

Mangán mikroötvözős forrasztóanyag mikroszerkezetének vizsgálata elektrokémiai módszerekkel

Hurtony Tamás, Krammer Olivér

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikai Technológia Tanszék, 1111 Budapest, Egry József u. 18.
E-mail: hurtony@ett.bme.hu

Tartalmi kivonat. Jelen munkánk során magánnal adalékolt ón-ezüst-réz alapú ólommentes forrasztóanyag mikroszerkezetét hasonlítottuk össze hagyományos SAC305 (Sn96.5/Ag3/Cu0.5) forrasztóanyaggal. A 0,1 a 0,4 vagy 0,7 tömegszázalék mangánt tartalmazó forrasztóanyagból FR4-es hordozón kialakított tesztmintázaton, újraömlésztési technológiával forrasztódombokat hoztunk létre. A forrasztódombokról keresztmetszeti csiszolatot készítettünk, melyeket energiadiszperzív spektrométerrel felszerelt pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk. Speciális elektrokémiai maratási technológiát alkalmazva eltávolítottuk a forrasztott kötések keresztmetszeti csiszolatából a tiszta ónt, hogy az intermetallikus finomszerkezetet láthatóvá tegyünk. Az így feltárt mikroszerkezet sajátosságait vizsgáltuk a mangánt tartalmazó és hagyományos forrasztók esetében. Magas mangán tartalmú kiválókat láttunk a forrasztó tömbi anyagában, melyek szemcsefinomító hatásuk révén hatást gyakorolhatnak a forrasztott kötés mechanikai tulajdonságaira. Továbbá a mangán hatással volt a kialakuló Cu_6Sn_5 intermetallikus struktúrák morfológiájára. A mangán tartalom hatására hosszú túrkristályoszerű képződmények jelentek meg a tömbi anyag teljes térfogatában. Ezen kívül a az Ag₃Sn intermetallikus vegyületek ahelyett, hogy ideális esetben a teljes térfogatot átszővő finom szerkezetet hoztak volna létre, a mangán tartalmú szemcsék közvetlen közelében formálódtak.

Kulcsszavak: ólommentes forrasztóanyag; mangán ötvöző; újraömlésztési forrasztás; metallográfia; szelektív elektrokémiai maratás

1. BEVEZETÉS

A 2002-ben megfogalmazott és 2006-ben bevezetett EU RoHS (Restriction of Hazardous Substances) direktíva értelmében az elektronikai ipar számos szegmenséből száműzték a veszélyes anyagokat, többek között a legelterjedtebben alkalmazott ón-ólom forrasztóanyag egyik fő alkotóelemét, az ólomot is. Ez a változás ösztönözte az új ólommentes forrasztóanyagokkal kapcsolatos kutatásokat. Az intenzív kutatások eredményeként az ón ezüst réz (Sn-Ag-Cu – SAC) tartalmú ötvözetek váltak egyeduralgokká. Ezekről általánosságban elmondható, hogy az olvadáspontjuk lényegesen magasabb a korábbi ólom tartalmú forrasztóanyagokéhoz képest. Az emelkedett technológiai hőmérséklet az optimális kötés kialakításához szükséges paraméterek beállítására az alkatrészek és a szerelőlemez hőkárosodása nélkül sokkal kisebb mozgásteret enged a szakemberek számára. A legnagyobb előszeretettel alkalmazott SAC305 (Sn96.5/Ag3/Cu0.5) ötvözet nem megfelelő hűlési meredekég (>1,5 K/s és <5-6 K/s) alkalmazása

mellett közismerten hajlamos lemezes szerkezetű Ag₃Sn intermetallikus vegyületeket kialakítására, ami a gyengíti a forrasztott kötések, különösen impulzusszerű behatásokkal szemben, (pl. ejtésteszt alkalmával fellépő erők). Ez a jellemző viselkedés a forrasztóanyag relatíve magas, jellemzően hipereutektikus (>1,35 tömeg%) ezüst tartamának a következménye. [1]. Egy átlagos felületszerelt áramkör panelján több ezer kötés kerül egyidőben kialakításra, ezért még a hőprofil precíz beállítása [2] és szigorú ellenőrzése [3] mellett is előfordul, hogy egyes kötések minősége elmarad az elfogadható mértéktől.

