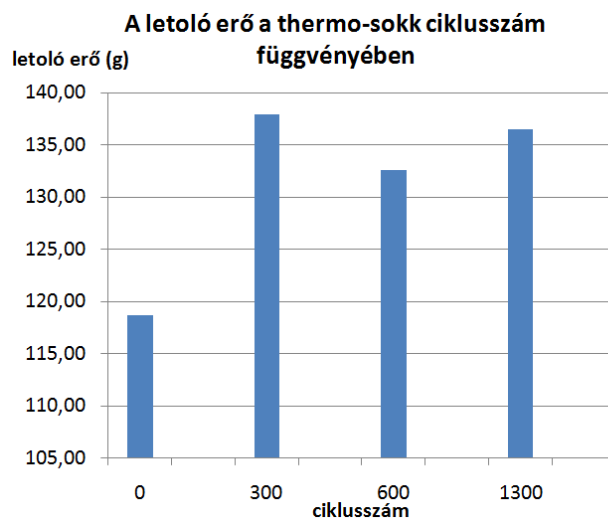
Ugyanezt a vizsgálatot elvégeztük 1300 hősoikk cikluson (TST) átesett mintadarabokon is, a vastag aranyrétegen hasonló szemcseszerkezetet látunk a 31. ábrán, mint a hősokkon át nem esett mintákon. Viszont a vékony aranyréteget alig detektáltuk, mintha a hőhatások következtében bediffundált volna a minta belsejébe.



31. ábra Az 1300 TST ciklusnak kitett minták topográfiája.

Terminál kötések mechanikai vizsgálata

Lehetőségem volt a vékony aranyrétegre készített kötések közvetlen mechanikai vizsgálatára. Az ékes kötések ellenőrzésére a szakító vizsgálat gyakoribb eljárás viszont esetünkben az alábumpolás miatt a letoló tesztet alkalmasabbnak ítélt meg a minősítésre. A letolásokat 300 thermo-sokk ciklusonként végeztem, minden esetben egyszerre 12 kötésen. Egy thermo-sokk ciklus alatt a minták fél órát töltenek +125 °C-on, és szintén fél órát -40 °C-on. A 32. ábra oszlopai az adott ciklusszám után kapott 12 letoló erő átlagait mutatja.



32. ábra A hőszokk tesztnek kitett kötések letolási vizsgálata.

Sajnos nem volt alkalmam összehasonlítani az eredményeket vastag aranyréteggel bevont terminálokra. Mivel a statisztikus folyamatellenőrzésnek nem része a terminál pinekre készült kötések letolási vizsgálata, a módszer kiforratlan, további megfontolásokat és finomításokat igényel. A kapott eredmény önmagában is értékelhető. A számok azt mutatják, hogy 1300 ciklusig a kötés minősége nem romlik, sőt, a letoló erő 10 %-kal megnő. Ez az eredmény igen biztató a felület bondolhatóságát tekintve.

Eredmények értékelése

Munkám során az arany mikrohuzalkötéseknél felületi fémezésként alkalmazott kétféle ENEPIG réteget vizsgáltam. A rétegvastagságok becslésére többféle módszert alkalmaztam, a különböző megközelítésekkel kapott eredmények között ellentmondást nem tapasztaltam. A vastag aranyréteggel fedett darabok rétegvastagságait Ni/Pd/Au rétegekre rendre 900/300/70 nm-re, a vékony aranyréteggel fedett darabok rétegvastagságait 1200/90/5 nm-re becsültem. Pontosabb értékeket további megfontolásokkal, feltételezések, és közelítések

