



S Z A K D O L G O Z A T - F E L A D A T

Gunics Endre

szigorló villamosmérnök hallgató részére

SAC-(ZrO₂/CuO) kompozit forrasztott kötések vizsgálata

Konkrét feladatok felsorolása:

1. Irodalom kutatás alapján, ismertesse a kompozit forraszokat, fő alapanyagaikat, és a kompozit forrasztás előnyeit és hátrányait különös tekintettel az SnAgCu-(ZrO₂/CuO) forraszokra.
2. Tervezzen meg, készítsen elő és hajtson végre egy kísérletsorozatot SnAgCu-(ZrO₂/CuO) kompozit forraszok használatával. Készítsen kompozit forrasz kötéseket.
3. Minősítse az elkészült kötéseket, valamint hajtson végre rajtuk gyorsított élettartam vizsgálatokat a kötések megbízhatóságának vizsgálatára.
4. Hasonlítsa össze a kompozit forrasz kötések miőségét és megbízhatóságát referencia SnAgCu forrasz kötésekkel.
5. Mutassa be a kísérletek során alkalmazott eszközöket és végrehajtott feladatokat. Foglalja össze a tapasztalatait, értékelje a kísérletsorozatot, valamint tegyen javaslatot a téma esetleges továbbvitelére.

Tanszéki konzulens:

Dr. Illés Balázs

Konzultálásra felkért szakértő:

<külső konzulens - törlendő, ha nincs>

Záróvizsga:

Ezúton hívom fel figyelmét, hogy a rendelkezések értelmében a végzős hallgatóknak záróvizsgát kell tenniük. A záróvizsga tárgyait a Szakdolgozat adatlap írja elő.

Beadási határidő: A szorgalmi időszak utolsó napja.

Kiadásának iktatási száma: 423.562/23/140.

Dátuma: Budapest, 2023. szeptember 4.

A tervfeladatot összeállította:

Jóváhagyta:

Dr. Illés Balázs
egyetemi tanár

Dr. Illés Balázs
egyetemi tanár, tanszékvezető





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Elektronikai Technológia Tanszék

Gunics Endre

**SAC-(ZrO₂/CuO) kompozit forrasztott kötések
vizsgálata**

KONZULENS

Dr. Illés Balázs

BUDAPEST, 2024

Tartalomjegyzék

| | |
|---|----|
| 1 Bevezetés | 1 |
| 2 Forrasztási technológia áttekintése | 2 |
| 2.1 Forrasztás | 2 |
| 2.2 Újraömlésztéses forrasztási technológia | 3 |
| 2.3 Ón | 6 |
| 2.3.1 Ón pestis | 6 |
| 2.3.2 Ón whisker | 7 |
| 2.4 Sn-Pb forraszok | 8 |
| 2.5 Egészségügyi és környezetvédelmi aggályok | 8 |
| 2.6 Ólommentes forraszok kihívásai | 9 |
| 3 Kompozit forraszok tulajdonságai | 10 |
| 3.1 Kompozit forraszok fejlesztése | 10 |
| 3.2 Kompozit forrasz felépítése | 10 |
| 3.2 Mikroszerkezet | 10 |
| 3.3 Olvadás | 11 |
| 3.4 Oxidáció elleni védekezés | 13 |
| 3.5 Asit Kumar, Y.C. Chan és Winco K. C. Yung kutatási eredményi [12] | 14 |
| 3.5.1 Keménység | 14 |
| 3.5.2 Olvadás vizsgálata | 16 |
| 3.6 Elektromigrációs jelenség | 17 |
| 3.7 Nedvesítőképesség | 18 |
| 4 Ón whisker | 19 |
| 4.1 A whisker növekedés ónozótt felületen | 19 |
| 4.2 Whiskerek növekedése SAC forrasztott kötésekben | 21 |
| 4.2.1 Whisker növekedés korrozió hatására | 22 |
| 4.2.2 Bizmut, szennyeződés és kontaktusfelület bevonatok hatása a whiskerek növekedésre | 24 |

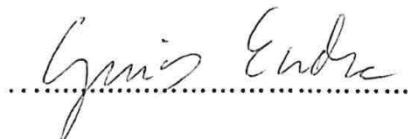
| | |
|--|----|
| 4.2.3 Réz hatása a whiskerek alakjára | 27 |
| 5 ZrO ₂ és CuO hatása a forrasztott kötésekre | 29 |
| 5.1 Nyírószilárdság vizsgálat | 29 |
| 5.1.1 Előkészítés..... | 29 |
| 5.1.2 Tesztpanelek elkészítése..... | 30 |
| 5.1.3 Nyírószilárdság mérése | 31 |
| 5.1.4 Mérési eredmények | 34 |
| 5.1.5 Az eredmények grafikus megjelenítése | 35 |
| 5.1.6 Eredmények összegzése | 36 |
| 5.2 Megbízhatósági vizsgálat | 37 |
| 5.2.1 A kísérlet célja | 37 |
| 5.2.2 A kísérlet előkészítése és folyamata | 37 |
| 5.2.3 Vizsgálat folyamata | 37 |
| 5.2.4 A kísérlet eredményei | 38 |
| 5.2.5 Konklúzió | 47 |
| 6 Összefoglalás..... | 48 |
| Hivatkozások | 49 |

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Gunics Endre**, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltetem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervezet esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest, 2024. 05. 21.



Gunics Endre

1 Bevezetés

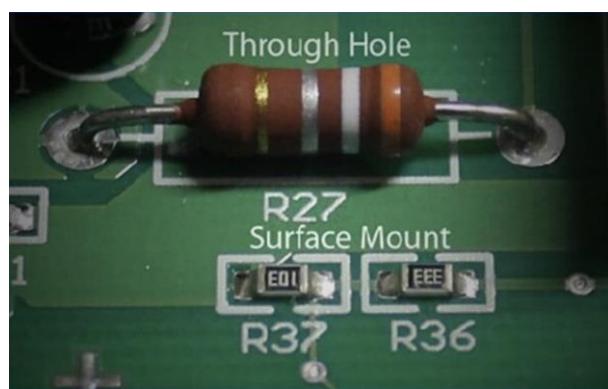
Az elektronikus áramkörökben a forraszok biztosítják a mechanikus és villamos összeköttetéseket az alkatrészek között. Az iparban a legelterjedtebb forrasz a Sn-Pb ötvözet volt, különleges tulajdonságainak köszönhetően. Jól vezet, olcsó, alacsony az olvadáspontja (183°C) és erős kötést biztosít a hordozó és az alkatrészek között. Az ólom mérgező anyag, használatát betiltották, ezért ólommentes forraszokra lett szükség. Manapság különböző többkomponensű Sn alapú forraszokat fejlesztenek, mint például a Sn-Cu, Sn-Ag, Sn-Sb, és az Sn-Ag-Cu. Az Sn–Ag–Cu ötvözet jó helyettesítőknek tűnt, mert a többi ólommentes forraszhoz képest alacsony az olvadáspontja, ez pedig az alkalmazhatóság egyik fő szempontja. Ma az Sn–Ag–Cu a legjelentősebb helyettesítője a Pb mentes forraszoknak a felületszerelt alkatrészek technológiájában. A tudomány előrehaladásával egyre kisebbek lettek az elektronikus ezközök, ebből adódóan a forraszok méretének is csökkennie kellett. Az egyre kisebb forraszokkal újabb kihívásokba ütközött az iparág. Az akadályok megoldását különböző kompozit forraszokkal próbálják elérni. Ezen dolgozat egy ilyen kutatás dokumentálása. A dolgozatomban bemutatom az iparban használt forrasztási technológiát. Részletezem a forrasztás mechanizmusát és jellemzem az újraömlésztéses forrasztási technológiát. Ismertetem az ón széleskörben való elterjedésének okát és használatának esetleges hátrányait, továbbá bemutatom, az Sn-Pb forraszok előnyeit is. Szakmai portálokon található tudományos publikációkat, cikkeket gyűjtöttem és foglaltam össze annak érdekében, hogy minősíteni tudjam a kompozit forraszok jellemzőit. A minősítéshez CuO, ZrO₂ nanorészecskével és ZrO₂ nanoszállal erősített forraszokon nyírószilárdság és megbízhatósági vizsgálatokat végeztem. A kísérletek eredményeit részletesen elemztem és összegeztem. Végül javaslatot tettem további kísérletek elvégzésére, amelyek segítségével még teljesebb képet kaphatunk a kompozit forraszok minősítéséről.

2 Forrasztási technológia áttekintése

2.1 Forrasztás

A forrasztás egy jól ismert eljárás két fém összekötéséhez, már az ókori rómaiak is használták vízvezeték rendszereik kiépítéséhez. A hegesztéssel ellentétben a forrasztás úgy hoz létre oldhatatlan kötést két fém között, hogy a folyamat során az alapanyagok nem olvadnak meg, ez nagy előnyt jelent az elektronikában, mivel az alkatrészeket alakváltozás nélkül lehet összekötni. A forrasztás egy adhéziós diffúziós folyamat, mely során a két fém határfelületén lezajló diffúziós jelenségek hatására alakul ki a kötés. Ez akkor történik meg, ha az anyagok jól oldódnak egymásban. A mai mikroelektronika ipar elköpzelhetetlen lenne forrasztások nélkül. Szükségesek a mechanikus rögzítés, elektromos és termikus vezetés kialakításához. A forrasztás úgy köti össze a két kontaktfelületet, hogy megolvad a forraszanyag, benedvesíti a két felületet, majd lehűl és megszilárdul ezzel létrehozva a kötést. A nedvesíthetőség az egyik legfontosabb szempont a forraszanyag kiválasztásánál. Annál jobb egy anyag nedvesítőképessége, minél jobban elterül a nedvesítendő felületen. Eutektikus ötvözés hatására az ötvözöt olvadáspontja a tiszta összetevők olvadáspontjánál alacsonyabb lesz.

Az alkatrészeket furat és felületszerelt módon lehet hozzárögzíteni a nyomtatott halálozású lemezhez. A gyakorlatban a felületszerelt alkatrészek vannak nagyobb számban, mégis szükség van a furatszerelési technologiára, mivel a csatlakozókat csak így lehet kialakítani. Tehát, a forraszok alkalmazása a gyakorlatban egyaránt magában foglalja a felületszerelt és furatszerelt módszerek használatát.



1. ábra Furat és felületszerelési technológia [1]

A felületszerelt alkatrészek kontaktjai lehetnek BGA elrendezésben is (ball grid arrays), ebben az esetben a forraszok golyó formájában vannak a chipen. Kezdetben huzalkötéssel alakították ki a vezetést az alkatrészek között. Huzalkötéssel két áramvezető felületet kötünk össze egy

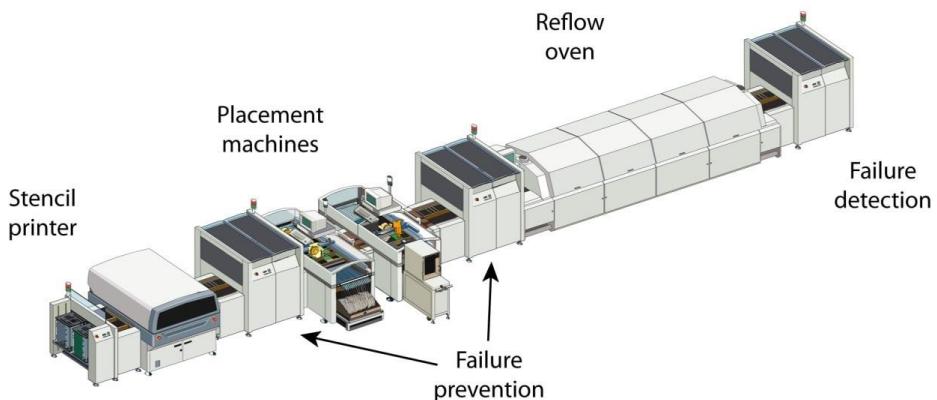
vékony átmérőjű fém huzal vagy fém szalag segítségével. A megnövekedett bemenetek és kimenetek miatt egyre több kötést kellett kialakítani adott felületen. Minél több huzalkötést vált szükségesse annál körülményesebbé vált a technológia. Ennek következtében több száz huzalkötés kialakítása már kivitelezhetetlen feladat. A kezdeti huzalkötéssel kialakított kapcsolatot leváltotta a flip chip technológia, mivel ezzel egy felületen sokkal több kötés alakítható ki. A die elkészítésének utolsó lépéseként forraszgolyókat helyeznek el a tetején, majd ezt fejjel lefelé hozzárogzítik a kontaktfelülethez.



2. ábra Flip Chip technológia [2]

2.2 Újraömlesztéses forrasztási technológia

Napjainkban az újraömlesztéses forrasztási technológia a legelterjedtebb az iparban. Nevét onnan kapta, hogy a forrasztáshoz használt forraszfém egy melegítés során jött létre és a forrasztáskor újra felmelegítik.



3. ábra Elektronikai gyártás folyamata [3]

A folyamat során forraszpasztát használnak, amely tartalmazza a forrasztóanyagot, ami lényegében nagyon apró fémgolyócskákból áll és egy folyatószer (flux), ami a jobb nedvesítésért és a felület tisztításáért felel. A fém szemcsék mérete átlagosan 10 µm. A forraszpaszta forrasztás során közel felére zsugorodik, amit figyelembe kell venni a

forraszpaszta PCB-re felvitt mennyiségenek kiszámításakor. A paszta lehet ólommentes és ólmos. A legelterjedtebb ólommentes forraszanyag a SAC. A SAC az ón, ezüst, réz elemek periódusos rendszerben található vegyjelének kezdőbetűiből tevődnek össze. Létezik egy kevésbé elterjed rövidítés a TSC, amit pedig a tin, silver, copper angol szavak kezdőbetűi alkotják. A SAC után számmal jelzik azt, hogy az elemeknek mi a pontos összetétele tömegszázalék szerint. A legtöbbet használt arány a 3 tömegszázalék ezüst, 0.5 tömegszázalék rész és 96.5 tömegszázalék ón, ezt az iparban SAC305-nevezik. Az elnevezés így az összetétel és a százalékos értéket is magában foglalja. Az SPCV, azaz a Solder Products Value Council számos minősítő eljárás során megállapította, hogy az ólommentes forrasztáshoz a SAC305 típusú forraszt ajánlják [19]. Európa mellett Japánban is elsősorban a SAC305 összetételű forrasztóanyag terjedt el az iparban az ólomtartalmú forrasztóanyagok helyettesítőjeként.

A forrasztás a forraszt paszta kontaktfelületre való felvitelével kezdődik stencilnyomtató segítségével. A pasztafelvitel kritikus a forrasztás megbízhatósága szempontjából, mivel a forrasztási hibák 60-70%-a vezethető vissza a stencilnyomtatásra. A nyomtatás során a nyomtató egy késsel végig tolja a pasztát a stencilfólián. A stencil egy vékony (75-150 µm) fémlemez, ami gyakran rozsdamentes acélból készül. Ahol apertúrákat alakítottak ki, ott a paszta átpréselődik a stencilen. A nyomtatás főbb paraméterei a nyomtatási sebesség, ami általában 30-200 mm/s, finom rasztelosztású kivezetések esetében, pedig 30-70 mm/s. Fontos jellemző még a későrő, ami 30 N és 120 N között van általában. Egy gyártósoron, ahol nagy számban történik stencilnyomtatás, az eltömődések elkerülése érdekében a stencilt tisztítják. A nyomtatás során a PCB-t alátámasztják, ami történhet oszlopok segítségével vagy dombormarrott alaszámasztással.



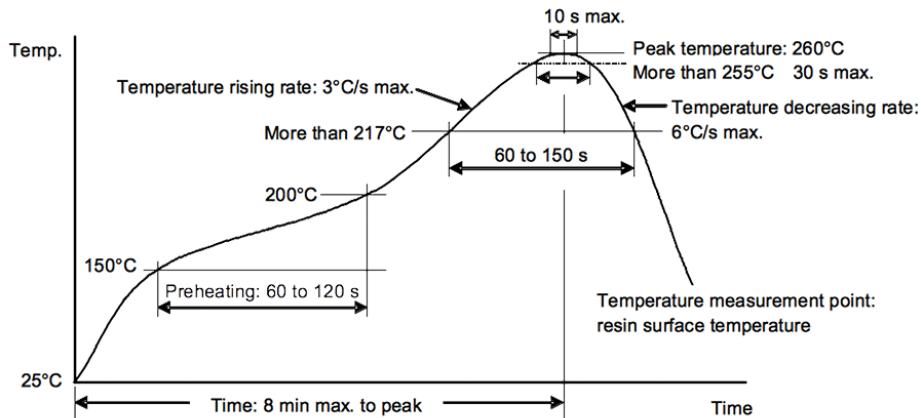
4. ábra Stencilnyomtatás folyamata [5]

A paszta felvitele után az alkatrészek beültetése következik. Az alkatrészek beültetésnél lényeges, hogy az komponensek a megfelelően kerüljenek a helyükre, ezekhez segítségül vannak a fiduciális jelek. A beültetés kézi vagy automata módon zajlik. Automata beültetés történhet mozgótálcás módon, ahol a beültetőfej fix pozícióban van és az alátámasztást mozgatják, továbbá lehetséges hordozóálványos módon is, ami ez előző esttel ellentétes módon zajlik. Az alkatrészek felvételére kétfajta beültetőfej használatos, pick & place, ami kevesebb alkatrészt ültet be, de pontosabban és collect & place, ami sok alkatrészt, de ezt pontatlanabban. A beültetőgépet a folyamathoz fel kell programozni, ami az alkatrészek pozíciójának meghatározását jelentik, valamint meg kell adni, hogy mely szalagtárból és milyen orientációval vegye ki az alkatrészt a berendezés. A beültetést megelőzően az beültető eszköz meghatározza az optimális útvonalat, ami a beültetési idő minimalizálását jelenti.



5. ábra Az alkatrészbeültetés folyamata [3]

A beültetést követően a forrasztás következik. A forrasztás a forraszpaszta melegítésével kezdődik. Olvadáspont feletti érték elérésekor a forrasz megömlik és benedvesíti a felületet, utána csökken a hőmérséklet és elkezd hűlni a forrasz, melynek hatására megszilárdul, ami a forrasztott kötés kialakulásához vezet. Az iparágban a legelterjedtebbek a szállítószalagos alagút-kemencék, amelyek legfrissebb változatai már kényszerkonvekciós fűtéssel használnak. A hőátadás közege lehet levegő vagy gáz, ami gyakran nitrogén. A kemencék akár 17 fűtési zónával is rendelkezhetnek. Az iparban ismeretes még az infrasugars és a gőzfázú hőközlési mód. A forrasztás történhet szelektív módon is. A három legelterjettebb a kéményes bályeges és keretes szelektív forrasztási mód. A forrasztás során hőprofilokat használnak, ami a hőmérséklet szabályzását jelenti. Ólmos és ólommentes esetben más a hőprofil, mivel más az olvadási viselkedés. Az olvadás egy tartományt jelent, ahol az olvadt és szilárd fázisok keverednek. Egy hőmérséklet érték felett csak olvadt fázis van jelen. Ólmos esetben ez 210 °C ólommentesnél, pedig 240 °C.



6. ábra Egy tipikus újraömlésztéses forrasztás hőprofilja [6]

2.3 Ón

Az ón alapvető alkotóeleme a forrasztott kötéseknek. Olcsó és gyakran előfordul a természetben, emellett az egyik legjobb nedvesítőképességgel rendelkező anyag. Olvadáspontja 231.9 C° és viszonylag jó villamos és mechanikus tulajdonságokkal rendelkezik. Mindezen okokból kifolyólag az ón széles körben elterjedt az elektronikai iparban. Vannak azonban olyan nemkívánatos tulajdonságai, amelyek nagyban befolyásolják a forrasztott kötések megbízhatóságát.

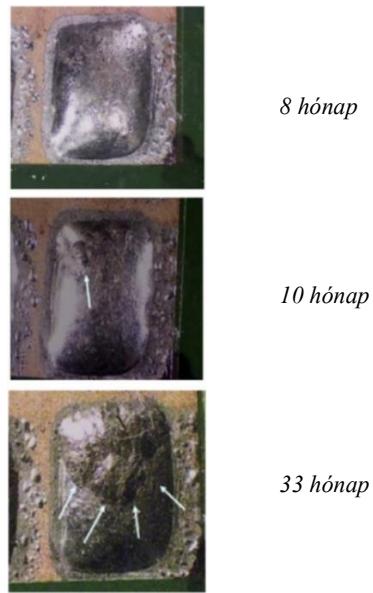
2.3.1 Ón pestis

Az ónnak két allotróp módosulata van, ami azt jelenti, hogy hőmérséklettől és nyomástól függően két kristályszerkezet tud felvenni [7].