A különböző hőkapacitású alkatrészekkel szerelt áramkör esetében a hűlési meredekség nem minden kötés esetében tartható a kívánt technológiai határokon belül, ezért az újgenerációs forrasztóanyagok esetében az ezüsttartalom tudatos csökkentésére irányuló törekvések érvényesülnek. Az ezüsttartalom csökkentésével párhuzamosan új ötvözőket kevernek (Pl. Bi, Ni, Mn stb.) a forrasztóanyagba, hogy javítsák a forrasztó nedvesítési és termomechanikai tulajdonságait. Chen és

munkatársai bizmuttal adalékolt SAC forrasztóanyagok olvadási és mechanikai tulajdonságait vizsgálták [5]. Eredményeik alapján elmondható, hogy a Bi szilárd oldatot képez az ónnal és ezáltal gátolja a diszlokációk vándorlását. Végeredményben a Bi-tal adalékolt SAC forrasztóanyag mechanikai tulajdonságai javultak. Ugyanakkor azt is meg kell említeni, hogy a Bi adalékolás jelentős mértékben lenyomja a forrasztó olvadási hőmérsékletét, mely egyes alkalmazások szempontjából nem kívánatos. Liu és munkatársai szintén Bi-tal adalékolt forrasztóanyagok keménységét és nyíró igénybevétellel szembeni ellenállásukat vizsgálták [6]. Azt találták, hogy 8 tömeg% vagy e feletti mennyiségben adalékolt Bi szubmikronos struktúrák kialakulásához vezet, melyek a keménységet ugyan növelik, de a nyíró igénybevétellel szembeni ellenállást csökkentik. Gyakran használnak SAC típusú forrasztók adalékozására nikkelt, antimon, vagy cinket. Például Roa és munkatársai megmutatták, hogy a cinkkel adalékolt SAC ötvözetek mikroszerkezete finomodik, ami a mechanikai tulajdonságok szempontjából kedvező [7]. Benabou és a kollégái a nikkelt és antimon mint ötvöző hatását vizsgálták [8]. Azt találták, hogy a szilárdfázisú öregítés során növekvő intermetallikus határreteg (Cu_6Sn_5 and Cu_3Sn) kisebb mértékben vastagodik az ötvözők hatására, ami a forrasztott kötések hosszútávú megbízhatóságában fontos tulajdonság. A technológiai paraméterek ígéretesen befolyásolhatók például nanorészecskék hozzáadásával. Yakymovych és kollégái eredményei alapján javasolt a mechanikai tulajdonságok javítása céljából 2 tömegszázalék alatti mennyiségben Ni és Ni_3Sn_2 nanorészecskék hozzáadása [9]. Ani és munkatársainak TiO_2 nanorészecskékkel folytatott kísérleteikben megmutatták, hogy a nanorészecskék egyenletesen oszlanak el a forrasztó tömbi anyagában, és hogy hatásokra javulnak a nedvesítési tulajdonságok [10]. Ban és a kollégái magas hőmérsékletű élettartam vizsgálatok során megmutatták, hogy a réz nanorészecskék hatására csökken az intermetallikus határreteg növekedési sebessége, ami kedvez a hosszútávú megbízhatóságnak [11].