részletesebb körbejárásával kaphatunk. Az Alpha Step-el végzett vizsgálattal és a nagy nagyítású optikai mikroszkóppal a felület, különös képpen a réz mag makroérdességéről kaptunk képet. A körülbelül 1.5 μm vastag ENEPIG réteg nem egyenlíti ki a feltehetően a hengerlésből származó, néhány μm széles és ugyan ilyen magas, párhuzamos bordákat. Ez az érdes felület nem kedvez a mikrohuzalkötésnek. A letolási vizsgálat azt mutatta, hogy a kötések minősége a thermo ciklusok számának növekedésével nem romlik. Az under bump-nak kiemelkedő szerepe lehet a kötések tartósságában. Egy ilyen érdes profilra kötött ékes kötés minősége rosszabb lehet, mivel eleve kis felületen érintkezik a felülettel. Az egyenetlenségek negatívan befolyásolják a biztos tapadást. Viszont egy under bump megfelelően „kipárnázza” a pin felületét, így az ékes kötés nem az ENEPIG réteggel kerül kapcsolatba, hanem a vastag arany bump-pal. A bump paraméterei széles skálán mozoghatnak, egyetlen elvárás vele szemben a biztos tapadás. Alkalmazásával egy huzalkötés szempontjából kedvezőtlenebb felület is használható lesz golyós-ékes kötés kialakítására.

Összefoglalás

Munkám során kétféle vastagságú arany-palládium-nikkel felületi bevonatú vörösréz kivezetők felületi rétegét, a rétegstruktúrát vizsgáltam. Többféle vizsgálati módszert alkalmaztunk, hogy meghatározzuk az egyes rétegek vastagságát, anyagösszetételét, felületének topológiáját. Optikai-, felületi profilmérő-, elektronmikroszkópos és atomerő mikroszkópos vizsgálatokat végeztünk érintetlen mintákon, maratott mintákon és keresztmetszeti csiszolatokon, melyek eredményeképpen átfogó képet kaptunk a felületekről. A nikkel és az palládium bevonat dombos topológiájára a vastag és a vékony aranyrétegek az aranyatomok sokkal kisebb mérete miatt „ráülnek”, az alap réteg makroszerkezetét nem egyenlítik ki. Az arany mikroszerkezete kis gömböcskés. A kapott eredmények alapján elmondható, hogy az ennyire vékony aranyrétegek vizsgálata speciális felkészültséget és mintaelőkészítést igényel, és teljesen pontosan még a rendelkezésre álló igen fejlett vizsgálati módszerekkel és berendezésekkel sem vizsgálható. Az iparban már amúgy is alkalmazott biztonsági technológiák (pl. under bump) alkalmazásával nem találtunk különbséget a vékony és a vastag aranybevonatú minták bondolási tulajdonságai és minősége között.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném köszönetemet kifejezni Rigler Dánielnek az elektronmikroszkópos mérésekben, valamint Bonyár Attilának az atomerőmikroszkópos mérésekben nyújtott segítségükért.

Hivatkozások

1. George G. Harman: „Wire Bonding in Microelectronics”. McGraw-Hill Publishers, 3rd edition, New York, 2010. pp. 3-4., 14-28., 33-36., 53., 80-83., 59-60., 92-97.,112., 119.,204-218., 307-308., 314., 338.
2. Donald J. Beck, Albert C. Perez: „Wire bonding technology, The Great debate: ball vs wedge”. Advanced Packaging, March 2007
3. Wu Fengshun, Hu Yanxiang, Wu Yiping, An Bing, Zhang Jinsong: „A study of termosonic gold wire bonding onto silver plated copper pad”. 6th International Conference on Electronic Packaging Technology, 30 August-2 September 2005, La Waterfront Hotel, Dameisha, Shenzhen, China, pp. 1-4.
4. Wardhana Aji Sasanga: „High Temperature Performance Study of Gold wire bonding on a Palladium Bonding Pad”. Nanyang Technological University, Singapore, 1-4244-0665-X IEEE 2006
5. Kohei Tatsumi, Kohzo Onoue, Tomohiro Uno, Osamu Kitamura: „Fine-Pitch Wire Ball Bonding Technology”. Nippon Steel Technical Report No. 73, April 1997
6. Shankara K. Prasad: „Advanced Wirebonding Interconnection Technology”. 1-4020-7762-9, Kluwer Academic Publisher, 2004 pp.
7. F. L. Ng, J. Wei, F. K. Lai, K. L. Goh: „Thickness measurement of metallic thin film by X-ray microanalysis”. SIMTech technical reports (STR_V10_N1_05_PMG) Jan-Mar 2009