- A fehér β -ón tetragonális kristályszerkezetű, sűrűsége $7,31\text{ g/cm}^3$.
- A szürke α -ón köbös szerkezetű, sűrűsége $5,77\text{ g/cm}^3$.

A két kristályszerkezet közötti váltás $13.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatti hőmérsékletnél következik be, ahol a fehér β -óból szürke α -ón lesz. Ezt a jelenséget az irodalomban ón pestisnek nevezik (Tin pest). Bár $13.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt létezik ez a jelenség, de ezen a hőmérsékleten nagyon lassú.

Hillman ón pestisre vonatkozó vizsgálatot végzett [8]. A kísérlethez tiszta ón forraszanyagot használt. A forraszok szokványos, az iparban használt felületszerelési technológiával lettek kialakítva. A forraszok állandó $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékletnek voltak kitéve és α -ónnal lettek "beoltva".

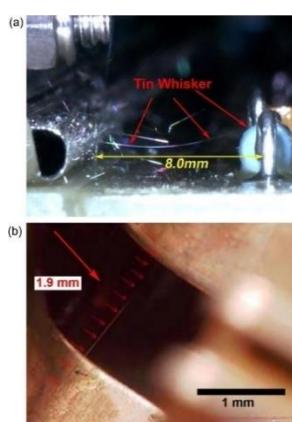


7. ábra Ón pestis kialakulása [8]

Hillman kísérlete egy nagyon szélsőséges esetet vizsgált, mivel ilyen nagy százalékban ónt tartalmazó forrasz nincs az elektronikai iparban, azonban jól szemlélteti az ónnak ezt a káros tulajdonságát.

2.3.2 Ón whisker

Az elektronikai gyártás egyik fontos lépése a galvanizálás (electroplating), amely egy vékony fémréteg kialakítását jelenti. A fémréteg célja, hogy védelmet nyújtson kopás ellen, megakadályozza a korroziót, növelje a vezetőképességet és a forraszthatóságot. A réz és ötvözeteiből készült mikroelektronikai alkatrészeket ónnal galvanizálják a forraszthatóság fenntartása érdekében, azonban környezeti hatásra apró szálak (whiskerek) nőhetnek az ón felületén, amelyek rövidzárat hozhatnak létre az áramkörökben. A whiskerek nem csak ónozott felületeknél vannak jelen, hanem forrasztott kötésekben is ki tudnak alakulni.



8. ábra Sn whiskerek [4]

A (b) képen egy Toyota autó gyorsításért felelős szenzora látható, amin a pedál kimeneteit egy kb 1.9 mm-es whisker köti össze. A whisker nem kívánt gyorsítást eredményezett. Az (a) képen egy ūrrepülőgép elektronikájában kialakult whiskerek láthatóak, ahol ugyancsak meghibásodást okoztak.

2.4 Sn-Pb forraszok

Régebben gyakorlatilag az összes forrasz ólommal ötvözetiék. A többi forrasztásban használt fémmel összevetve lényegesen olcsóbb megoldásnak bizonyul.

| Alloy | Cost (12 January 1997) (US\$/kg) | Patented alloy |
|--------------------------|----------------------------------|----------------|
| 63Sn-37Pb | 5.87 | No |
| 42Sn-58Bi | 7.79 | No |
| 77.2Sn-20In-2.8Ag | 51.63 (113.92) | Yes |
| 85Sn-10Bi-5Zn | 8.14 | No |
| 91Sn-9Zn | 7.99 | No |
| 90Sn-7.5Bi-2Ag-0.5Cu | 11.42 | No |
| 96.3Sn-3.2Ag-0.5Cu | 13.27 | No |
| 95Sn-3.5Ag-1.5In | 16.52 (21.19) | No |
| 96.2Sn-2.5Ag-0.8Cu-0.5Sb | 2.21 | Yes |
| 96.5Sn-3.5Ag | 13.73 | No |
| 98Sn-2Ag | 11.55 | No |
| 99.3Sn-0.7Cu | 8.62 | No |
| 97Sn-2Cu-0.8Sb-0.1Ag | 8.78 | Yes |
| 95Sn-5Sb | 8.36 | No |

9. ábra A forrasztóötvözetek kilogrammonkénti ára [9]

A közel eutektikus Sn-Pb forrasz olvadáspontja 183 °C. Ez a többi ötvözzel összehasonlítva alacsony. Az olvadáspont az alkalmazhatóság szempontjából fontos. A gyártási folyamat során az ötvözetet olyan hőmérsékleten olvasztják meg, amely magasabb, mint az anyag olvadáspontja. Ez azért szükséges, hogy biztosítsák az anyag stabil olvadását, ami nélkülözhetetlen a gyártási folyamat során.

2.5 Egészségügyi és környezetvédelmi aggályok

Az Sn-Pb forraszok rendkívül jó sajátosságai ellenére mégis el kellett vetni a használatukat. A közelmúltban jelentősen megnőtt a mikroelektronikai áramkörök tartalmazó eszközeink száma, ebből következett, hogy az elektronikus hulladéktermelés is az egékbe szökött. A mérgező ólom nagy mennyiségen környezetünkbe jutva beláthatatlan következményekkel járhat. A talajba és vizeinkbe jutva mérgezi a növény és állatvilágot, ezzel együtt minket, embereket is. 2006. július 1-től a veszélyes anyagok korlátozásáról szóló Európai Uniós utasítás (Restriction of Hazardous Substances: RoHS) értelmében környezetvédelmi okok miatt az

elektronikai készülékek gyártása során kerülni kell az ólmos forraszok alkalmazását [10]. Ennek hatására jelentősen megnőtt világszerte az új forraszötvözetek kutatása.

2.6 Ólommentes forraszok kihívásai

A technológia fejlődésével a forraszoknak egyre jobb mechanikus és villamos tulajdonságokkal kellett rendelkezniük. Általánosságban véve az a törekvés, hogy minél alacsonyabb legyen a forrasz olvadáspontja, kivéve, ha pont az a cél, hogy növekedjen (például magas üzemi hőmérséklet esetén). Vannak olyan felhasználási területek, ahol a forrasznak extrém körülményeket kell kibírnia (szélsőséges hőmérsékletet vagy intenzív mechanikus behatásokat, rezgésekkel.) A ki és bekapcsolás során a kötés felmelegszik és lehűl, ez az anyag fáradásához vezethet.



10. ábra Tényezők, amiket figyelembe kell venni, amikor ólmos forraszokat helyettesítünk [10]

3 Kompozit forraszok tulajdonságai

3.1 Kompozit forraszok fejlesztése

A kihívásokra megoldások kellettek. Egyik ilyen próbálkozás, hogy különböző nanorészecskékkel adagoljuk a forraszt. Az anyagok széles választéka közül rendkívül nehéz feladat a jó ötvözeti kiválasztása és a szemcsék megfelelő anyagának, méretének és technológiájának kiválasztása. A hozzáadott részecskéknek úgy kell az alap forrasz tulajdonságait javítania, hogy az előnyeit nem rontja el az ötvözés során. Ugyanakkor az is elvárt tényező, hogy az alkalmazása esetén ne kelljen változtatni az ipari gyakorlaton.

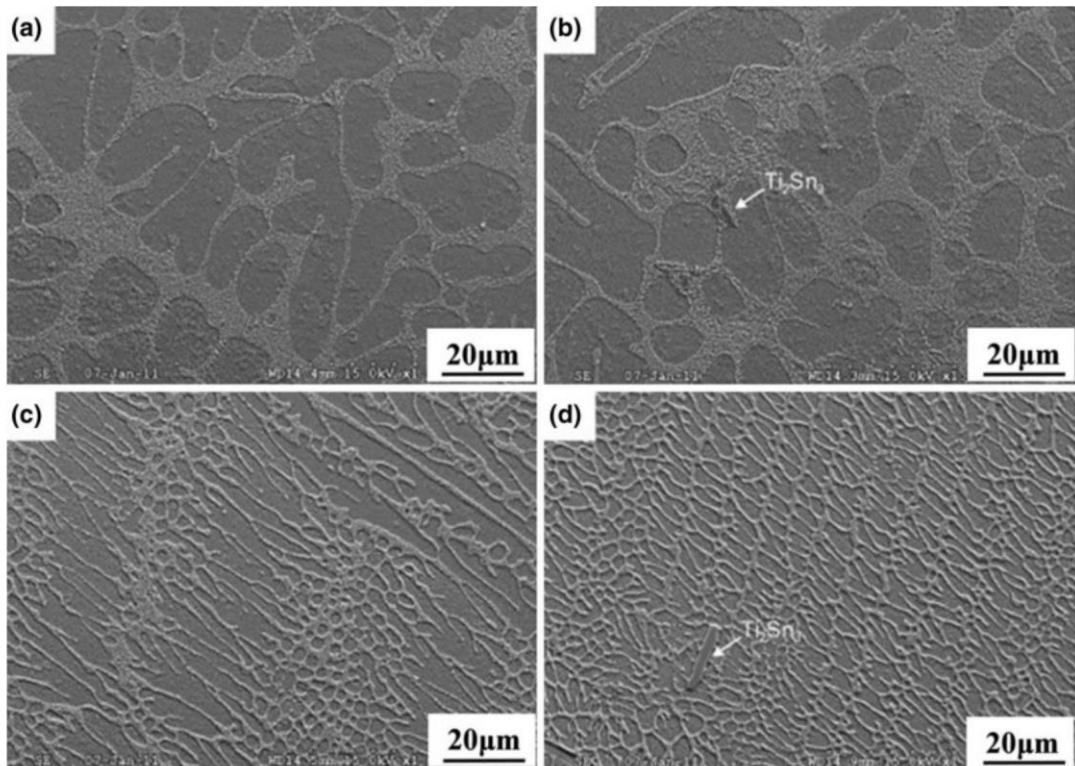
3.2 Kompozit forrasz felépítése

A kompozit forraszt más forrasszokkal ellentétben nem csak fémek alkotják. A kompozit forraszokhoz általában valamilyen kerámia anyagú szemcséket kevernek kis mértékben, amelyek javítják a forraszok tulajdonságait. A kerámia hatására a forrasz lehűlése után más szerkezet fog kialakulni a forraszban és ez alapvetően befolyásolni fogja a forrasz viselkedését.

3.2 Mikroszerkezet

A mikroszerkezet nagymértékben befolyásolja a forrasz mechanikai tulajdonságait. A forrasz szilárdulása után intermetallikus rétegek képződnek. Az intermetallikus réteg egy forrasztás során létrejövő réteg a forrasz és az összeforrasztandó felületek határfelületén. Az IMC réteg diffúzió hatására jön létre. Diffúzió mozgatórugója a részecskék koncentráció különbsége adott térrészeken. Mindig a nagyobb koncentrációtól az alacsonyabb felé halad és addig tart, amíg az eloszlás nem egyenletes. A diffúziós jelenséget a Fick egyenletekkel lehet leírni. A kialakult rétegre befolyással van, hogy milyen oxidgátló bevonattal vették be a forrasztási felületeket. Az intermetallikus réteg nélkül nem lenne kötés, de paraméterei rontják a forrasztott kötés paramétereit. Fajlagos ellenállása nagyobb a forrasznál. Ólommentes forrasztás esetén a fő összetevője a Cu₆Sn₅. Vastagsága 1 és 5 µm közé tehető.

Ha nagy intermetallikus területek jönnek létre, akkor a kötés könnyebben megrepedhet, ami rontja a kötés minőségét. Az ilyen hibák csökkenthetők a hűtés növelésével és az ezüsttartalom növelésével, vagy azáltal, hogy nanorészecskéket adnak a forraszhoz, amely finomabb IMC rétegeket hoz létre.



11. ábra Az ólommentes Sn-3,5Ag-0,5Cu-xTi forraszanyagok SEM-mikroszkópos felvétele. [11]

a) Sn-3,5Ag-0,5Cu

b) Sn-3,5Ag-0,5Cu-0,25Ti

c) Sn-3,5Ag-0,5Cu-0,5Ti

d) Sn-3,5Ag-0,5Cu-1Ti

Az ábra bemutatja, hogy hogyan változik a Sn–3,5Ag–0,5Cu forrasztóötvözeti mikroszerkezete titán hozzáadásával (0–1 tömegszázalék tartományban). Az elektronmikroszkópos vizsgálatok eredményei alapján megfigyelték, hogy a Ti-tartalom növelésével finomabb lesz a forrasztóötvözeti mikroszerkezete. A Ti és Sn fémekből keletkező intermetallikus vegyület kialakulása kedvező hatással van a forrasztóötvözeti mechanikai tulajdonságaira.

3.3 Olvadás

Az egyik probléma az Sn–Ag–Cu forraszokkal, hogy olvadáspontjuk magasabb, mint a Sn–Pb forraszoknak. Az olvadáspont csökkentését el lehet érni alacsony olvadáspontú forraszanyagok összeolvasztásával.

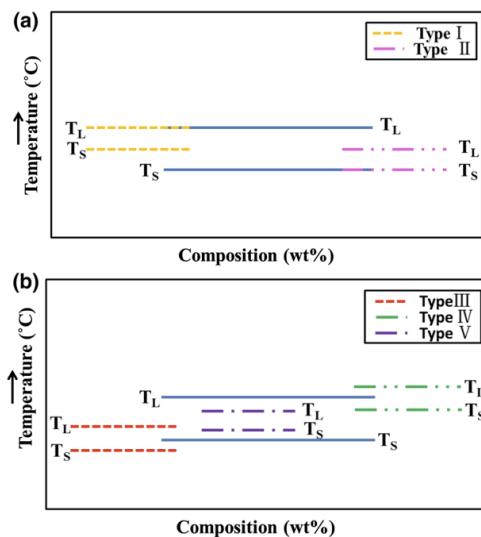
| SAC/SAC-X solder | Solidus temp.T _S (°C) | Liquidus temp.T _L (°C) | Melting range.T _L –T _S (°C) | Melting temp.T _m (°C) | Undercooling. (°C) |
|--|-------------------------------------|--------------------------------------|--|-------------------------------------|-----------------------|
| SAC0507/SAC0507-0.05Ni [7] | 212.0/211.4 | 224.6/223.3 | 12.6/11.9 | 221.1/222.9 | 9.8/6.3 |
| SAC0507/SAC0507-1 Ga [39] | 217/211.5 | — | — | 227.4/225.8 | — |
| SAC103/SAC103-3Zn [43] | 218.5/218.0 | 232.3/225.5 | 13.8/7.5 | 227.7/220.8 | 4.2/2.5 |
| SAC105/SAC105-0.3Fe [45] | 217.5/217.63 | 226.97/226.48 | 9.45/8.85 | — | 9.70/20.29 |
| SAC105/SAC105-0.06Ni [56] | 216.4/217.0 | 234.5/233.6 | 18.1/16.6 | 226.0/226.6 | 35.6/26.4 |
| SAC105/SAC105-0.5Sb [56] | 216.4/219.5 | 234.5/237.6 | 18.1/18.1 | 226.0/227.4 | 35.6/26.8 |
| SAC157/SAC157-1.0Bi [40] | 215.9/214.0 | 225.4/223.8 | 9.5/9.8 | 220.2/218.2 | 18.1/15.7 |
| SAC205/SAC205-0.05Ni [42] | 212.9/212.7 | 220.0/221.6 | 7.1/8.9 | 213.5/214.1 | 26.1/18.0 |
| SAC205/SAC205-0.5Zn [42] | 212.9/211.5 | 220.0/218.5 | 7.1/7.0 | 213.5/212.5 | 26.1/1.4 |
| SAC305/SAC305-0.5Ni [58] | 219.9/218.7 | 221.7/224.4 | 1.8/5.7 | 221.6/224.4 | 24.2/15.7 |
| SAC355/SAC355-1Ti [44] | 216.92/216.59 | 221.58/219.47 | 4.66/2.88 | — | — |
| SAC105/SAC105-0.75SiC [51] | 215.1/217.9 | 226.6/227.6 | 11.5/9.7 | 226.5/227.3 | 18.6/15.4 |
| SAC305/SAC105-0.05TiO ₂ [30] | 216.4/216.6 | 217.7/219.1 | 1.3/2.5 | 217.7/219.1 | — |

“/” and “—” represent space character and no recorded data, respectively. SAC0507, SAC157, SAC205, SAC305 and SAC355 represent Sn-0.5Ag-0.7Cu, Sn-1.5Ag-0.7Cu, Sn-2.0Ag-0.5Cu, Sn-3.0Ag-0.5Cu, Sn-3.5Ag-0.5Cu, respectively

12. ábra Sn-Ag-Cu kompozit forraszszövzetek termikus paraméterei [11]

Az olvadás egy tartománnyal határozható meg a TL és TS ismeretében. Az olvadáspont változása 4 féle módon lehetséges.

- TL változik és TS változatlan
- TL változik és TS változatlan
- TL és TS is csökken, de TL nagyobb mértékben
- TL és TS is nő, de TS nagyobb mértékben
- TL csökken, TS nő

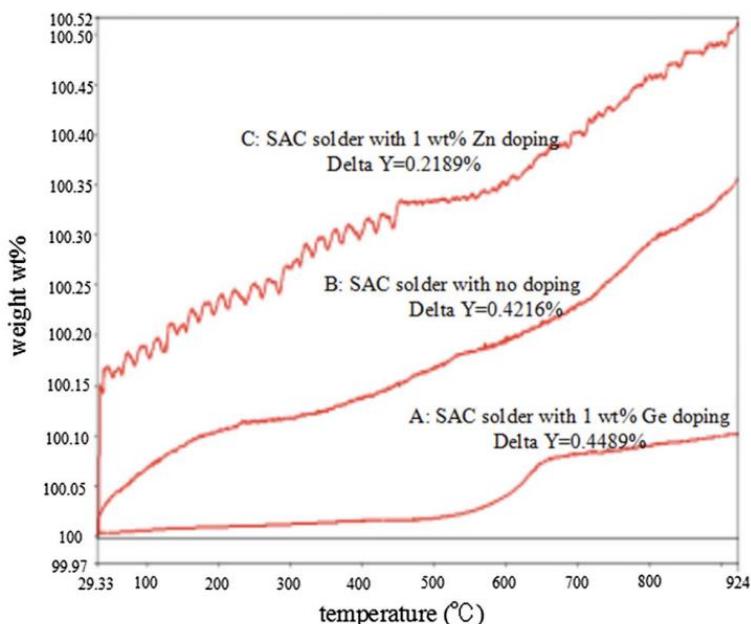


13. ábra Olvadási hőmérsékletek változása [11]

A különböző anyagok más és más módon fogják befolyásolni az olvadást. A "III. típus" képes a gyakorlati forrasztási követelményeket a legjobban kielégíteni.

3.4 Oxidáció elleni védekezés

Az oxidáció veszélyezteti a forraszok megbízhatóságát. Az Sn-Ag-Cu forraszok hajlandóbbak az oxidációra, mint a hagyományos Sn-Pb forraszok, ezért ennek elkerülése érdekében a forraszba juttatnak olyan anyagokat, amelyek az oxidációs folyamatot befolyásolni tudják pozitív irányba. L. Hua kutatásai alapján belátható, hogy Ge anyag adalékolása után a forrasz oxidációs ellenállása javul. Ez annak köszönhető, hogy az olvadt forrasz felületén kialakul egy vékony Ge tartalmú védőréteg, ami megakadályozza a levegő érintkezését a forrasszal. Sn–3.0Ag–0.5Cu, Sn–3.0Ag–0.5Cu–1Ge, Sn–3.0Ag–0.5Cu–1Zn forraszok termikus elemzés eredményei:



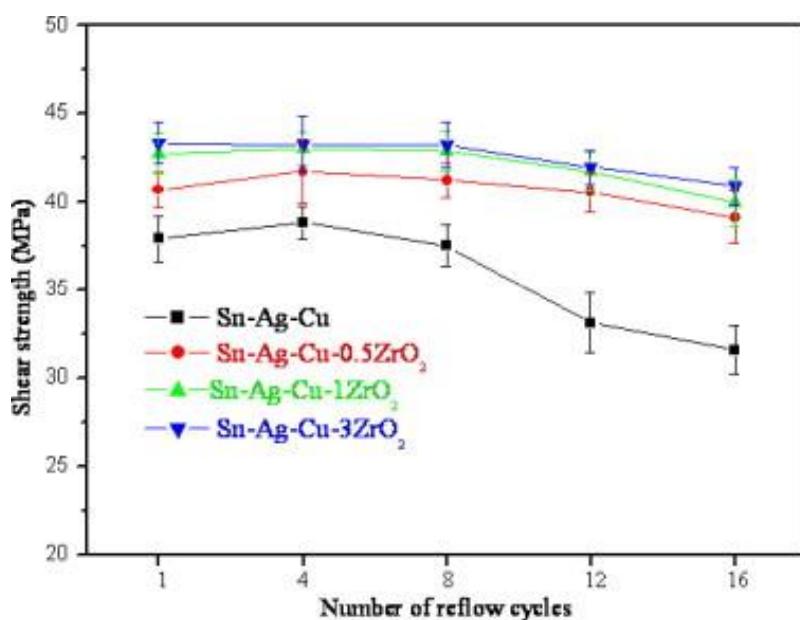
14. ábra Sn–3.0Ag–0.5Cu, Sn–3.0Ag–0.5Cu–1Ge, Sn–3.0Ag–0.5Cu–1Zn forraszok termikus elemzés eredményei [11]

Ge anyaggal adalékolt SAC forrasz mutatott a legkisebb súlynövekedést hőkezelés hastására, tehát ezek alapján megállapítható, hogy jobb az oxidációs ellenállása.