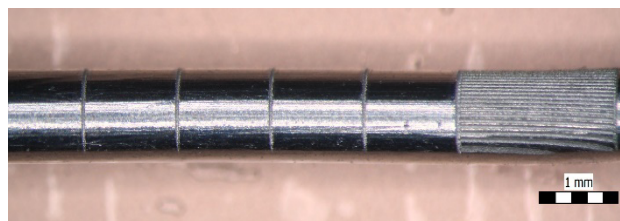
A mangán és cérium adalékok használata bizonyítottan növelte az ejtéstesztekkel szemben

mutatott ellenállását a forrasztóknak. [12]. Míg mások eredményei szintén azt támasztják alá, hogy a mangán tartalom javítja a dinamikus igénybevétellel szemben mutatott ellenállást [13]. Lin eredményei alapján jól látszik, hogy a mangán adalékolás hatására csökken a forrasztók rugalmassági modulusa [14]. A 0,05 tömegszázalékban adagolt mangán nanoszemcse jelentős mértékben javította a SAC alapú forrasztóötvet nedvesítési tulajdonságait [15].

Összességében elmondható, hogy bár a különféle ötvözők makroszkópikus tulajdonságokra gyakorolt hatása intenzíven kutatott terület, kevesen vizsgálják az új elemek hatására létrejövő mikroszerkezet alaki sajátosságait. Jelen munkánk során különböző mennyiség mangánnal adalékolt forrasztók mikroszerkezetét vizsgáljuk és hasonlítjuk SAC305-ös referencia minták szerkezetéhez.

2. MINTAELŐKÉSZÍTÉS

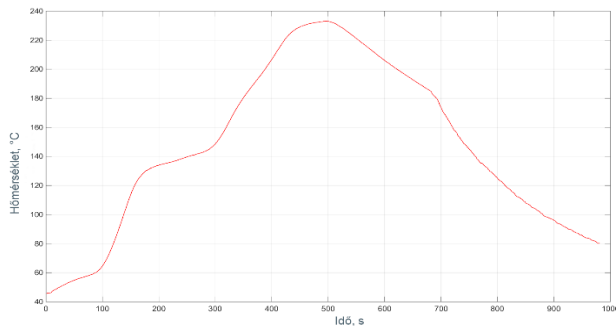
35 μm vastag réz rétegű, üvegszál erősítésű, FR4 típusú epoxy hordozó felületén három különböző alakú tesztábrát hoztunk létre, úgy hogy teli fémezésen a forrasztásgátló lakkon nyitott ablakok határozták meg a forrasztási felületek geometriáját. Egy kör alakú (0,75 mm sugarú) és két ovális forrasztási felületet (0,75 mm görbületi sugár és 3 illetve 4 mm-es főátló) alakítottunk ki. A cél a keresztmetszeti síkon közel félgömb alakú forrasztódombok létrehozása volt, melyek a hordozó fém felületének tetszőleges pontjával galvanikus kapcsolatban vannak. Az ehhez szükséges ~1, 2,3 és 3,7 mm^3 forrasztóanyagot egy 1 mm vastagságú tömör huzal megfelelő hosszúságúra történő darabolásával állítottuk elő. A reprodukálható forrasztóanyag mennyiség előállításához a huzal felületén lézerrel jelöltük be a megfelelő hosszúságú szakaszokat (1. ábra).



1. ábra. Lézeres jelölés a forrasztóhuzal felületén egyenlő távolságokra

A forrasztási felületekre a huzaldarabok felhelyezése előtt természetes alapú folyasztószer

vittünk fel. Az újraömlésztéses forrasztást egy infra kemencében végeztük ~ 228 °C csúcshőmérséklettel. A forrasztási folyamat során a forrasz ~ 147 s-ot töltött olvadt halmazállapotban. A konkrét hőprofil a 2. ábrán látható.



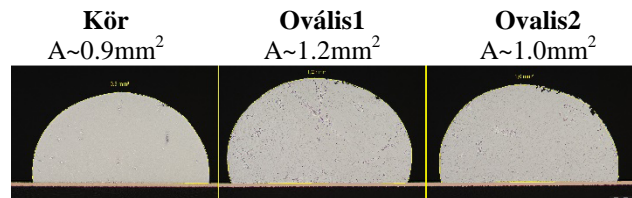
2. ábra. Az alkalmazott újraömlésztéses forrasztás hőprofilja

3. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A forraszdombokból és a hordozóból álló félköteket kétkomponensű hideg beágyazó anyagba öntöttük majd keresztmetszeti csiszolatot készítettünk róluk. A csiszolatokat metallográfiai mikroszkópokkal és a pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk. A csiszolati síkon látott struktúrákat energiadiszperzív spektroszkópia segítségével azonosítottuk be. Az intermetallikus finomszerkezet láthatóvá tételére szelektív elektrokémiai módszereket használtunk. A felpolírozott keresztmetszeti csiszolatot hátoldali kivezetés segítségével megkontaktáltuk és egy 1%-os híg kénsav elektrolitot tartalmazó elektrokémiai cellába helyeztük, ahol a forrasztott kötés volt maga a munkaelektroda. -350 mV előfeszítést alkalmazva 120 s-ig marattunk a minták csiszolati síkon mutatott felületét, melynek hatására a minta adott mélységéből szelektíven kivontuk a tiszta β -ón fázisokat [17]. A visszamaradt intermetallikus finomszerkezet így láthatóvá és vizsgálhatóvá vált.

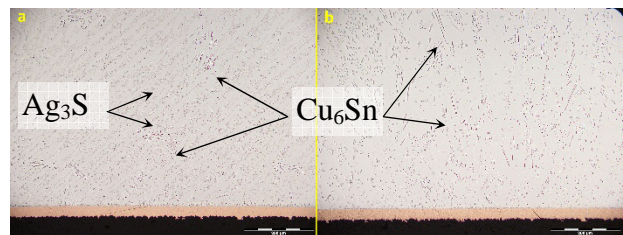
4. EREDMÉNYEK

Csiszolati sík megközelítőleg a mintázatok hossz tengelyre merőlegesen azok felezővonalán haladt keresztül. Az így adódó forrasz felületek alakját és méreteit a 3. ábrán látható optikai mikroszkópos képek szemléltetik. A további kísérletek során a legnagyobb felületet mutató mintázatot használtuk. A különböző összetételű mintákból 5-5 db forraszdombot készítettünk és a vizsgáltunk.



3. ábra. Minták keresztmetszeti felszíne

Az azonos típusú minták mikroszerkezeti sajátosságai nagyon hasonlítottak egymásra, míg a mangántartalmú forraszok és a referencia SAC305 mikroszerkezetei alapvetően eltértek egymástól. Az alacsony ezüsttartalomnak köszönhetően a mangán tartalmú forraszok csiszolatain a forrasz tömbi anyagában az Ag_3Sn intermetallikus vegyületek szinte alig láthatóak (4. ábra). Ugyanakkor a tömbi anyagban található Cu_6Sn_5 intermetallikus vegyületek száma kvalitatívan sokkal nagyobb a mangánt is tartalmazó forraszok esetében. Az ilyen mértékű ón-réz intermetallikusok jelenléte aligha magyarázható az adalékolt anyagok 0,2 tömeg%-os réztartalom különbségével.