3.5 Asit Kumar, Y.C. Chan és Winco K. C. Yung kutatási eredményi [12]

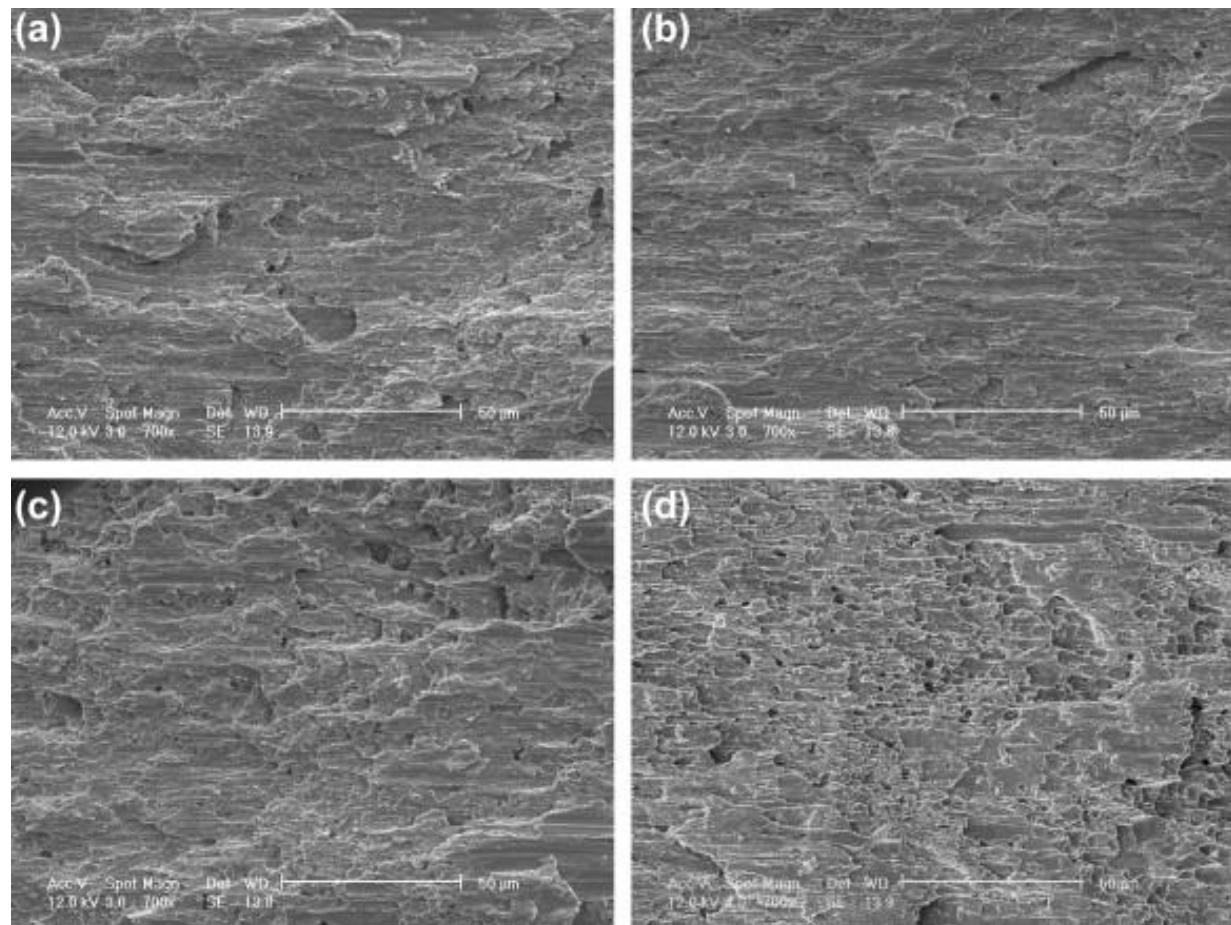
3.5.1 Keménység

Az áramkörök gyártásakor és használatakor, forrasztási kötések gyakran vannak kitéve mechanikai terhelésnek, ezért alapvetően fontosak a különböző anyagú forraszok összehasonlítása nyíró- és húzószilárdság szempontjából. A nyíroszilárdság azt jelzi, hogy mekkora terhelést képes elviselni a forrasztott kötés, ha az alkatrész oldalirányba mozgatjuk, míg a húzószilárdság azt jelzi, hogy mekkora terhelést képes elviselni a forrasztott kötés, ha az alkatrészt függőlegesen a forrasztástól felfelé próbáljuk eltávolítani. A forrasztás minősége és megbízhatósága szempontjából minden tulajdonság fontos. A 15. ábrán különböző tömegszázalékban ZrO_2 nanorészecskéket tartalmazó SAC forraszok nyíroszilárdságának eredményei láthatóak. A ZrO_2 -vel adalékolatlan forrasztókötések nyíroszilárdsága egy újraömlesztéses ciklus után 38 MPa volt, azonban 16 újraömlesztéses ciklus után 31.6 MPa-ra csökkent. A ZrO_2 -t tartalmazó forraszok nyíroszilárdsága jó közelítéssel változatlan maradt az újraömlesztéses ciklusszám függvényében. A nagyobb tömegszázalékban ZrO_2 -vel adalékololt forraszok minden esetben nagyobb szilárdságot mutattak, mint az alacsonyabb ZrO_2 tartalmú forraszok esetében. A 0,5 tömegszázalék és 3 tömegszázalék ZrO_2 nanorészecske-tartalmú forraszkötések nyíroszilárdsága egy újraolvasztási ciklus után körülbelül 40,7 MPa és 43,4 MPa volt. A 0,5 t% és 3 t% ZrO_2 nanorészecskéket tartalmazó forraszkötések nyíroszilárdsága azonban 16 újraolvasztási ciklus után körülbelül 39,2 MPa és 40,9 MPa volt.



15. ábra Sn-Ag-Cu-ZrO₂ kompozit forrasztott kötések nyíroszilárdsága az újraolvasztási ciklusok számának függvényében [12]

A 16. ábra különböző tömegszázalékban ZrO_2 nanorészecskéket tartalmazó Sn-Ag-Cu forraszok szakadása utáni felületeinek SEM-felvételeit mutatja. Az ábra (a) képén egy simább felület látható, amiből arra lehet következtetni, hogy ZrO_2 mentes SAC forrasz esetén a szakadás rideg törési módon következett be. A 0,5 (b), 1 (c), 3 (d) tömegszázalékú esetekben a törés utáni felület sokkal durvább.

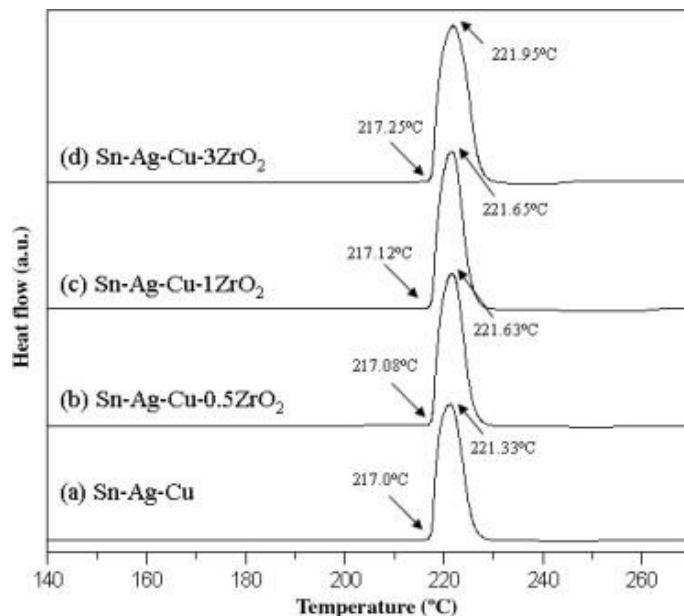


16. ábra Az ólommentes Sn-3,5Ag-0,5Cu-xTi forraszanyagok SEM-mikroszkópos felvétele. [12]

Összességében az ábra azt mutatja, hogy a ZrO_2 nanorészecskék jelenléte a forraszban jelentősen befolyásolja a szakadás típusát és az anyag szilárdságát. Az egyes tömegszázalékoknál különböző szakadási típusokat figyeltek meg, amelyek hatással lehetnek az alkalmazási területükre és a forrasztott alkatrészek megbízhatóságára.

3.5.2 Olvadás vizsgálata

A 17. ábra az Sn-Ag-Cu forraszanyagok differenciál pásztázó kalorimetriás (DSC) eredményeit mutatja a ZrO₂ nanorészecskék tartalmától függően (a) 0, (b) 0,5, (c) 1 és (d) 3 tömegszázalék.

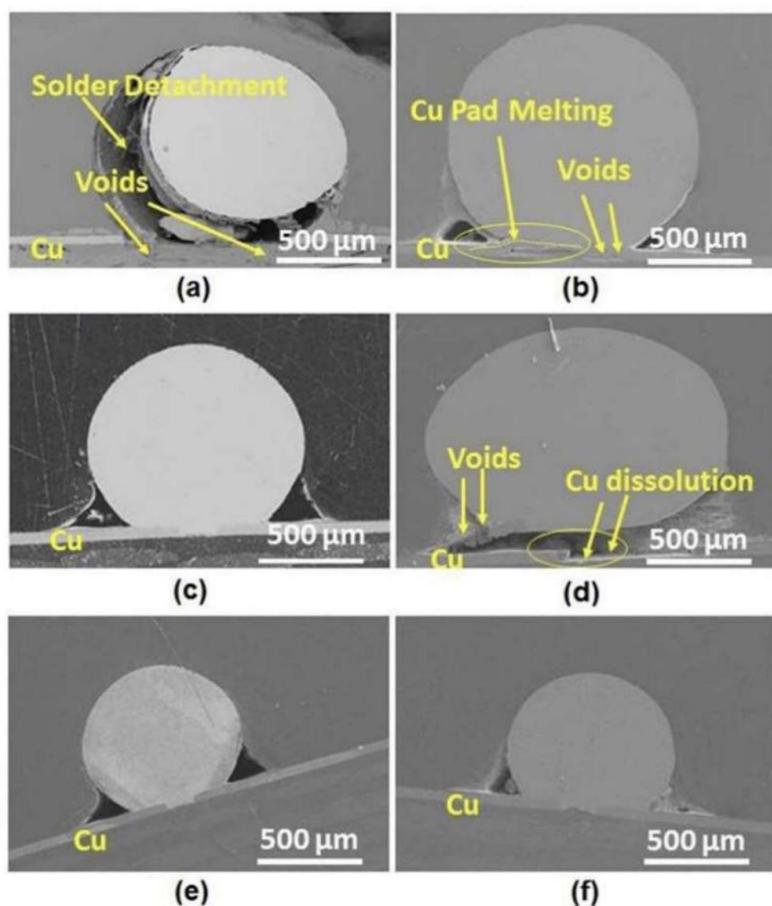


17. ábra DSC eredmények [12]

A DSC működési elve az, hogy a minták és a referenciaanyag hőmérsékletét egyidejűleg mérik, amíg egy előre meghatározott hőmérsékleti program alapján felmelegítik őket. A mérési adatokat kiértékelik a hőmérséklet és a hőmennyiség függvényében. A DSC eredmények azt mutatták, hogy az erősítetlen Sn-Ag-Cu forraszanyagok és a ZrO₂ nanorészecskéket tartalmazó forraszkötések olvadáspontja 217 °C és 217,25 °C között változott. A ZrO₂ nanorészecskékkel adalékolt Sn-Ag-Cu kompozit forraszanyagok esetében 1 °C-nál alacsonyabb olvadási hőmérsékletet mértek. Ezekből a DSC-profilokból megerősítést nyert, hogy az Sn-Ag-Cu kompozit forraszanyagok alkalmazásakor nem szükséges változtatni a meglévő forrasztási folyamat paraméterein, például az újraolvasztási hőmérsékleten, ha ZrO₂ nanorészecskékkel adalékolt SAC forraszokat alkalmaznak.

3.6 Elektromigrációs jelenség

Az elektronikus eszközök kis mérete és magas integráltsága miatt az áramkörökben folyó áram nagy koncentrációban halad át az érintkezési pontokon. Az áramkörben mozgó ionok által okozott elektromigráció (EM) jelensége az áramkör megbízhatóságára kritikus hatással van. A forraszanyagokba adalékolta részecskék csökkenthetik az elektromigrációs jelenség során kialakuló hibákat. Erre vonatkozó vizsgálatot folytatott Ashutosh Sharma és munkatársai, amikor különböző anyagokkal adalékolta SAC forraszok EM jelenségeit vizsgálta.

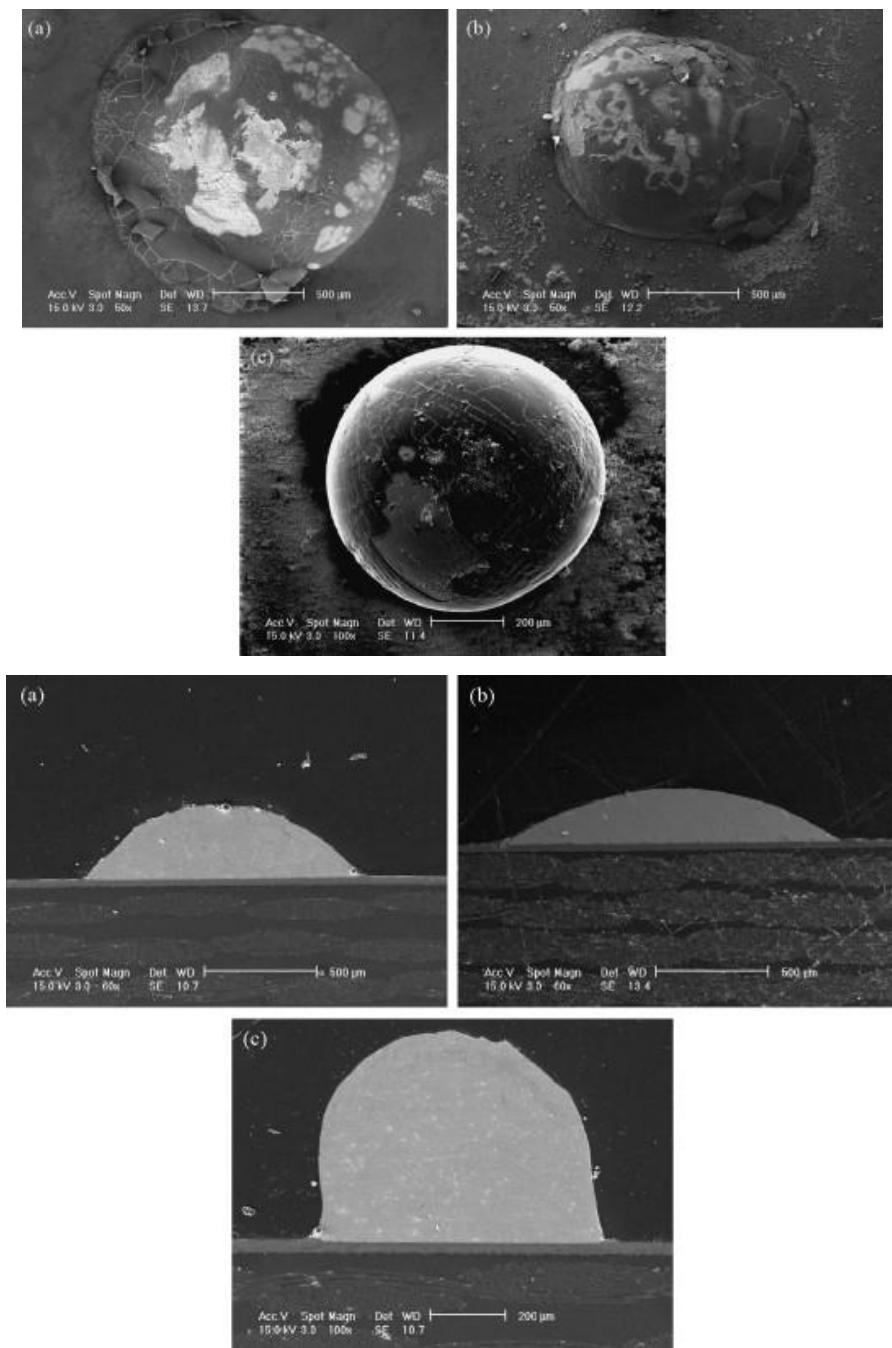


18. ábra Keresztmetszeti kép a (a) SAC, (b) SAC-Cu/CNT, (c) SAC-La₂O₃, (d) SAC-Graphene, (e) SAC-SiC, and (f) SAC-ZrO₂ forraszokról. (Az árammal való terhelés 4 óráig tartott.) [13]

A (a) ábrán látható, hogy egy nagy üreg képződött a kontaktusban, ami a forrasz leválásához vezetett. Az üreg hatására az eredeti elektronút lecsökkent, ami tovább növelte az áramsűrűséget, így a forrasz könnyedén levált a felületről. (c) Amikor La₂O₃ nanorészecskéket adalékoltak a forraszanyaghoz, akkor azt tapasztalták, hogy sokkal kevesebb hézag alakult ki. Az (e) és (f) ábrán látható, hogy azon esetekben amikor SiC és ZrO₂ anyaggal adalékoltak nem volt megfigyelhető meghibásodás a terhelés során.

3.7 Nedvesítőképesség

J. Shen, Y.C. Chan kutatók azt vizsgálták, hogy SAC forraszba Ag és ZrO₂ nanorészecskéket adagolva hogyan változik az eredeti forrasz nedvesítőképessége. Sn–3.5Ag–0.5Cu forraszt használtak alapanyagként és kétoldalas rézzel bevont nyomtatott áramköri lapot.



19. ábra SEM-felvételek a Cu rétegre forrasztott forraszgolyókról (a) eredeti, (b) Ag nanorészecskékkel adalékolt és (c) ZrO₂-vel adalékolt. [14]

A képek alapján levonható következtetés, hogy Ag adalékolás hatására a nedvesítőképesség javul, mivel nagyobb felületen terült el a forrasz, ugyanakkor ez a (c) esetre nem mondható el, mivel itt romlott a felülettel bezárt szög.

4 Ón whisker

Az elektronikai eszközök számos extrém körülménynek vannak kitéve. A whisker növekedés szempontjából az egyik legkritikusabb, amikor a forraszoknak nagy hőmérséklet ingadozást kell elszenvedniük. A modern elektromos autókban számos alkatrész található, melyek ki vannak téve ilyen szélsőséges viszonyoknak. Egy elektronikus vezérlőegység hőmérséklete változhat akár 50°C és 125°C között is. A repülőgépeknél, illetve az ūrtechnológiában is hasonló igénybevételnek vannak kitéve a forrasztott kötések, továbbá ezeknél a felhasználási területeknél még nagyobb hangsúly van a megbízhatóságon. Sajnálatos módon előfordult már a történelem során, hogy éppen a whisker növekedés okozta problémák vezettek egy repülőgép elektromos rendszerének meghibásodásához. Egy föld körüli pályán keringő műhold kőmérséklete -50 °C-ról akár 125 °C-ig is emelkedhet és ez a rendkívül nagy hőmérsékletváltozás az elektromos rendszer egész élete során ciklikusan többször is újra lejátszódik. Ráadásul egy ilyen problémás környezetben kell stabilan működnie, mivel egy esetleges meghibásodás alkalmával a műhold javítása nagyon körülményes vagy akár kivitelezhetetlen. Tehát ezek alapján belátható, hogy az elektronikus eszközeink megbízhatóságának garantálása akár extrém körülmények mellett is alapvetően fontos. Ez viszont nagyon nehéz feladat az ólommentes forrasztási technológia esetében.