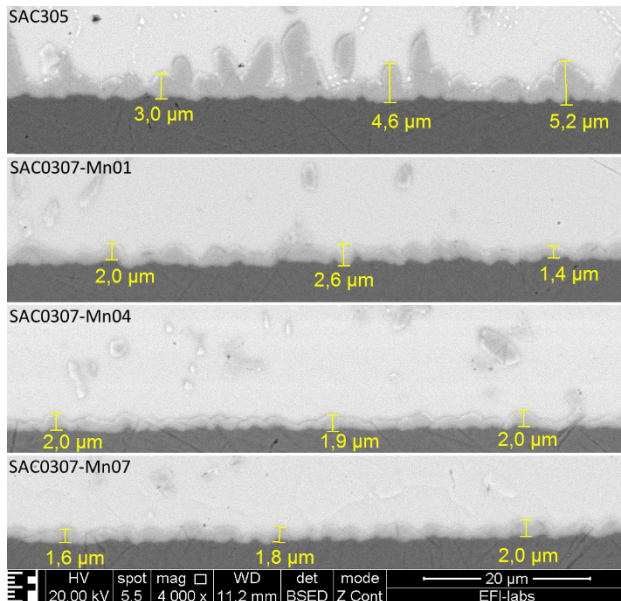


4. ábra. A SAC305 (a) és a SAC0307-Mn01 (b) forraszminták keresztmetszeteiről készült optikai mikroszkópos képek; az 1 tömeg% mangánt tartalmazó minta csiszolati síkján a mangán tartalmú szemcsék nem láthatók

Mivel valamennyi minta forrasztását egy újraömlésztéses forrasztás alkalmával alakítottuk ki, a forrasz olvadt állapotban töltött ideje mintáról mintára hasonló kell, hogy legyen. Ebből arra lehet következtetni, hogy a mangánnal adalékolt forraszanyagok egységnyi idő alatt több rézet oldanak be az alapfémből. Habár az 1 tömeg%-os mangánnal adalékolt minták keresztmetszeti csiszolatain nem találtunk mangánban gazdag kiválásokat, a mikroszerkezet morfológiája már minimális adalékkoncentráció esetében is jelentősen eltért a hagyományos SAC305 mikroszerkezetétől.

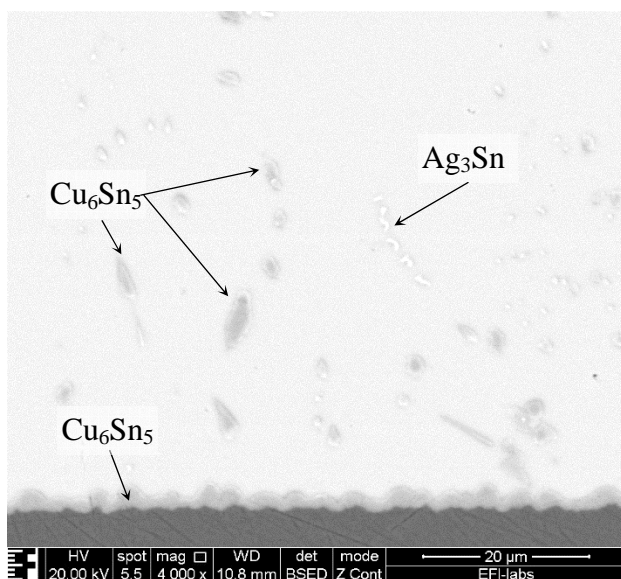
A forrasz-alapfém határán csipkés és folytonos intermetallikus határréteg alakult ki minden esetben, de a mangánnal adalékolt minták esetében tapasztalt intermetallikus határréteg morfológiája szintén eltért

a SAC305-höz képest. A határreteget alkotó szemcsék hosszúkás alakúak és a határreteg átlagvastagsága lényegesen nagyobb volt a SAC305 esetében, igaz mindkét érték az elfogadható tartományban volt.



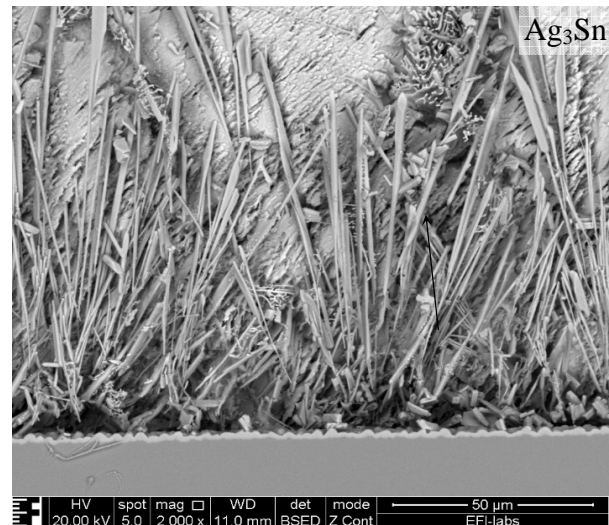
5. ábra. A minták forrasz-alapfém felületén kialakult intermetallikus határretegekről készült elektronmikroszkópos képek

Az elektronmikroszkópos vizsgálat megerősítette, hogy az 1 tömeg% mangánt tartalmazó minták keresztmetszeti csiszolatain relatíve magas mangántartalmú terület nem láthatóak (6. ábra). Az ilyen alacsony koncentrációjú minták vizsgálatára pedig SEM-EDS mérési módszer pedig már nem elég érzékeny.



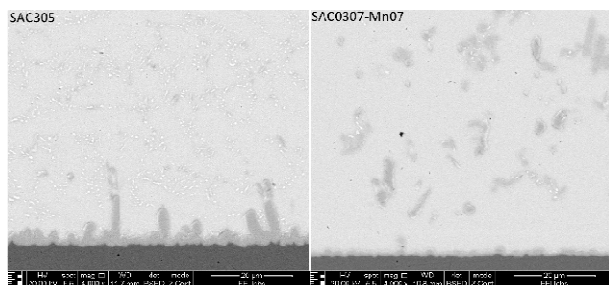
6. ábra. SAC0307-Mn01 minta visszaszórt elektron detektorral alkotott képe; Mn tartalmú szemcsék nem láthatóak a csiszolati síkon

A szelektív elektrokémiai maratással feltárt intermetallikus mikroszerkezet között azonban már megfigyelhetőek voltak mikrométeres méretnél kisebb mangán szemcsék (7. ábra). Ez is jól példázza a szelektív elektrokémiai maratási módszer alkalmazhatóságát. Mivel a magán tartalmú szemcsék karakterisztikus mérete a primer elektronnaláb behatolási mélységével egy nagyságrendbe esik, ezért a jelen, beágyazott formájában a pontos elemösszetétel meghatározása nem lehetséges.



7. ábra. SAC0307-Mn01 minta maratott felületéről visszaszórt elektron detektorral alkotott kép; a Mn tartalmú szemcsék láthatók a finom mikroszerkezetben

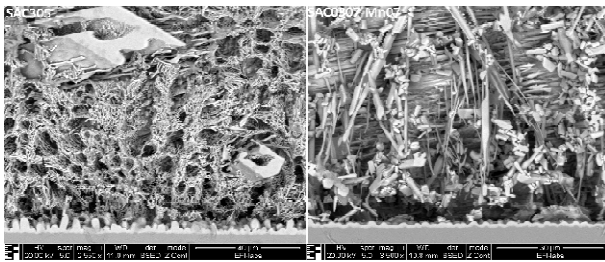
Továbbá érdemes megjegyezni, hogy általában az Ag_3Sn intermetallikus vegyületek a mangán tartalmú szemcsék közvetlen közelében találhatóak meg. Nagy valószínűséggel a Mn tartalmú szemcsék kristálycsíra képző helyként viselkednek a nukleáció fázisában.