4.1 A whisker növekesés ónozott felületen

A hordozókon kialakított ón réteg szemcsés struktúrájú. Ezek a szemcsék képesek elmozdulásra, ha valamilyen erőhatás éri őket. Az ónrétegen olyan mechanikai feszültségek, amelyek képesek ilyen erőhatásokat kelteni és ezzel elmozdítani a szemcséket. A rétegen fellépő mechanikai feszültségeknek több forrása is lehet.

A mechanikai feszültségeknek 5 csoportja van [15]:

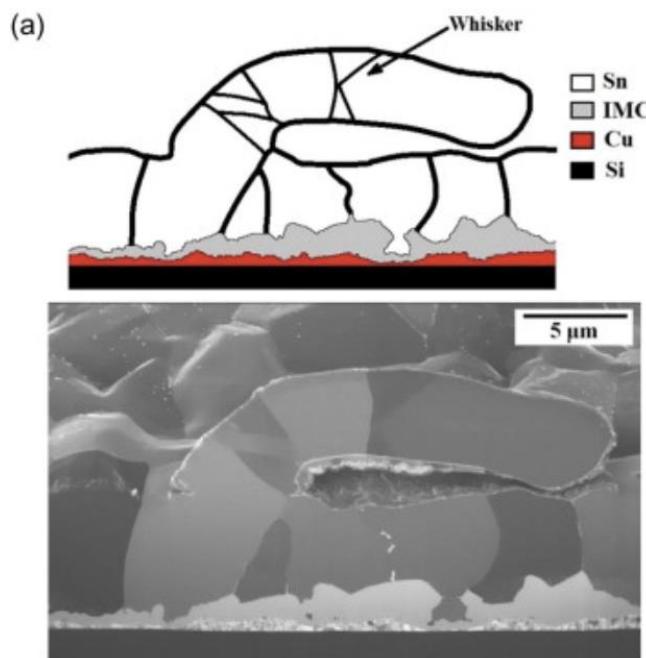
- Szobahőmérsékleten a réz és az ón határfelületén létrejövő intermetallikus réteg növekedéséből fakadó feszültség
- Külső forrásból érkező feszültség
- Elektromigrációs feszültség
- Oxidációból fakadó feszültség
- Eltérő hőtárolási együtthatóból származó feszültség

A legtöbb esetben az IMC réteg növekedése eredményezi a whiskereket, mivel ez szabahőmérsékleten is jelen van. Azonban, ha ezt a többrétegű struktúrát melegítik, akkor az eltérő hőtárgulási együtthatókból (Coefficient of Thermal Expansion) kifolyólag másfogya fognak tágulni a rétegek és így is ki tud alakulni feszültség a rendszerben.

Hőtárgulási együtthatók különböző anyagoknál:

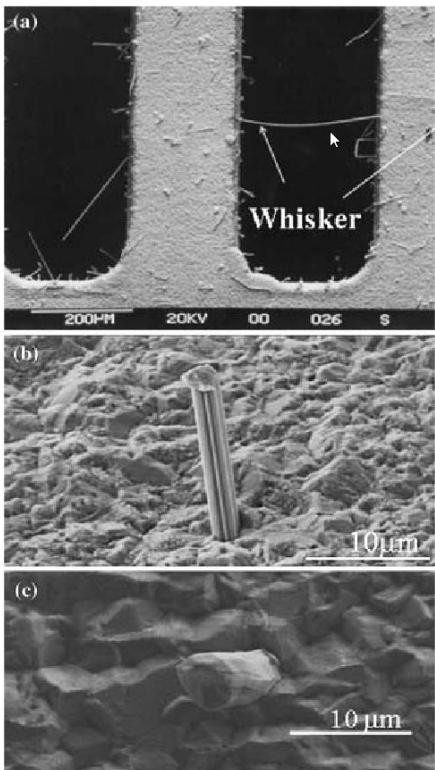
- Al_2O_3 : 7×10^{-6} /celsius
- BaTiO_3 : 10×10^{-6} /celsius
- Sn: 25×10^{-6} /celsius
- Ni: 13×10^{-6} /celsius

A whisker növekedés egy spontán folyamat, ahol a szálak alakjára és méretére sem lehet előre következtetni. A folyamat vákuumban is jelen van, így nem feltétlen szükséges hozzá oxidáció. A whiskerek növekedését befolyásoló tényezők közé tartoznak az ónozott felület alakja, az ónréteg vastagsága és mikroszerkezete, a szemcsék alakja, mérete és orientációja, az ónbevonathoz hozzáadott ötvöző anyagok.



20. ábra Ón whisker [4]

[4] A képen Si hordozóra gőzzel réz réteget választottak le és erre galvanizáltak vékony ón réteget. Az ón rétegen a szemcsék oszlopos formában figyelhetők meg. Az Sn felületét vékony oxidréteg borítja, tipikus vastagsága 5 nm, de ez nem látható. A felülettel párhuzamosan whisker növekedett.



21. ábra Ón whiskerek

[15] A whisker-ek megjelenésének megakadályozza lehetséges nikkel réteg használatával. Ha nikkel réteg helyezkedik el az Sn réteg és a hordozó között (például: Al_2O_3), akkor a whisker-ek számának és méretének csökkenése lesz tapasztalható szobahőmérsékleten. Mivel a nikkel hőtágulási együtthatója az ón és a hordozó (például: Al_2O_3) között van, ezért egy buffer rétegként viselkedve felszabadít némi feszültséget a rétegek között. Thermal cycling során fellépő terhelést már nem képes kiküszöbölni, így ilyen körülménynél már megszűnik a jótékony hatása.

4.2 Whiskerek növekedése SAC forrasztott kötésekben

Az ólmos forraszok idejében a whisker-ek növekedése nem volt jelentős probléma, mivel az ólomtartalom hatékonyan vissza tudta szorítani a whisker-ek megjelenését a forrasztott kötésekben. Az ólommentes forraszokra való átállás azonban sok felderítetlen területet rejtett. Többek közt azt, hogy milyen módon növekednek a whisker-ek ólommentes esetben. A közelmúltban számos vizsgálat született a jelenség tisztázására. A kísérletek eredményi azt támasztották alá, hogy az ólommentes forraszokon nagyszámú whisker képes megjelenni, továbbá azt, hogy megjelenésüket sok tényező befolyásolni.

Szobahőmérsékleten növekedett whiskerek. Némelyik elég hosszú ahhoz, hogy két szomszédos leadframe-et összekössön.

Egy hosszú whisker SEM-felvétele eutektikus SnCu felületen.

Tiszta ón felületen csak kisebb dombok figyelhetők meg.

4.2.1 Whisker növekedés korrozió hatására

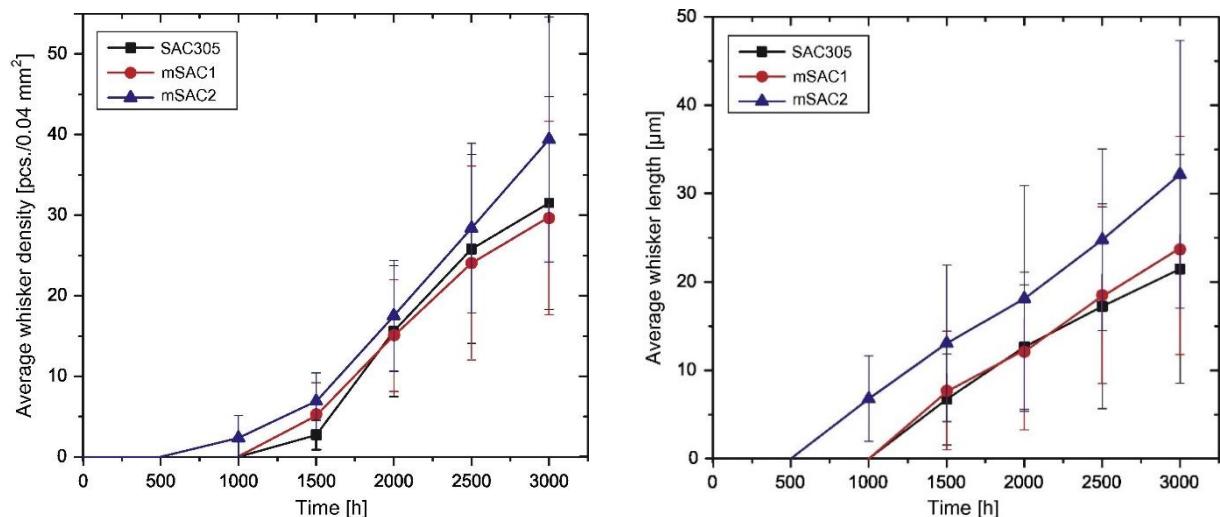
Magas páratartalmú környezetben a forrasz korrodálódni fog. A korrozió képes behatolni a forraszba és ott tovább terjedni, mellyel feszítő hatást idéz az anyagban. Az anyagban fellépő feszültség whiskerek formájában fog felszabadulni.

Illés Balázs és Horváth Barbara a whiskerek növekedését vizsgálta SAC forrasztott kötésekben korroziót előidéző környezetben [16]. Kétfajta forrasz használtak a kísérlethez: SAC305 (SnAgCu) és mikroötvözött SAC (SnAgCu + Bi + Sb) forraszanyagot. Szokványos FR4-es hordozóra 0805-ös méretkódú ellenállásokat immerziós ónnal bevont réz kontaktusfelületre forrasztottak infravörös kemencében. A whiskereket emelt hőmérséklet mellett magas páratartalommal idézték elő. A teszt időtartama 3000 óra volt.

A vizsgált forraszanyagok összetétele:

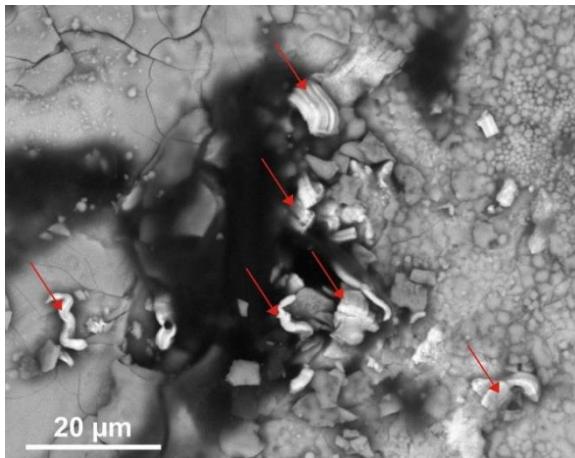
| forraszötözet | Sn | Ag | Cu | Bi | Sb |
|---------------|------|-----|-----|-----|------|
| SAC | 96.5 | 3.0 | 0.5 | - | - |
| mSAC1 | 98.4 | 0.8 | 0.7 | 0.1 | - |
| mSAC2 | 98.9 | 0.3 | 0.7 | 0.1 | 0.01 |

A forraszokról 500 óránként felvételeket készítettek pásztázó elektromikroszkóppal, majd a feljegyezték a whiskerek átlagos sűrűségét és hosszúságát. Az eredmények az alábbi ábrákból olvashatók ki:



22. ábra Átlagos whisker hosszúság és sűrűség [16]

Első megfigyelhető dolog, hogy a whiskerek számában nagyobb különbség látható, mint a hosszúságukban, továbbá az, hogy a hosszúság lineárisan nőtt az idővel. Az első whiskert az ezredik óránál figyelték meg, viszont 3000 óra után már több száz whisker volt látható.



Az első whiskerek 1000 óra után.



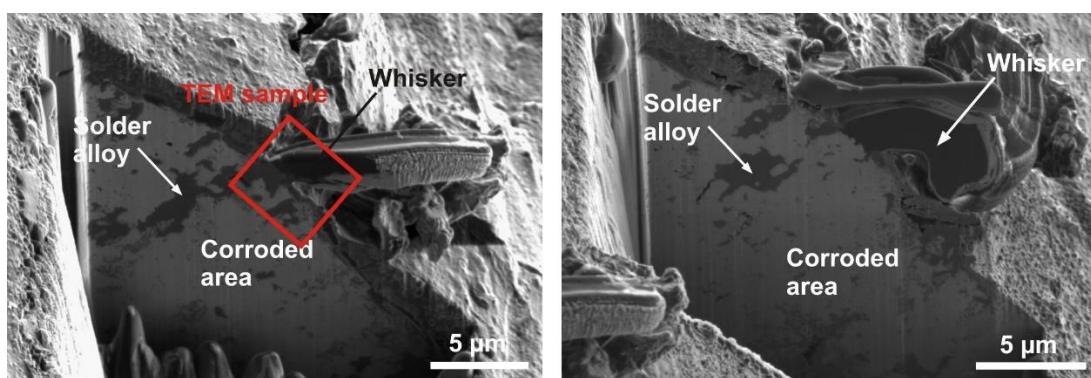
Több száz whisker 3000 óra után.

23. ábra Whiskerek a kötésekben ($85\text{ }^{\circ}\text{C}/85\text{RH\%}$, mSAC2) [16]

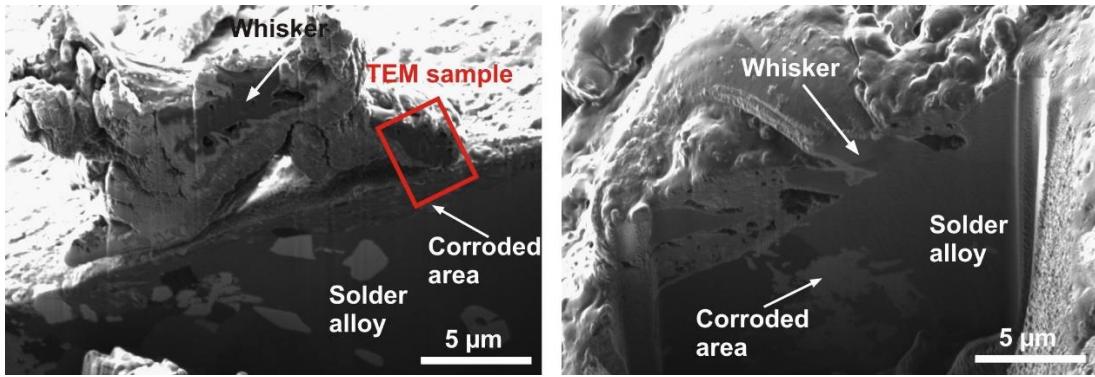
3000 óra eltelté után a leghosszabb whiskerek hosszúsága $65\text{ }\mu\text{m}$ volt (mSAC2). Manapság az elektronikai iparban alkalmazott minimális rasztertávolság $200\text{ }\mu\text{m}$, így annak a valószínűsége, hogy a whiskerek rövidzárák kialakulásához vezetnek az áramkörökben nagyon csekély, azonban nem lehet figyelmen kívül hagyni őket.

A tesztet 20% páratajtalom mellett is elvégezték, de ebben az esetben nem tapasztaltak whiskereket. Ebből az következik, hogy a whiskerek megjelenését nagyban befolyásolja az, hogy milyen páratajtalmaú környezetben alkalmazzák.

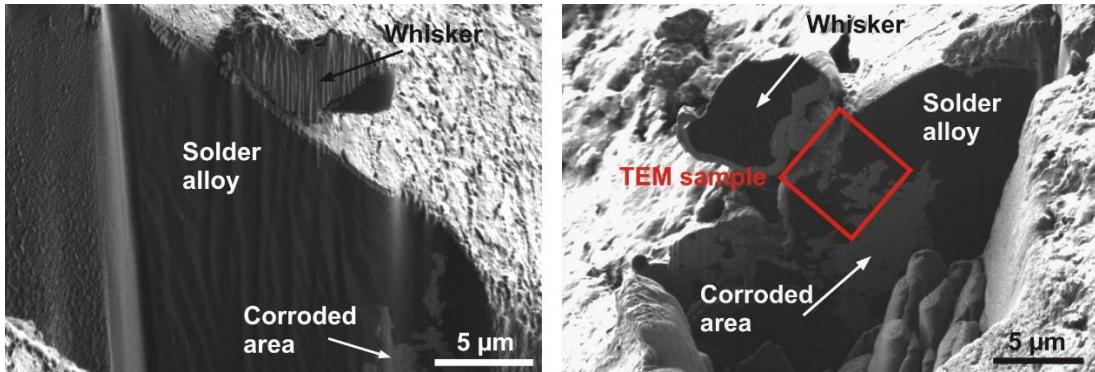
A három ötvözet közül a mSAC2 felületén sokkal több whisker volt megfigyelhető, mint a mSAC1 és SAC305 típusoknál. Erre az adhat magyarázatot, hogy az mSAC2-es típus sokkal hajlamosabb a korrózióra, mint a mSAC1 és SAC305 típusok.



24. ábra FIB felvételek az mSAC2 forrasztott kötéseken található whiskerekről [16] $85\text{ }^{\circ}\text{C}/85\text{RH\%}$ mellett 3000 óráig.



25. ábra FIB felvételek az mSAC1 forrasztott kötésekben található whiskerekről [16] 85 °C/85RH% mellett 3000 óráig



26. ábra FIB felvételek az SAC305 forrasztott kötésekben található whiskerekről [16] 85 °C/85RH% mellett 3000 óráig

A képeken látható, hogy az mSAC1 és SAC305 forrasztott kötésekben kevésbé korrodálódott a felület, mint a mSAC2-nél. Az mSAC2 kötésnél átlagosan 80%-os korrodálódott felület arányt figyeltek meg, míg az mSAC1 és SAC305 kötésnél ez az arány 10% és 50% között volt.

4.2.2 Bizmut, szennyeződés és kontaktusfelület bevonatok hatása a whiskerek növekedésre

André M. Delhaise és csapata ónszálak kialakulását vizsgálta Bi-tartalmú, Pb-mentes SOT¹ alkatrészek forrasztott kötésein. A tanulmányban vizsgálták a szerelési tisztaság, bizmuttal, hőmérséklet, páratartalom és a felületkezelés hatását a whiskerek növekedésére [17].

A vizsgálathoz SOT alkatrészeket használtak. A forrasztott kötéseket szobahőmérsékletnek (25 °C) és emelt hőmérsékletnek (85 °C) tették ki magas páratartalom (85% RH) mellett. A kötések kialakításához 4 ötvözetet használtak:

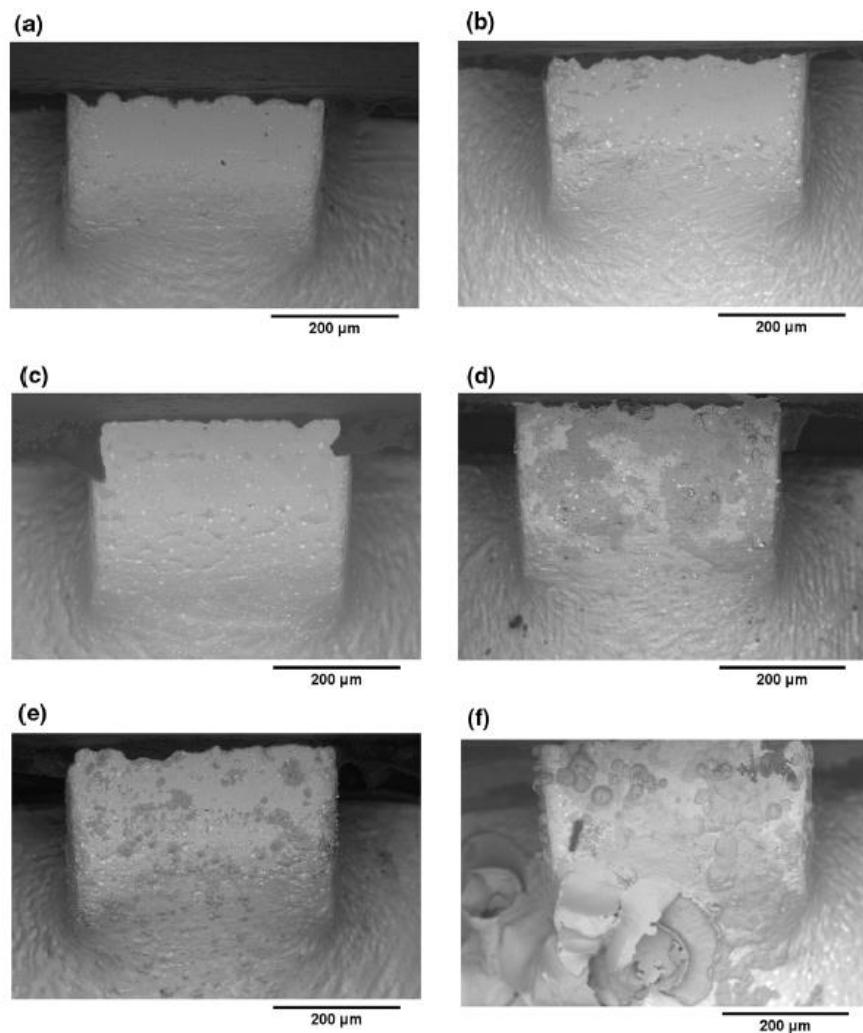
- Sn-2.0Ag-0.7Cu-3.0Bi (Senju)
- Sn-2.25Ag-0.5Cu-6.0Bi (Violet)

¹ small outline transistor

- Sn-0.7Cu-7.0Bi (Sunflower)
- Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305)

A forrasztott kötéseket ImmSn², illetve ENIG³ bevonat mellett vizsgálták, valamint egyes forrasztási felületeket szándékosan szennyeztek.