8. ábra. SAC305 és SAC0307-Mn07 minták visszaszórt elektrondetektorral alkotott képei; a nem maratott minták csiszolati képein mangán tartalmú részecskék csak a SAC0307-Mn07 mintákon voltak megfigyelhetőek

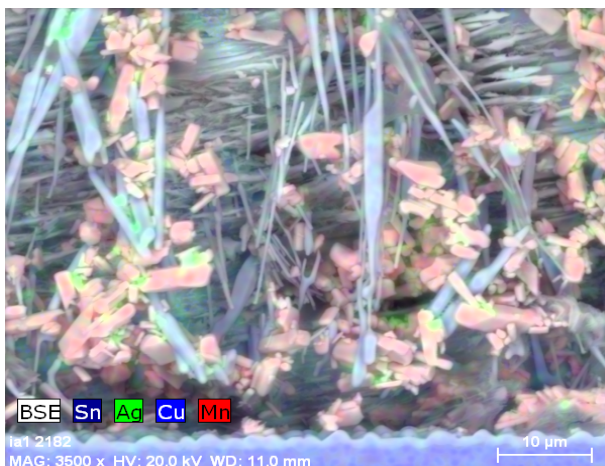
Az optikai mikroszkóppal megfigyelt mikroszerkezetbeli különbségek SEM-EDS-szel is láthatóak voltak a mangán tartalmú és a referencia

SAC305-ös forrasz között (8. ábra). A lényegesen kevesebb Ag_3Sn intermetallikus vegyület mind a mangán tartalmú szemcsék közvetlen közelében váltak ki. Míg a SAC305-ös forrasz esetében az Ag_3Sn intermetallikus finomszerkezet a forrasz tömbi anyagában egyenletesen volt jelen. A mangán tartalmú forraszok maratott képein jól megfigyelhetők a túszerű Cu_6Sn_5 intermetallikus kiválások (9. ábra). A túszerű kiválások hossz tengelyei a forrasz alapfém határfelületének irányába mutatnak, hiszen az intermetallikus kristályok növekedése során a hőmérsékletgradiens irányába orientálódnak.



9. ábra. SAC305 és SAC0307-Mn07 minták visszaszórt elektron detektorral alkotott képei maratás után

A visszaszórt elektron detektorral alkotott képeken rendszámkontrasztot láthatunk. Mivel a Mn rendszáma alacsonyabb, mint a környező anyagoké, a Mn tartalmú szemcséknek sötétebb árnyalatúnak kell lenniük visszaszórt elektron detektorral alkotott képeken. Ugyanakkor elég nehéz megkülönböztetni őket a Cu_6Sn_5 szemcséktől. Mivel a szelektív maratás után a forrasz térbeli szerkezete figyelhető meg, a mangán tartalmú szemcsék beazonosítása sokkal könnyebb. A mangán tartalom meghatározására elemösszetétel térképeket készítettünk (10. ábra).



10. ábra. SAC0307-Mn07 minta maratott felületének elemösszetétel térképe

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A metallográfiai vizsgálatok eredményei alapján elmondható, hogy a SAC305 és a mangán tartalmú forraszanyagok mikroszerkezete jelentősen eltér egymástól. Ez az eltérés részben a jelentősen kevesebb ezüst tartalommal magyarázható. Az Ag_3Sn intermetallikus vegyületek a SAC305-ös forraszban egy összefüggő finom mikroszerkezetet alkotnak, javítva ezzel a forrasz mechanikai tulajdonságait. Ugyanakkor a nem megfelelően beállított hőprofil hatására az Ag_3Sn vegyületek lemez formában válnak ki a forrasz tömbi anyagában, mely csökkenti a dinamikus igénybevétellel szemben mutatott ellenállását. Az alacsonyabb ezüst tartalom egyértelműen csökkenti a lemezszerű kiválások valószínűségét, melyet tovább csökkent az, hogy a forrasz tömbi anyagában egyenletesen jelenlévő Mn tartalmú szemcsék közelében válik ki finomszemcsés formában az Ag_3Sn . A mangán tartalmú forraszok esetében tapasztalt túszerű Cu_6Sn_5 vegyületek erősíthetik a forraszt, ellenállóbbá téve ezzel a mangán tartalmú forraszokat a külső mechanikai behatásokkal szemben.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

The research reported in this paper was supported by the Higher Education Excellence Program of the Ministry of Human Capacities in the frame of Nanotechnology and Material Science research area of Budapest University of Technology and Economics (BME FIKP-NAT).