Az alábbi felvételek a Sn-2.25Ag-0.5Cu-6.0Bi anyagú kötésekről készítették. A képeken jól látható a szennyezés, felületkezelés és a környezet hatása a korrozióra.



27. ábra Korrozió összehasonlítása [17]

- a) ATHH⁴ tiszta, ENIG
- b) ATHH, tiszta, ImmSn
- c) ATHH, szennyezett, ENIG
- d) ATHH, szennyezett, ImmSn

² immersion tin

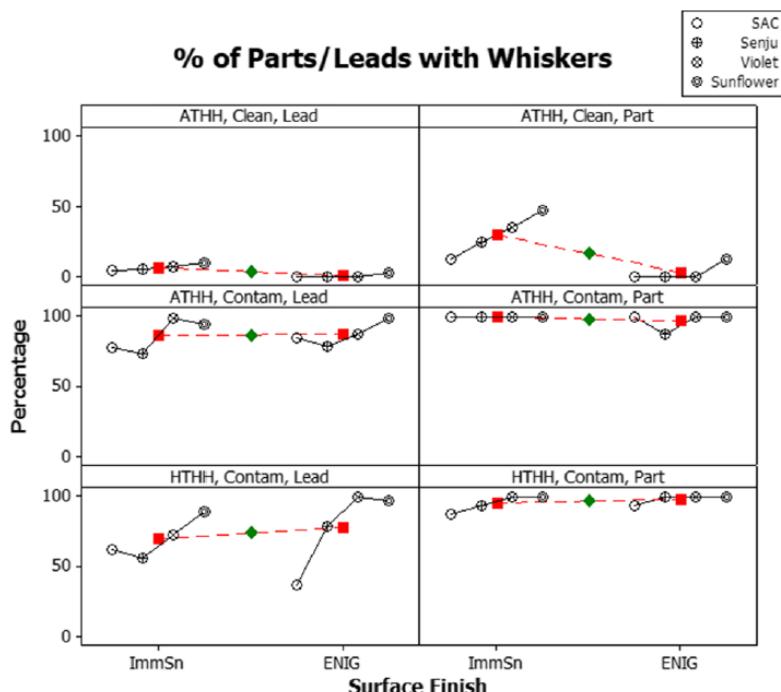
³ electroless nickel immersion gold

⁴ ambient temperature, high humidity

e) HTHH⁵, szennyezett, ENIG

f) HTHH, szennyezett, ImmSn

A szándékos szennyezés hatására azt tapasztalták, hogy a kötések sokkal inkább korrodálódtak. A különböző hőmérséklet is befolyásolta a korróziót. HTHH esetekben (c, d) jelentősebb korróziót tapasztaltak, mit az ATHH esetekben (e, f), továbbá az ENIG bevonattal ellátott felületek (a, c, e) ellenállóbbak voltak a korrózióval szemben, mint a ImmSn bevonatúak (b, d, f).



28. ábra Whiskerek száma kivezetésenként [17]

A kísérletük eredményei a fenti ábrában van összefoglalva. Az ábrán szereplő értékek azt jelentik, hogy az összes alkatrész/kivezetések különböző ötvözetei esetében hány százalékánál jelentek meg whiskerek. Megállapították, hogy az összes szennyezett esetben több whisker volt megfigyelhető a kötésekben, továbbá azt, hogy a magasabb hőmérséklet is több whiskert eredményezett. Az ATHH környezeti hatásnak kitett kötések, amik ImmSn bevonattal voltak ellátva kevesebb whiskert számoltak, mint az ENIG bevonatnál. A HTHH esetben viszont az előzővel ellentétben az ENIG-nél számoltak több whiskert.

A munkájukat összefoglalva a következőket lehet elmondatni: Bi tartalmú SAC forrasz ötvözeteiken a több whisker lesz megfigyelhető, mint a hagyományos SAC forraszokon. A felületek szennyezése növeli a korrodálódást és ezzel a whiskerek növekedését is, továbbá

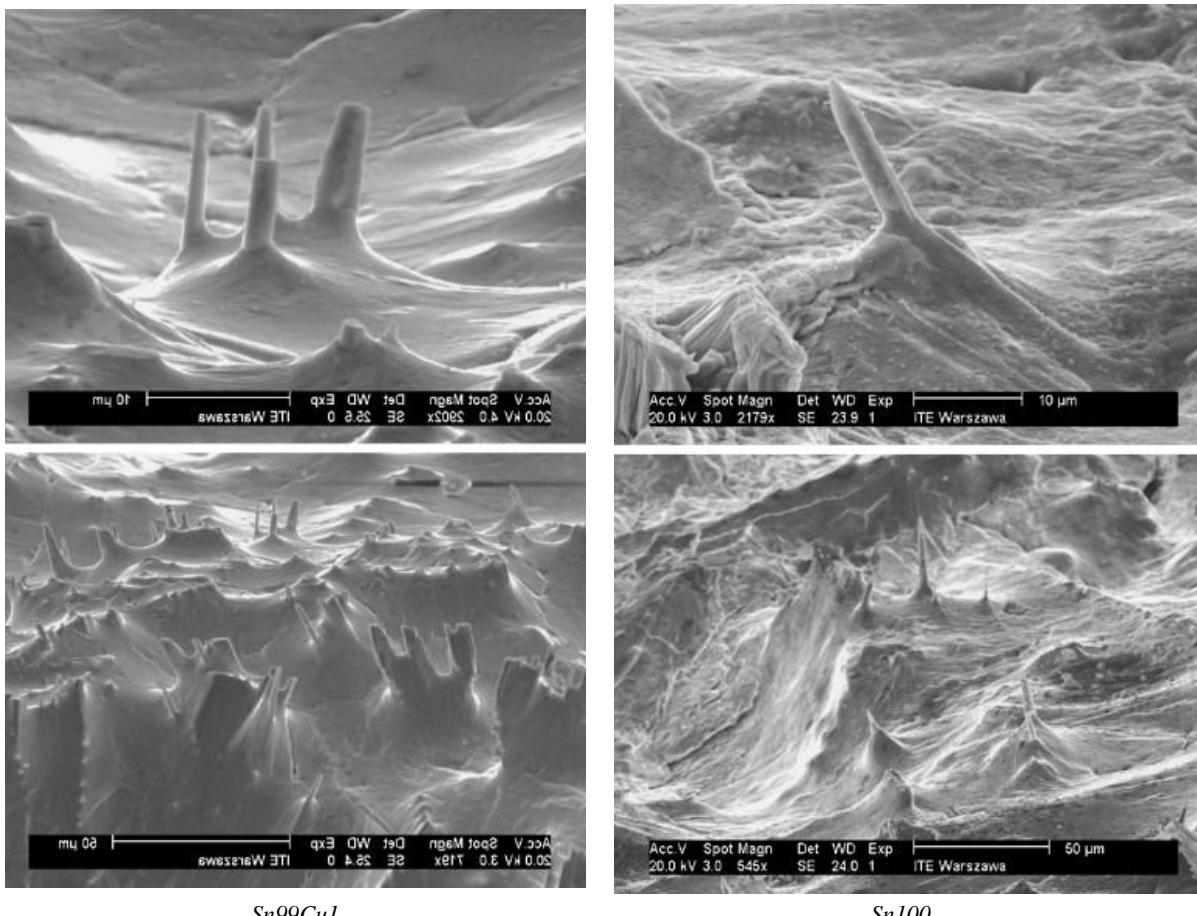
⁵ high temperature, high humidity

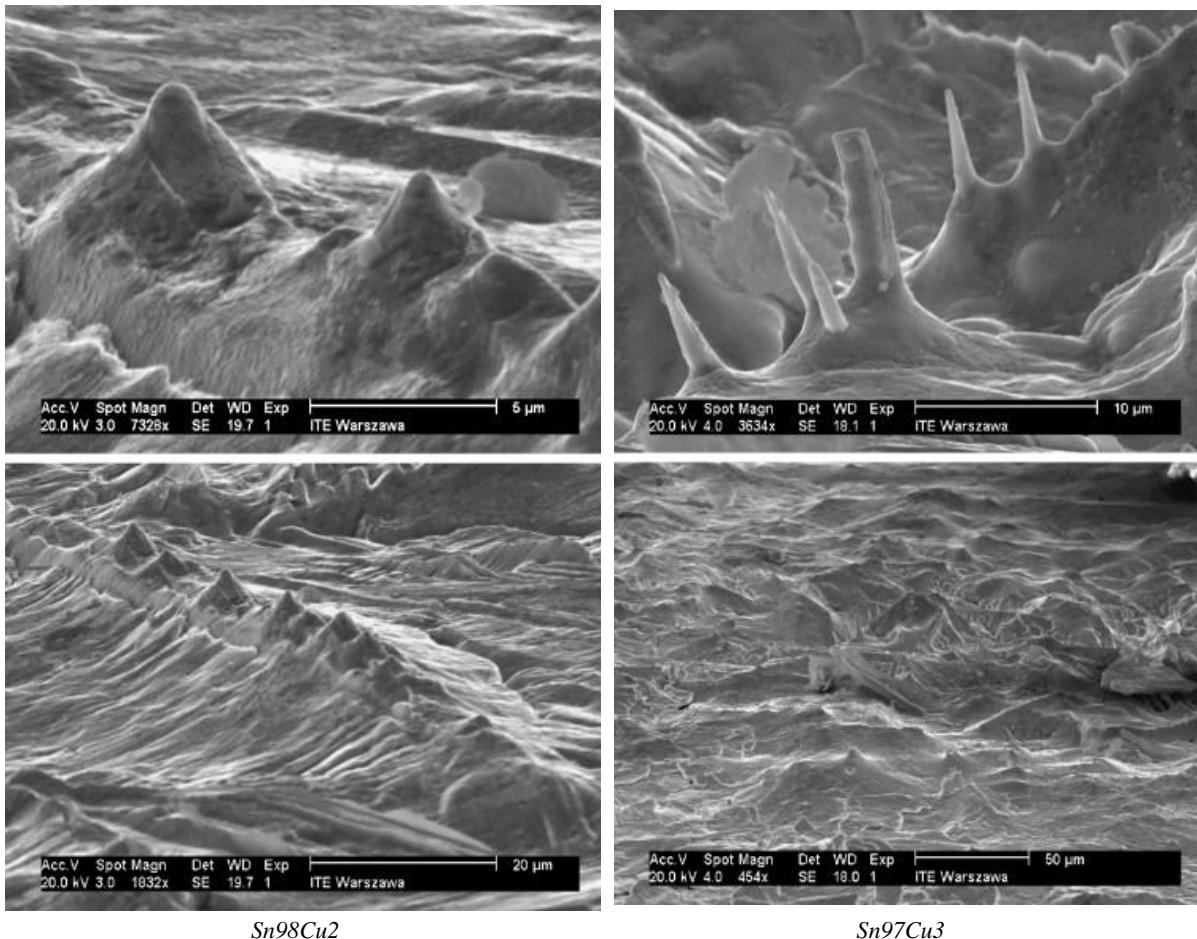
emelt hőmérsékleten általában több és hosszabb whiskerek alakulnak ki, de lehetnek olyan esetek, ahol szobahőmérsékleten is nagyszámú whisker lesz tapasztalható.

4.2.3 Réz hatása a whiskerek alakjára

A. Skwarek kollégáival whisker növekedés jelenségének megismerése érdekében folytatott kutatást. Üvegszálas epoxi hordozón réz felületre kézi forrasztással helyeztek ónban gazdag ötvözeteket. Tiszta ónt és Sn99.0Cu1.0, Sn98.0Cu2.0, valamint Sn97.0Cu3.0 ötvözeteket használtak a kísérlethez. A whiskereket hősök igénybevétellel idézték elő. A thermal shock teszt 1500 ciklusból állt és az egyes ciklusok húsz percig tartottak. minden ciklusban a hőmérséklet -45 °C-ról +85 °C-ra emelkedett [18].

Az alábbi képeket készítették pásztázó elektromikroszkóppal a felületekről.





29. ábra Whiskerek különböző alakban [18]

A tiszta ón felületen tűszerű whiskerek formája látható, míg a réz tartalmú ötvözletek felületén tűszerű alakú, de tompa hegyű vagy hillock alakú whiskerek találhatóak. Sn97Cu3 ötvözet esetében szálszerű éles hegyű whiskerek is kialakultak, de ez azért lehetett, mivel egy karc hatására plusz mechanikai feszültség alakult ki a felületen. A kutatás konklúziója, hogy termikus sokk igénybevétel esetében réz hozzáadása tompább whiskereket eredményez.

5 ZrO₂ és CuO hatása a forrasztott kötésekre

5.1 Nyíroszilárdság vizsgálat

5.1.1 Előkészítés

A kísérletem célja az volt, hogy megvizsgáljam milyen hatással vannak a ZrO₂ és CuO nanorészecskek SAC forrasz szilárdságára. Ezekre az anyagokra esett a választás, mivel az adott időszakban a ZrO₂ és CuO részecskek voltak könnyen hozzáférhetőek az egyetemi laboratóriumokban, ezért úgy döntöttem, hogy ezeket a részecskéket fogom vizsgálni a forrasztóanyag szilárdságának javítása érdekében.



30. ábra CuO nanorészecske, ZrO₂ nanorészecske és ZrO₂ nanoszál.

A mai tudományos publikációk alapján feltételeztem, hogy az adalékok hozzájárulhatnak a forrasztóanyag szilárdságának növekedéséhez. A vizsgálat során három különböző anyagot használtam fel: ZrO₂ nanorészecske, ZrO₂ nanoszál és CuO nanorészecske. A mechanikai szilárdság méréseket alapvetően három csoportba lehet osztani. Legegyszerűbb mérési módszer amikor tömbi forraszmintát húznak és mérik meg a szakítószilárdságát. Ilyenkor a mérés csak a minta anyagi tulajdonságaitól fog függeni. A második módszer, amikor kötés jellegű elrendezésben van a forrasz. Ebben az esetben már a létrejött IMC réteg is befolyásoló tényező lesz. A harmadik típusnál pedig egy valós alkatrészen végzik a mérést. Ilyenkor már a forrasz alakja is módosítja a mérési eredményeket. A saját kísérletem elvégzéséhez a harmadik típust választottam, mivel ez képes legjobban szemléltetni a valóságos körülményeket.

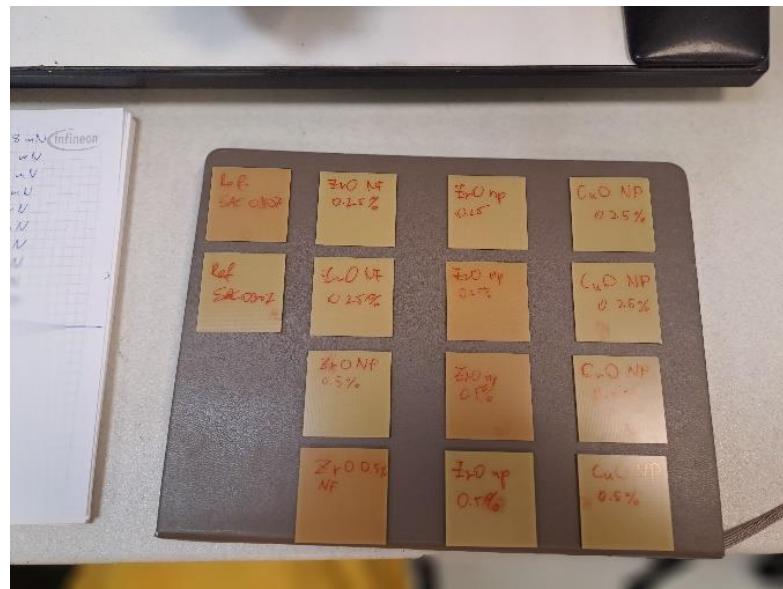
5.1.2 Tesztpanelek elkészítése

A kísérlethez speciális tesztpanelek kerültek gyártásra, amelyeken a nyírószilárdság vizsgálatokat végeztem. Összesen 14 tesztpanel került legyártásra. Az alkatrészek üvegszál erősítésű epoxigyanta hordozóra lettek felforrasztva. minden panelen összesen 50 darab SMT ellenállás található. A forrasztás nem minden esetben volt tökéletes, több helyen sírkő effektus volt megfigyelhető.

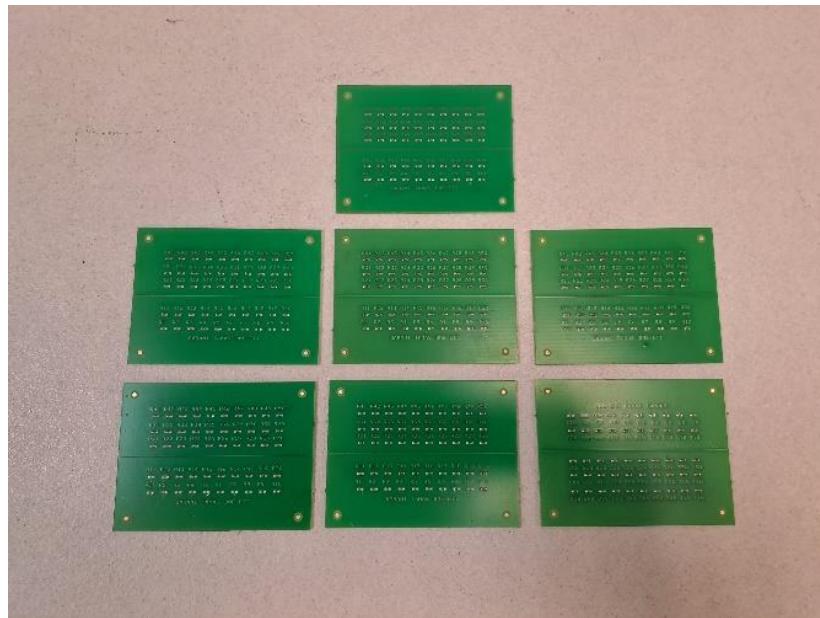
| | | | |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| 2 db referencia panel SAC0307 | 2 db ZrO_2 NP 0.5 t% | 2 db ZrO_2 NF 0.5 t% | 2 db CuO NP 0.5t% |
| | 2 db ZrO_2 NP 0.25 t% | 2 db ZrO_2 NF 0.25 t% | 2 db CuO NP 0.25t% |



31. ábra Keverőedény



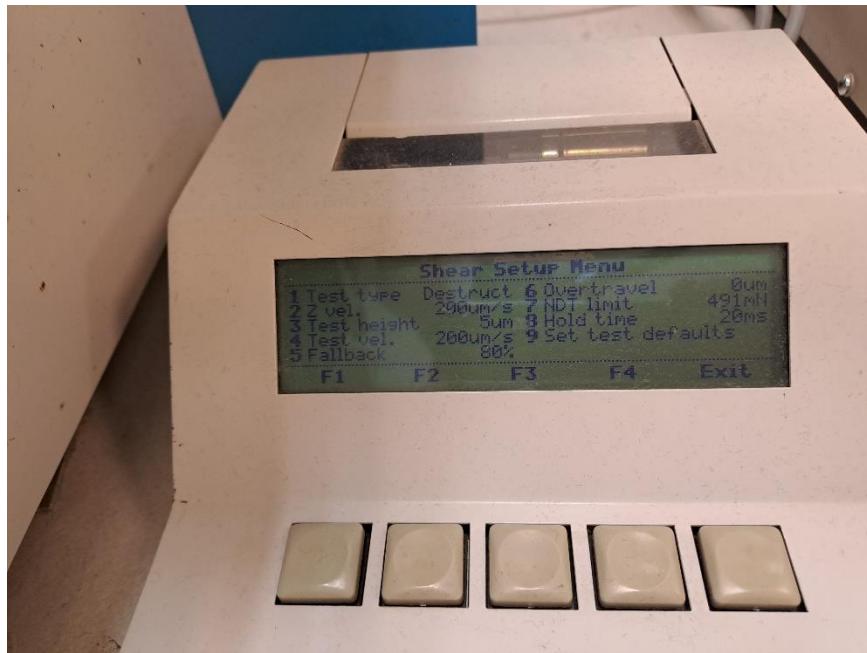
32. ábra Tesztpanelek



33. ábra Tesztpanelek

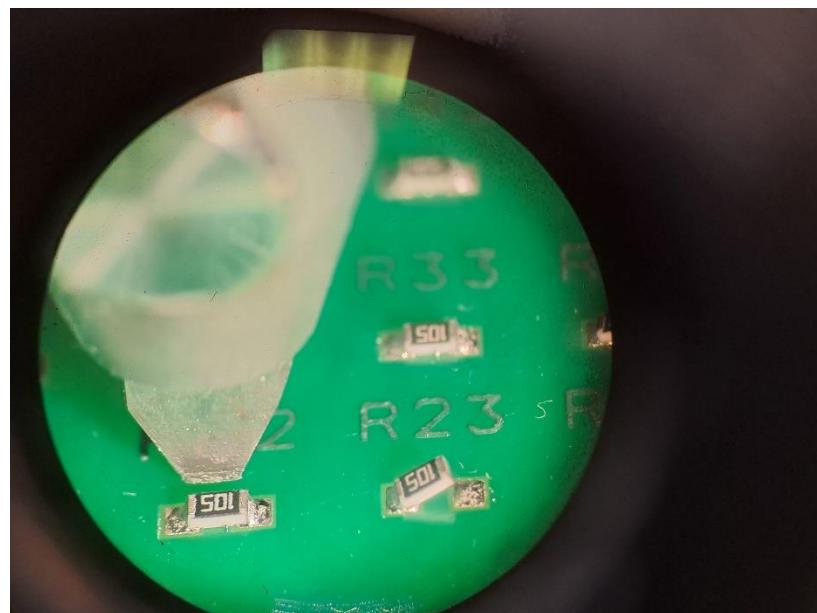
5.1.3 Nyíroszilárdság mérése

A nyíroszilárdság vizsgálatát Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem V1 épületének V1C-020 laboratóriumában található DAGE 2400 típusú letoló-erő mérő berendezéssel végeztem Halim Choi koreai PhD doktorandusszal együtt. A kísérletet a mellékelt gépköny és a használati utasítás tanulmányozásával kezdtem. Miután tisztában voltam a berendezés helyes kezelésével és a balesetvédelmi előírásokkal, meggyőződtem arról, hogy a letolófej és a munkaasztal szabad mozgását semmi nem akadályozza. Ez után megkezdődhetett a gép bekapcsolása, majd a folyamat paramétereinek beállítása (letolási sebesség, letolószerszám magassága, érzékelési küszöb). A letolási sebesség határozza meg, hogy milyen sebességgel halad a letolófej. Fontos, hogy a sebesség ne legyen túl gyors vagy túl lassú. Ha túl gyors a letolás, akkor a mért eredmények torzulhatnak, mert a letolóerő mérő nem tudja pontosan érzékelni a változásokat. Ha túl lassú a letolás, akkor pedig hosszabb ideig tart az egyes mérések végrehajtása. Ezeket a szempontokat figyelembevéve 200 $\mu\text{m}/\text{s}$ -ra állítottam a letolási sebességet. A letolószerszám magasságát úgy állítottam be, hogy pontosan a letolandó ellenállás közepén legyen elhelyezve. A magas pozíció forgató erőhatást gyakorolna az ellenállásra, ami helytelen eredményekhez vezetne. Az alacsony pozícionál pedig a letolófej beleszántana a panelbe, aminek szintén káros következményei lennének. Érzékelési küszöb pedig azt határozza meg, hogy mekkora letolóerő változást kell észlelnie a letolóerő mérőnek ahhoz, hogy regisztrálja azt.



34. ábra A mérés során beállított paraméterek.

A gép paramétereinek meghatározása és beállítása után következett a mérés. A paneleket nagy odafigyeléssel elhelyeztem a munkaasztalon, megbizonyosodva arról, hogy az nem billeg és nem fog elmozdulni, ha a letolószerszám erőt fejt majd ki a panelre. Erre azért van szükség, hogy a mérés elvégzésénél az eredmények helyesek legyenek. A panelek elhelyezése után az Y-Z karral pozícionáltam a letolófejet. A pontos pozíció eléréséhez segítségemre volt a berendezésen található mikroszkóp, amin keresztül nagy pontossággal be lehetett állítani a letolófej pozícióját.

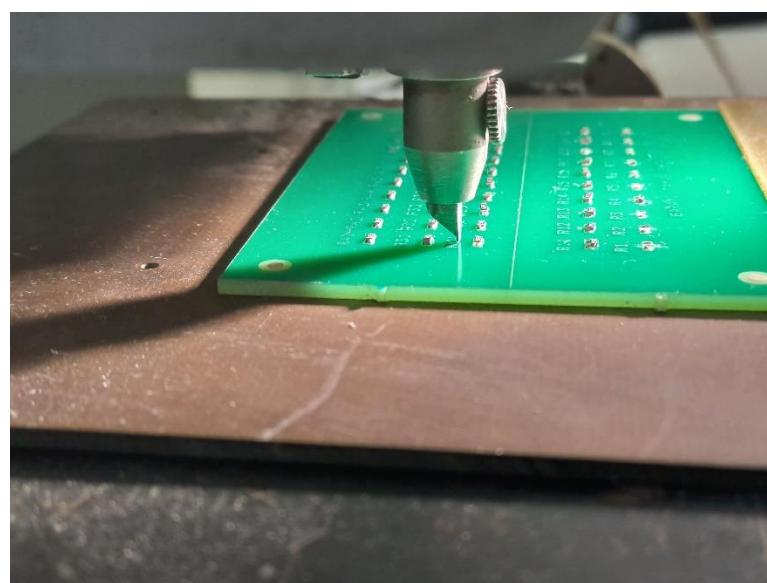


35. ábra Pozícionálás mikroszkóp segítségével.

A mérés folyamán mindenkorban figyeltem, hogy a folyamat során a ruhám, vagy kezem semmiképp se akadjon, bele az alkatrészekbe. A test gomb megnyomásával indult a mérés. A letolófej egyenes irányban letolta az ellenállást a panelről, majd a maximálisan kifejtett erőt megjelenítette a kijelzőn. Az összes panelen sorról sorra haladva elvégeztem a mérést és feljegyeztem a kapott eredményeket. Azokon az ellenállásokon nem végeztem el a mérést, ahol a forrasztás szemmel láthatólag nem volt megfelelő. Ilyen volt például az 35. ábrán látható panelen a jobb alsó R23-as ellenállás (sírkő effektus).



36. ábra A mérés folyamata 1



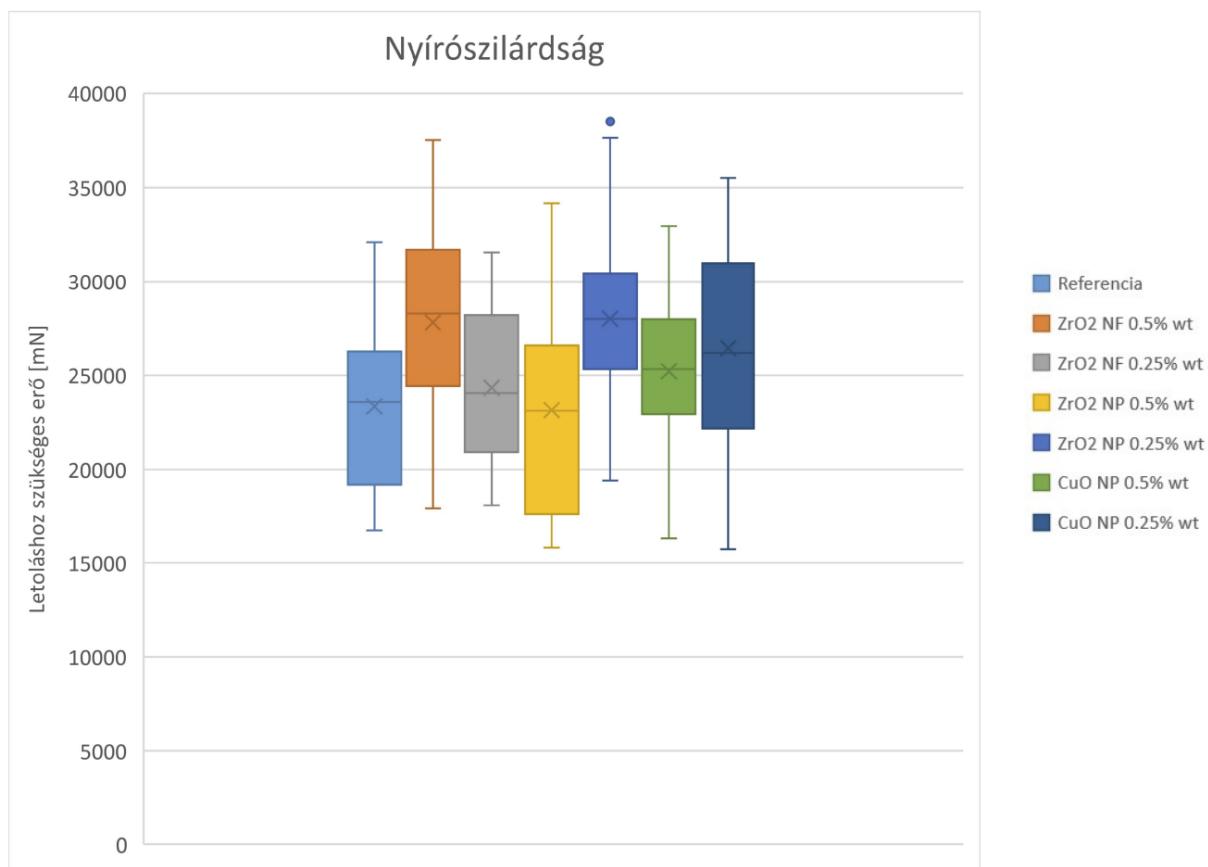
37. ábra A mérés folyamata 2

5.1.4 Mérési eredmények

| mN | Referencia | ZrO ₂ NF 0.5t% | ZrO ₂ NF 0.25t% | ZrO ₂ NP 0.5t% | ZrO ₂ NP 0.25t% | CuO NP 0.5t% | CuO NP 0.25t% |
|-------|------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|
| R1 | 25624 | 30215 | 22975 | 15867 | 25428 | | 21327 |
| R2 | 22367 | 31490 | 18109 | | | 23132 | 32393 |
| R3 | 25840 | | 28783 | 34158 | 28822 | 22740 | 25820 |
| R4 | 26624 | 34374 | 20228 | 24721 | 25231 | | 23034 |
| R5 | | 28272 | 18992 | 23112 | 26016 | 25428 | 32726 |
| R6 | | 28508 | | | 27625 | 26644 | 35512 |
| R7 | 22818 | 31902 | 31549 | 25977 | 37631 | | 30646 |
| R8 | | 34198 | 24054 | 23485 | 27998 | 23564 | |
| R9 | | 37513 | 22661 | 22740 | 28959 | 32020 | 24290 |
| R10 | | 21582 | 24427 | | 30156 | 26546 | 30136 |
| R11 | 23583 | 33040 | 28076 | | | 27605 | 28881 |
| R12 | 32098 | 31000 | 19208 | | 38494 | | 15775 |
| R13 | 18580 | 23760 | 25938 | 29724 | 32353 | 25105 | 17089 |
| R14 | | 28370 | 22700 | 27174 | 21798 | 32962 | 31314 |
| R15 | 30019 | 28017 | 28292 | 20169 | 27978 | 25879 | 26173 |
| R16 | | 27036 | 21386 | 32922 | 30725 | 25329 | 20150 |
| R17 | 28194 | 25447 | 28429 | 17501 | 25545 | 22720 | 25898 |
| R18 | 20248 | 18697 | 30666 | | 22798 | | 19424 |
| R19 | 18345 | 17933 | 23054 | | 19424 | | 29195 |
| R20 | 19797 | 19483 | 26585 | 17030 | 27978 | 28312 | 33884 |
| R21 | 23858 | 25094 | 20444 | 16893 | 22642 | 23799 | 24898 |
| R22 | 16971 | | | 17776 | 32314 | 17815 | |
| R23 | | | | 17854 | | 28940 | |
| R24 | 25898 | | | 25133 | | 28920 | |
| R25 | | | | 21366 | | 16363 | |
| R26 | 17952 | | | 32864 | | 20366 | |
| R27 | 27547 | | | 16422 | | | |
| R28 | | | | | | | |
| R29 | | | | | | | |
| R30 | 16775 | | | | | | |
| R31 | 23603 | | | | | | |
| Átlag | 23337,05 | 27796,55 | 24327,8 | 23144,4 | 27995,75 | 25209,45 | 26428,25 |

5.1.5 Az eredmények grafikus megjelenítése

Ahol nincs feltüntetve érték ott az ellenállás rosszul volt felforrasztva a felületre így ott nem született mérési eredmény. A táblázat értékeit szemügyre véve a számértékek között viszonylag nagy a szórás. Ez azért lehet, mivel a forrasztott kötés szilárdságát nem csupán a forrasz anyaga, hanem a forrasztás minősége is befolyásolja. Egyes kötések jobbra sikeredtek, mint mások, ezért lehetnek ekkora szórások a mérések között. Sok mérési elvégzése után azonban szemmel látható, hogy van változás az adalékolás hatására.



5.1.6 Eredmények összegzése

Az alábbi táblázat tartalmazza a kísérlet végeredményét. Az eredményeket kiátlagolva ás az átlagértékeket sorba rendezve a következő adódott:

| Referencia | |
|-----------------------------|-------------|
| ZrO ₂ NP 0.25 t% | 27995,75 mN |
| ZrO ₂ NF 0.5 t% | 27796,55 mN |
| CuO NP 0.25 t% | 26428,25 mN |
| CuO NP 0.5 t% | 25209,45 mN |
| ZrO ₂ NF 0.25 t% | 24327,8 mN |
| ZrO ₂ NP 0.5 t% | 23144,4 mN |

A 0.5 tömegszázalékban ZrO₂-vel adalékol minta kivételével minden esetben javult a forraszok szilárdsága. A legjobb két eset a ZrO₂ NP 0.25 t% és a ZrO₂ NF 0.5 t% volt. Itt megközelítőleg 5000 mN-os az átlagos javulás. A többi esetben is volt számottevő különbség. Az 5000 mN-os növekedés körülbelül 1.2 szeres javulást jelent. Az eredmények kimenetele nemcsak az anyagtól függött, hanem attól is, hogy azt nanorészecske, vagy nanoszál formájában került a forraszanyagba. Általánosságban az figyelhető meg, hogy a nanorészecskék által létrejött struktúra jobb szilárdsági tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a nanoszál által létrejöttek. Az is belátható, hogy nem minegy, hogy milyen tömegszázalékban keverjük az adalékokat a forraszba. A nanoszál 0.5 tömegszázalékú esetben ért el maximális szilárdságot, azonban a nanorészecskék kisebb tömegszázalékban adagolt esetben eredményezték a legjobb értékeket.

5.2 Megbízhatósági vizsgálat

5.2.1 A kísérlet célja

A kísérlet célja, hogy megvizsgáljam és összehasonlítsam a ZrO₂-al és CuO-al erősített SAC forraszokat megbízhatósági szempontból. Ennek érdekében Thermal Humidity Bias (THB) teszt volt elvégezve a paneleken. A THB teszt során a minták emelkedett hőmérsékleten magas páratartalomnak voltak kitéve, így egy gyorsított folyamattal következtetni lehet arra, hogy a forrasz teljes élete során milyen whisker növekedés viselkedést produkál. Az irodalomkutatásom során tanulmányozott publikációkból azt feltételezem, hogy az erősítés csökkenti a whiskerek növekedését a forrasztott kötésekben.

5.2.2 A kísérlet előkészítése és folyamata

A tesztpanelek, amelyeken a megbízhatósági vizsgálatok készültek hasonló módon kerültek kialakításra, mint a nyírószilárdság vizsgálat mintái. A kerámia részecskék CuO esetében nanorészecske formában voltak hozzáadva a pasztához, ZrO₂ esetében pedig nanoszál és nanorészecske formában. A forraszpaszta hagyományos pasztafelviteli módszerrel (stencilnyomtatással) lett a panelekre helyezve, majd az ellenállások pozícióba helyezése után kemencében alakultak ki a kötések. A panelek kialakítása és maga a kísérlet is a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem laborjaiban végződött Halim Choi doktorandusz segítségével. A THB teszt 85 °C és 85%-os relatív páratartalom mellett végződött. Az eredmények nyomon követése érdekében 1000 óránként SEM felvételek készültek a kötések felszínéről.

5.2.3 Vizsgálat folyamata

A forrasztott kötésekben kialakult whiskerek méretét a SEM képek aránymértéke segítségével tudtam meghatározni. Rengeteg kép készült a forraszokról és mivel minden kép beillesztése nem lett volna célravezető, ezért csak azokat a képeket illesztettem bele a dolgozatomba, amelyek az eredmények megértésében segítségül szolgáltak. A kötésekkel készült képeket értékeltem, végül egy konklúziót írtam, amiben összevettem az egyes forrasz típusok milyen eredményt hoztak.

5.2.4 A kísérlet eredményei

Eredmények 1000 óra után:

A kísérlet eredményeinek vizsgálatát azokkal a képekkel kezdtem, amelyek 1000 óra után készültek. 1000 óra elteltével a forrasztott kötések felületén csupán 2 esetben volt megfigyelhető whisker. Mindkét esetben CuO részecskével volt erősítve a kötés. Az 38. ábrán egy CuO 0.5 t% NP erősítésű SAC forrasztott kötés felszíne látható.



38. ábra 0.5 t% CuO (1000 óra THB)

100 μm -es aránymértéknél is jól látszik egy whisker pár, ami az ellenállás bal felső sarkánál volt található. A whiskerek egy közös pontból alakultak ki és görbe formájuk van, megközelítőleg 35 μm és 95 μm hosszúsággal. CuO 0.25 t% NP erősítésű SAC forrasznál is volt látható egy 66.5 μm hosszúságú whisker, ami ugyancsak görbe, ezt a 39. ábra mutatja.



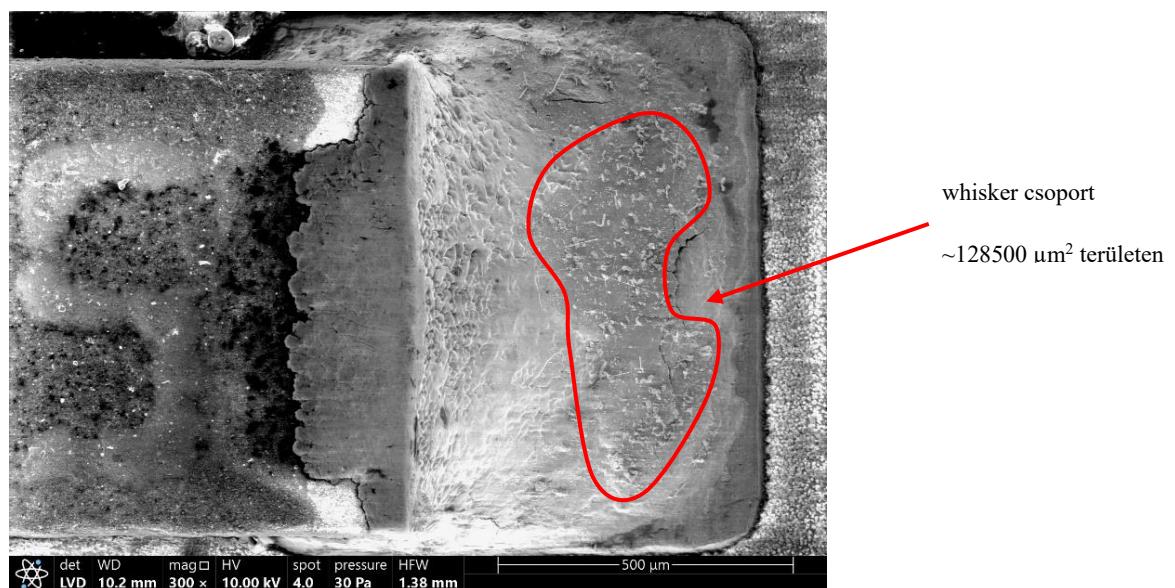
39. ábra 0.5 t% CuO (1000 óra THB)

Az eredmények alapján általánosságban megfogalmazható, hogy 1000 óra THB tesz után 85 °C és 85% relatív páratartalom mellett adalékolatlan és ZrO₂-al adalékolt forraszoknál nem fog

whisker kialakulni, továbbá CuO esetében pedig ritkán, csak néhány esetben lesz whisker tapasztalható. Ezek a whiskerek várhatóan 35-95 μm hosszúságúak lesznek, alakjuk pedig görbe, de ennek iránya előre nem meghatározható. A whiskerek előreláthatólag az alkatrész felső rövidebb élének környéké fognak kialakulni.

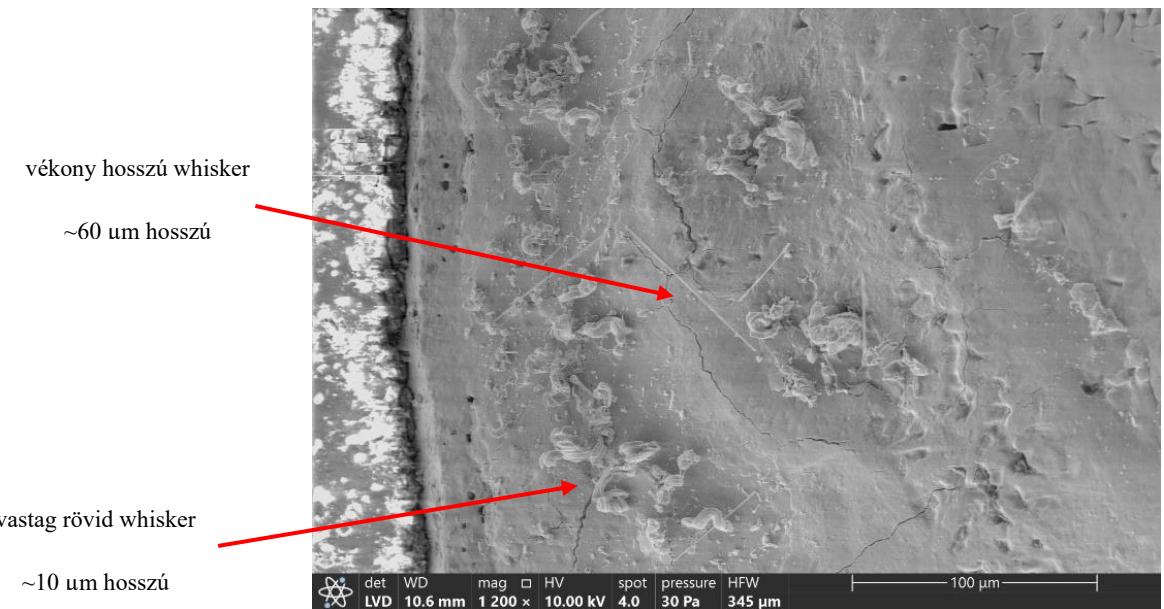
Eredmények 2000 óra után:

2000 óra eltelté után minden forrasztott kötés típusnál észlelhetőek voltak whiskerek valamilyen formában. A CuO 0.5 t% NP esetben volt a legjelentősebb whisker növekedés. Itt egész nagy területen akár a meniszkusz 1/3-át érintő whisker csoportok is jelentek meg jellemzően a kötés alsó részén.



40. ábra 0.5 t% CuO (2000 óra THB)

Kétfajta whisker típust különböztettem meg a vizsgálatom során. A hosszú vékony egyenes whiskereket, és rövid vastag whiskereket. minden esetben a vékony hosszú típusú whiskerből volt kevesebb.



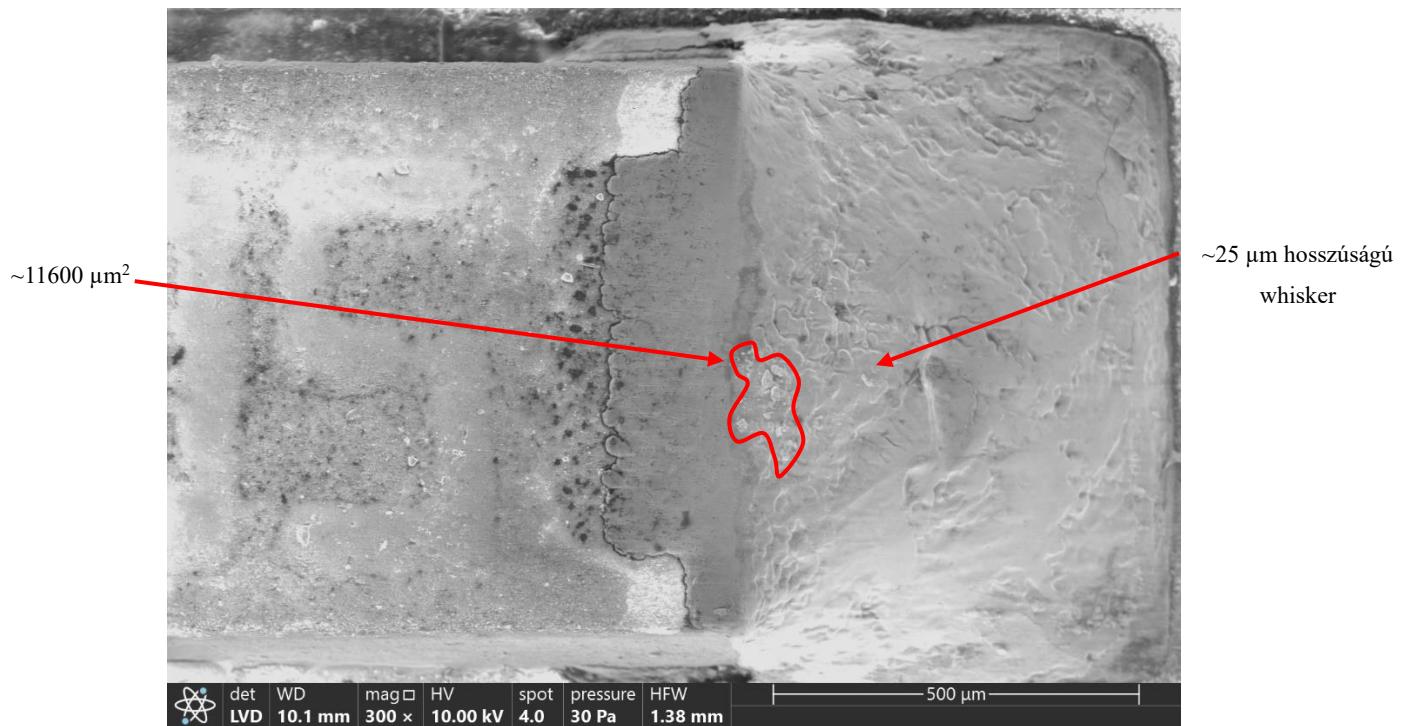
41. ábra 0.25 t% CuO (2000 óra THB)

A CuO 0.25 t% NP forrasznál alakjukban és összetételükben (hosszú vékony és rövid vastag) a whisker csoportok megegyeztek a CuO 0.5 t% NP tapasztalt esettel, de itt kisebb területen voltak jelen. A csoportok körülbelül $4700 \mu\text{m}^2$ területűek voltak.



42. ábra 0.25 t% CuO (2000 óra THB)

A referencia panelen az előzetes várakozás ellenére kevesebb whisker volt látható, mint a CuO-nál. A whiskerek formája itt is hasonló volt, mint a CuO esetekben, de a csoportok kisebbek voltak.

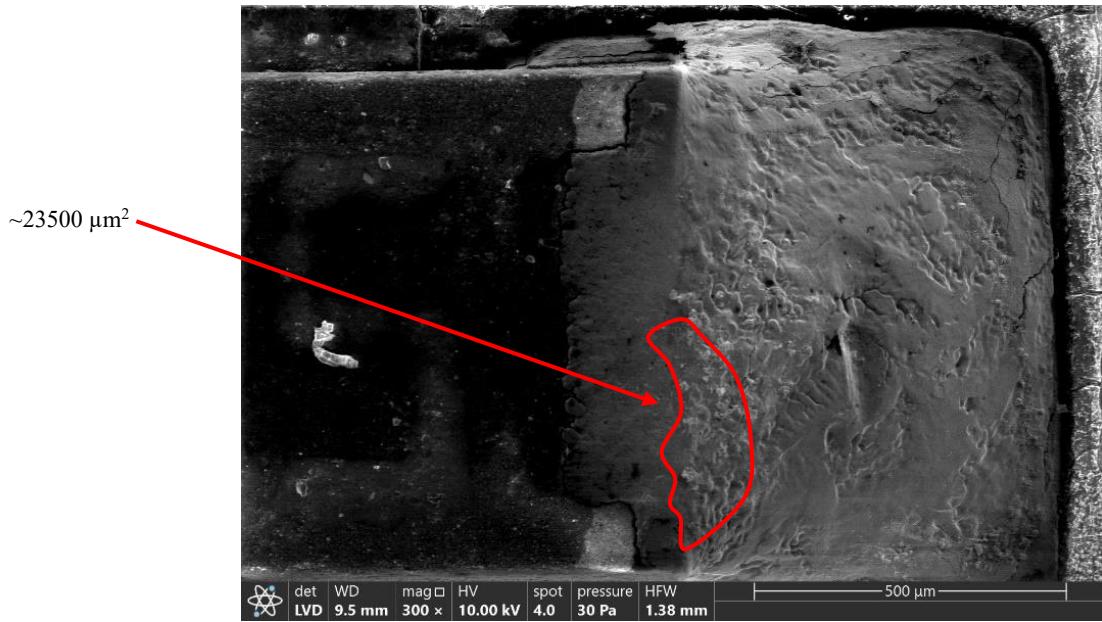


43. ábra Referencia (2000 óra THB)

ZrO₂ adalékolt forrasztott kötésekben nanoszál és nanorészecske esetében is körülbelül hasonló számban voltak jelen whiskerek, mint a referenciánál. A tömegszázalék változtatás nem módosította lényegesen az eredményt. Az összetétel és a whisker csoportok mérete nagyjából megegyezett a referenciával.

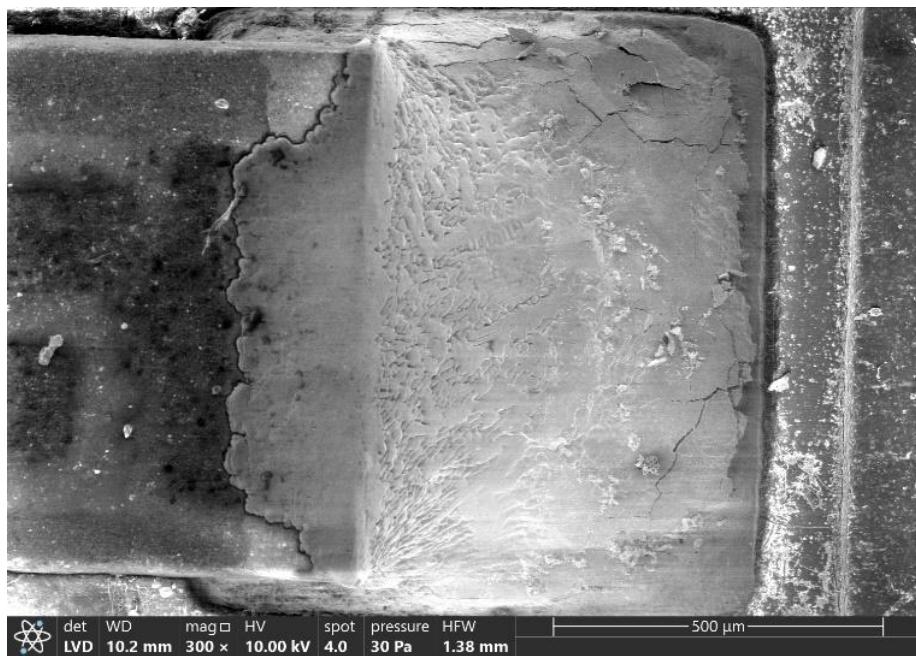
Eredmények 3000 óra után:

3000 óra elteltével az eddig kialakult whisker csoportok nagyobbak és sűrűbbek lettek, valamint a whiskerek hossza is tovább nőtt. A növekedés mértéke típustól függetlenül minden esetben ugyanakkora volt, így továbbra is a CuO felszínen találhatóak legnagyobb számban a whiskerek. A 43. és 44. ábrán ugyanarról az ellenállásról készült képek 2000 óra és 3000 óra THB után láthatóak. A képekből látszódik, hogy az eddig 11600 μm^2 -re tehető terület, ahol whiskerek jelentek meg 23500 μm^2 -re növekedett.



44. ábra Referencia (3000 óra THB)

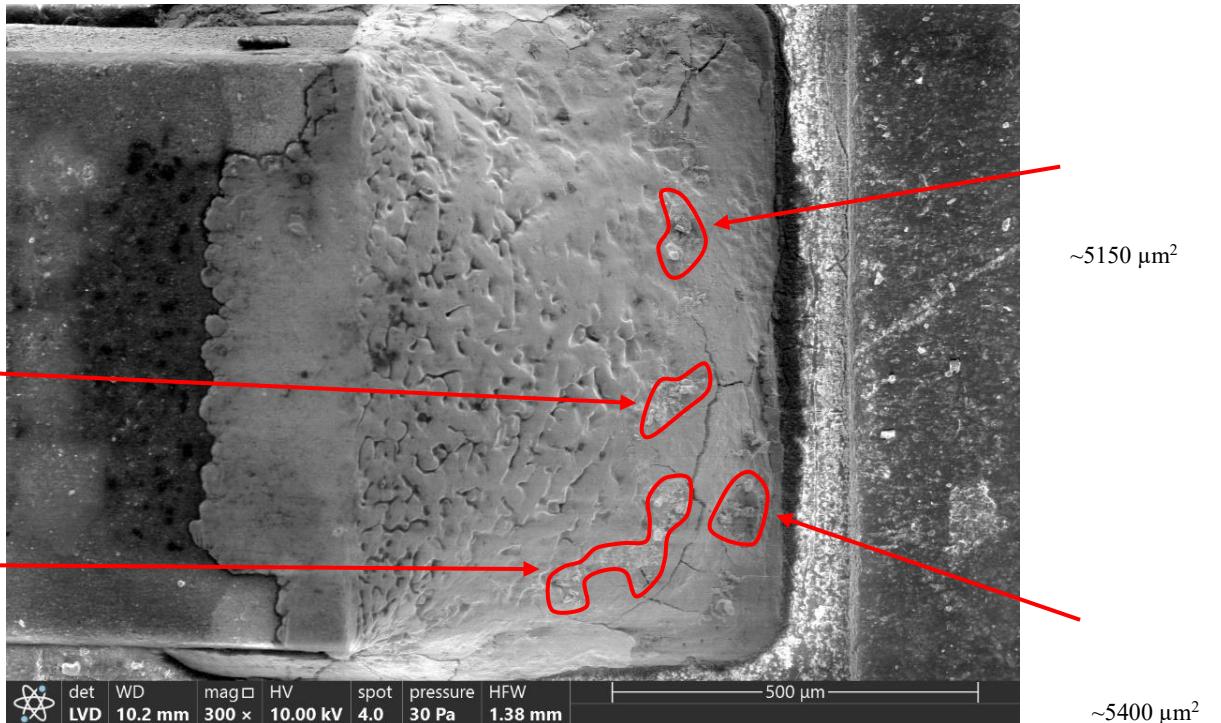
ZrO₂ esetében is megjelentek már jelentős méretű whisker csoportok, azonban ezek legrosszabb esetben (ZrO₂ 0.5 t% NF) is maximum közepes méretűre növekedtek, ez látható a 45. ábrán.



45. ábra 0.25 t% ZrO₂ NP (3000 óra THB)

ZrO₂ 0.5 t% NF és ZrO₂ 0.25 t% NP forraszoknál volt egy-egy esetben kiugróan sok whisker, de mivel a többi ZrO₂ esetnél nem volt ilyen mértékű whisker növekedés, így ezeket nem feltételeztem reprezentatívnak. Jellemzően a 46. ábrához hasonlóan pár whisker csoport jelent meg a forrasztott kötések felszínén, melyek a területének nagysága megközelítőleg 6650 μm² volt, továbbá voltak kötések, ahol alig pár whisker volt látható. NF és NP, valamint a

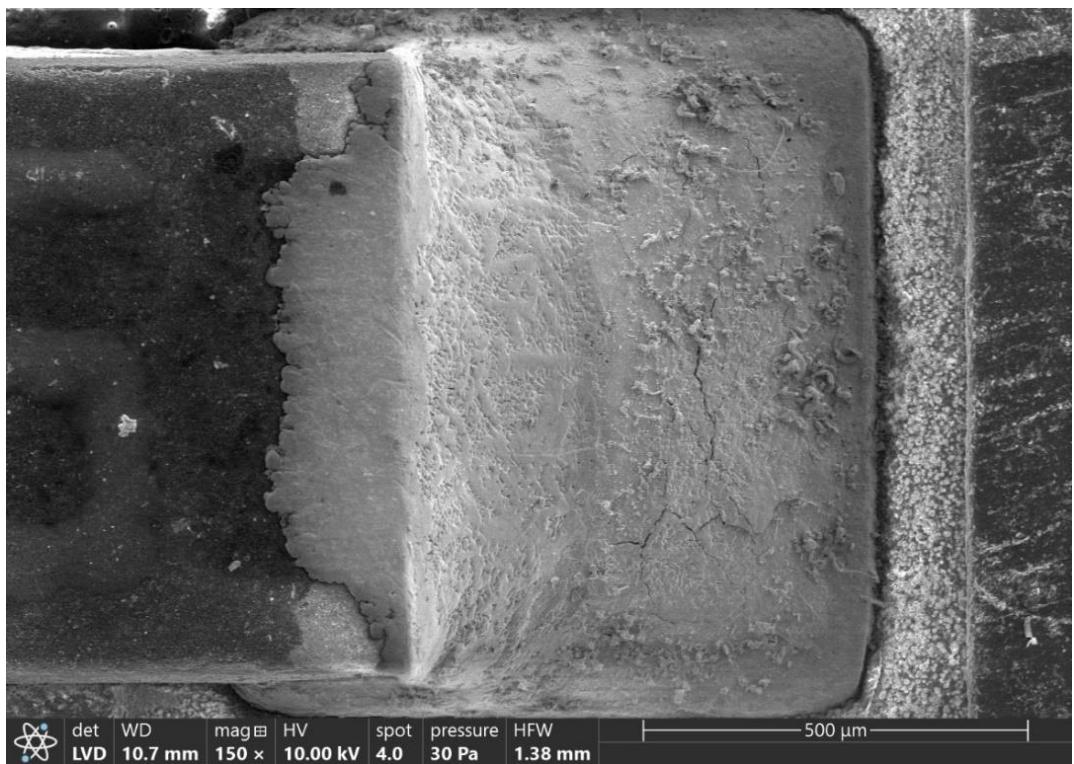
tömegszázalékok között nem volt tapasztalható lényeges különbség, illetve a whiskerek formája itt se mutatott változást az előzőkhez képest.



46. ábra 0.25 t% ZrO_2 NF (3000 óra THB)

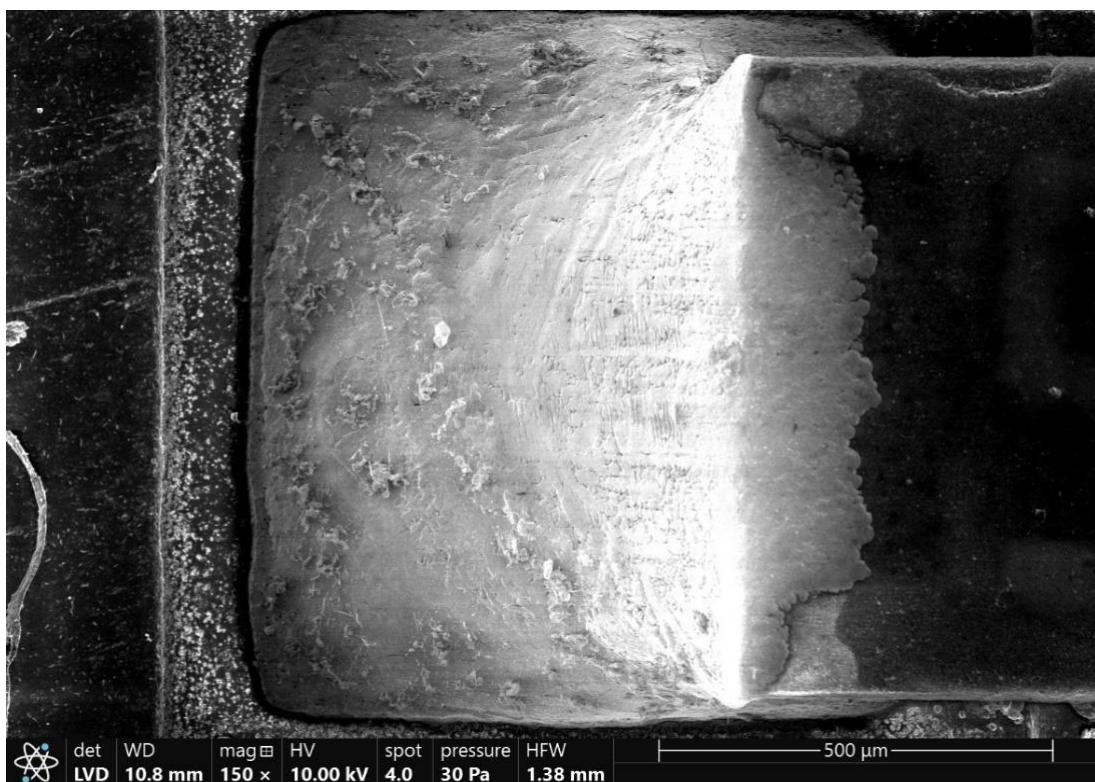
Eredmények 4000 óra után:

4000 óra után 0.5 tömegszázalékban CuO-al erősített kötéseknél a forrasztás teljes felületen jelentek meg whiskerek. 0.25 tömegszázaléknál valamennyivel kisebb területen, de itt is jelentős területeken voltak tapasztalhatóak a whiskerek. A leghosszabb whisker CuO 0.5 t% esetében volt, itt $130 \mu\text{m}$ -es whisker növekedett. Egy esetben volt feltűnően kevés whisker, de ez egy egyedi eset volt, így nem tekinthető általánosnak.



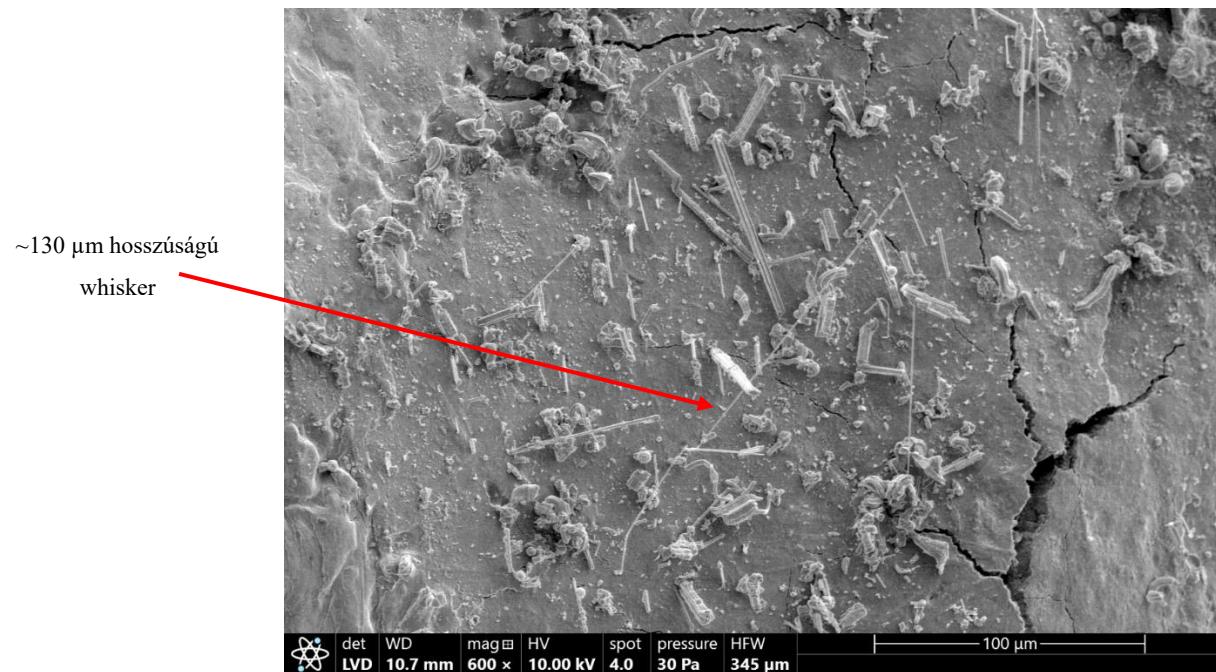
Szinte a teljes felületen jelentek meg whiskerek.

47. ábra 0.5 t% CuO (4000 óra THB)



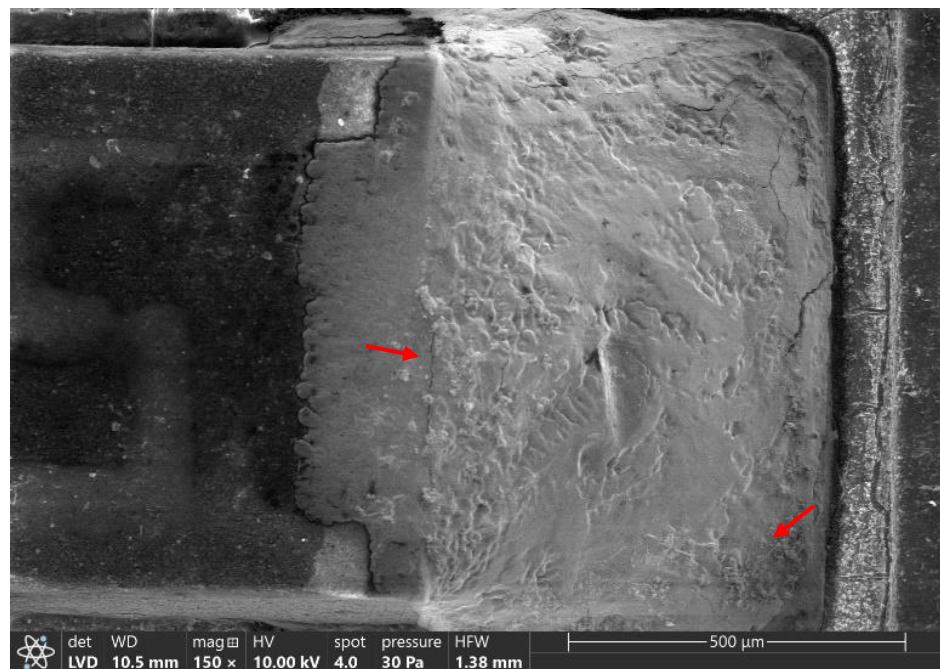
0.5 t% CuO-hoz képest valamennyivel kisebb, de itt is jelentős területen voltak whiskerek megfigyelhetők.

48. ábra 0.25 t% CuO (4000 óra THB)



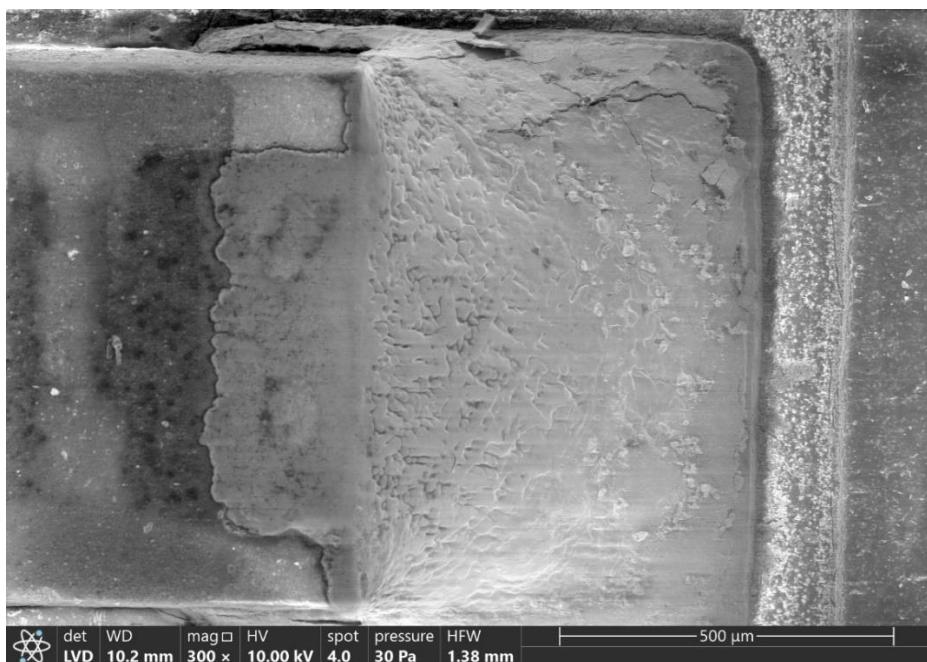
49. ábra 0.5 t% CuO (4000 óra THB)

A referencia mintákon jelentősen kevesebb whisker alakult ki, mint a CuO mintáin, azonban látható, hogy az előzőkhez képest jelentek meg új whiskerek. Az 50. ábrán, ami az eddig bemutatott referencia ellenállás (43. és 44. ábra) a további 1000 óra THB hatása látszódik. Az eddigi területek, ahol whiskerek voltak tovább nőttek, valamint a sarkoknál is új whiskerek láthatóak.

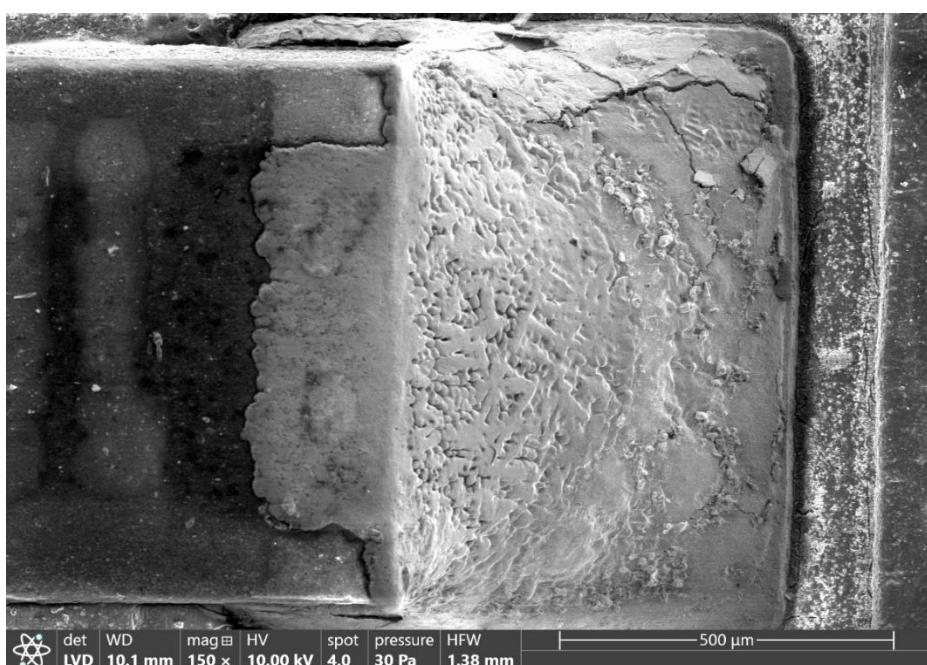


50. ábra Referencia (4000 óra THB)

ZrO₂-al erősített forrasznál a whiskerek számának minimális növekedése volt tapasztalható. A 51. és 52. ábrát összevetve, ahol minden kép ugyanarról a 0.5 tömegszázalékban ZrO₂ nanoszállal erősített SAC forraszról készült kijelenthető, hogy a ZrO₂ sikeresen visszanyomta a whiskerek gyarapodását. A legjobb eredmények NP 0.25 t% és NF 0.5 t% adalékolásoknál voltak. Itt alig lehet különbséget észrevenni a 3000 és 4000 óra öregítés között. NF 0.25 t% és NP 0.5 t% adalékolásoknál is csak csekély növekedés volt látható.



51. ábra 0.25 t% ZrO₂NP (3000 óra THB)



52. ábra 0.25 t% ZrO₂NP (4000 óra THB)

5.2.5 Konklúzió

A THB teszt eredményeinek kiértékelésével átfogó képet kaptam arról, hogy a különböző formában és tömegszázalékban ZrO₂-al és CuO-al erősített SAC forraszok milyen whisker növekedési viselkedést produkálnak. A kísérlet eredményei alapján azt nem lehet előre meghatározni, hogy a forrasztott kötés felületének melyik részén fognak whiskerek kialakulni, mivel a teszt során a whiskerek az egyes forrasz típusok legkülönbözőbb helyein jelentkeztek. A forrasztás legfelső részétől a legaljaig, valamint a sarkokon is megjelentek a whiskerek. A repedések se voltak gócpontok, mivel számos esetben volt olyan repedés, ami körül egyáltalán nem volt whisker. Az eredményekből az viszont egyértelműen kivehető, hogy ha egy területrészen whiskerek alakultak ki, akkor az tovább sürűsödött és növekedett az öregítés tovább haladásával. Ez a „csoportosulás” az összes típusra igaz volt. A csoportosulás annak tudható be, hogy azokon a helyeken, ahol a mechanikai feszültség volt jelen, ott alakultak ki whiskerek. A legrosszabb esetek a CuO erősítésű kötések voltak, ahol a teljes felületen jelentkeztek whiskerek. A whiskerek kétfajta alakot vettek fel. Vékony hosszú és vastag rövidebb. A leghosszabb whisker 130 µm méretű volt. A ZrO₂ vel erősített forraszoknál a legrosszabb esetben is 75 µm méretűre nőttek a whiskerek. A növekedés sebessége a CuO esetében volt a legyorsabb. Itt már 1000 óra után jelent meg whisker és 2000 óra eltelté után már meglehetősen sok whisker volt számolható. A ZrO₂ esetében 3000 óráig a whiskerek mennyisége nagyjából megegyezett a referencia panel mutató whiskerek számával. Az ezt követő 1000 óra után viszont egyértelműen látszódik, hogy a ZrO₂-al erősített forraszokon kevesebb whisker jelent meg, mint az adalékolatlan SAC forrasznál.

A kísérlet eredményeiből az alábbi sorrend állítható fel, ahol az első helyen az a forrasz van, ahol a legkevesebb whisker volt tapasztalható az utolsón pedig a legtöbb (THB 4000 óra után, 85 °C, 85% relatív páratartalom):

- 0.5 t% ZrO₂ nanoszállal és 0.25 t% ZrO₂ nanorészecskével adalékolatlan SAC forrasz
- 0.25 t% ZrO₂ nanoszállal és 0.5 t% ZrO₂ nanorészecskével adalékolatlan SAC forrasz
- Adalékolatlan SAC forrasz
- 0.25 t% CuO nanorészecskével adalékolatlan SAC forrasz
- 0.5 t% CuO nanorészecskével adalékolatlan SAC forrasz

A tanulmány eredményeiből arra lehet következtetni, hogy nincs megbízhatósági kockázata ezeknek a whiskereknek, mivel az iparban használt minimális rasztertávolság többszöröse a kísérlet során tapasztalható whiskerek hosszának. A jelenlétéket azonban nem lehet figyelmen kívül hatni. ZrO_2 haszálata jó megoldásnak bizonyul, ha a whisker növekedés elnyomása a célunk. CuO-al erősített SAC forraszoknál pedig számolni kell azzal, hogy ebben az esetben több whisker fog kialakulni.

6 Összefoglalás

A dolgozat írása során átfogó ismeretekre tettem szert a forrasztás folyamatáról és gyakorlatáról. Részletesen megismerkedtem a forrasztás során használt anyagokkal és azok kiválasztásának indokaival. Továbbá feltártam az egyes anyagok esetleges hátrányait, valamint azt, hogy hogyan igyekeznek ezeket a hátrányokat kiküszöbölni. Ismertettem a Pb kivonásának következményeit. A forrasztás kihívásait és az ezekre kínált megoldásokat is részletesen elemeztem. Ezen túlmenően, több olyan kutatást is vizsgáltam, amelyek a kompozit forrasztóanyagok minősítésével foglalkoztak, és összefoglaltam azok eredményeit. Egyedi tesztpaneleken nyíroszilárdság és megbízhatósági vizsgálatot végeztem, melyek kimenetelét összegeztem. Tapasztalatot szereztem az önálló mérnöki munkavégzésben, dokumentálásban és a mérési eredmények kiértékelésében. A saját mérések és az általam végzett irodalomkutatás alapján az alábbiakat lehet megfogalmazni:

- ZrO_2 nanorészecske/nanoszál és CuO nanorészecske forraszba adalékolva javítja annak szilárdságát. Legjobb eredményeket akkor érhetünk el, ha ZrO_2 -t és CuO-t 0.25 tömegszázalékban nanorészecske formájában adjuk a forraszhoz.
- ZrO_2 erősítés hatására a forrasz sokkal jobb elektromigrációs jelenségeket produkál.
- Ha ZrO_2 –al erősítjük a forraszt, akkor nem kell változtatni az ipari gyakorlaton, mivel az olvadás hőmérsékletét csak minimálisan változtatja.
- ZrO_2 erősítés következtében romlik a nedvesítőképesség.
- ZrO_2 -al erősített SAC forrasz felületén kevesebb whisker fog kialakulni, mint a hagyományos SAC forrasztott kötésekben.
- CuO hatására több whisker lesz megfigyelhető a forrasztott kötésekben.

További vizsgálatok elvégzésével részletesebb képet lehet nyerni a ZrO_2 és CuO hatásáról. Például, keresztmetszeti csiszolatok készítésével lehetőség nyílik az intermetallikus rétegek optikai mikroszkópos vizsgálatára.

Hivatkozások

- [1] <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-surface-mount-and-through-hole-components-on-an-electronic-board>
- [2] <https://wpo-altertechnology.com/flip-chip-assembly/>
- [3] <https://www.surfacemountprocess.com/>
- [4] Eric Chason, Nitin Jadhav, Fei Pei, Eric Buchovecky, Allan Bower: Growth of whiskers from Sn surfaces: Driving forces and growth mechanisms, USA 2013
- [5] <https://www.surfacemountprocess.com/solder-paste-printing-process.html>
- [6] <https://www.ablic.com/en/semicon/support/package/solder-temp-profile/>
- [7] Ben Cornelius, Shay Treivish, Yair Rosenthal, Michael Pecht: The phenomenon of tin pest: USA 2017
- [8] D. Hillman, An investigation into the tin pest phenomena: 3 years and counting, SMTA International Conference Proceedings, 2008
- [9] Mulugeta Abtew, Guna Selvaduray: Lead-free Solders in Microelectronics, USA 2000
- [10] Elviz George, Michael Pecht: RoHS compliance in safety and reliability critical electronics, USA 2015
- [11] Jie Wu, Song-bai Xue, Jing-wen Wang, Shuang Liu, Yi-long Han, Liu-jue Wang: Recent progress of Sn–Ag–Cu lead-free solders bearing alloy elements and nanoparticles in electronic packaging, 2016
- [12] Asit Kumar Gain, Y.C. Chan, Winco K.C. Yung: Effect of additions of ZrO₂ nanoparticles on the microstructure and shear strength of Sn–Ag–Cu solder on Au/Ni metallized Cu pads: Department of Electronic Engineering, Hong Kong 2009
- [13] Ashutosh Sharma, Di Erick Xu, Jasper Chow, Michael Mayer, Heung-Rak Sohn & Jae Pil Jung: Electromigration of composite Sn-Ag-Cu solder bumps, Korea 2015
- [14] J. Shen, Y.C. Chan: Effect of metal/ceramic nanoparticle-doped fluxes on the wettability between Sn–Ag–Cu solder and a Cu layer, Hong Kong 2008
- [15] Katsuaki Suganuma, Alongheng Baated, Keun-Soon Kim, Kyoko Hamasaki, Norio Nemoto, Tsuyoshi Nakagawa, Toshiyuki Yamada: Sn whisker growth during thermal cycling, Japan 2011
- [16] Balázs Illés, Barbara Horváth: Tin whisker growth from micro-alloyed SAC solders in corrosive climate, Budapest 2014

- [17] André M. Delhaise, Zohreh Bagheri, Stephan Meschter, Polina Snugovsky, Jeff Kennedy: Tin Whisker Growth on Electronic Assemblies Soldered with Bi-Containing, Pb-Free Alloys, USA 2020
- [18] A. Skwarek, J. Ratajczak, A. Czerwinski, K. Witek, J. Kulawik: Effect of Cu addition on whisker formation in tin-rich solder alloys under thermal shock stress Poland 2009
- [19] David Suraski, Karl Seelig: Lead-free solder assembly for mixed technology circuit boards, SMTA International Conference Proceedings 2006