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Krammer O., Garami T., Horváth B., Hurtony T., Medgyes B., Jakab L., „Investigating the thermomechanical properties and intermetallic layer formation of Bi micro-alloyed low-Ag content solders”, *J. Alloy Compd.*, 634. évfolyam, 156-162 o., 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.02.092>
- [2] Géczy A., Kvanduk B., Illés B., Harsányi G., „Comparative Study on Proper Thermocouple Attachment for Vapour Phase Soldering Profiling”, *Solder. Surf. Mt. Tech.*, 28. évfolyam, 1. szám, 7-12 o., 2016.
<https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2015-0033>
- [3] Livovsky L., Pietrikova A., „Real-time profiling of reflow process in VPS chamber”, *Solder. Surf. Mt. Tech.*, 29. évfolyam, 1. szám, 42-48 o., 2017.
<https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2016-0026>

- [4] Hirman M., Steiner F., „Optimization of solder paste quantity considering the properties of solder joints”, *Solder. Surf. Mt. Tech.*, 29. évfolyam, 1. szám, 15-22 o., 2017.
<https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2016-0025>
- [5] Chen Y., Gao Y., Liu Z.Q., Zhang H., Sugahara T., Nagao S., Suganuma K., „Investigation on the melting and tensile properties of Bi-containing SAC105 lead-free solder alloys”, *2017 18th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, Harbin, 464-468 o., 2017.
<https://doi.org/10.1109/ICEPT.2017.8046495>
- [6] Liu Y., Fu H., Zhang H., Sun F., Wang X., Zhang G., „Microstructure, hardness, and shear behavior of the as-soldered SnBi–SAC composite solder pastes”, *J. Mater. Sci.-Mater. El.*, 28. évfolyam, 19113-19120 o., 2017.
<https://doi.org/10.1007/s10854-017-7866-6>
- [7] Roa S.M.G., Magdaluyo E., Gierlotka W., „Microstructural Characterization and Properties of Sn-Ag-Cu (SAC) Compound Induced by Zn Alloying”, *Nano Hybrid Compos.*, 16. évfolyam, 33-36 o., 2017.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/NHC.16.33>
- [8] Benabou L., Vivet L., Tao Q.B., Tran N.H., „Microstructural effects of isothermal aging on a doped SAC solder alloy”, *Int. J. Mater. Res.*, 109. évfolyam, 1. szám, 76-82 o., 2018.
<https://doi.org/10.3139/146.111578>
- [9] Yakymovych A., Sr. Švec P., Orovcik L., Bajana O., Ipser H., „Nanocomposite SAC Solders: The Effect of Adding Ni and Ni-Sn Nanoparticles on Morphology and Mechanical Properties of Sn-3.0Ag-0.5Cu Solders”, *J. Electron. Mater.*, 47. évfolyam, 1. szám, 117-123 o., 2018.
<https://doi.org/10.1007/s11664-017-5834-9>
- [10] Ani F.C., Jalar A., Saad A.A., Khor C.Y., Ismail R., Bachok Z., Abas M.A., Othman N.K., „SAC–xTiO₂ nano-reinforced lead-free solder joint characterizations in ultra-fine package assembly”, *Solder. Surf. Mt. Tech.*, 30. évfolyam, 1. szám, 1-13 o., 2018.
<https://doi.org/10.1108/SSMT-04-2017-0011>
- [11] Ban G., Sun F., Liu Y., Cong S., „Effect of nano-Cu addition on microstructure evolution of Sn0.7Ag0.5Cu-BiNi/Cu solder joint”, *Solder. Surf. Mt. Tech.*, 29. évfolyam, 2. szám, 92-98 o., 2017.
<https://doi.org/10.1108/SSMT-06-2016-0013>
- [12] Wang R.D., Zhang S.M., Hu Q., Zhang F.W., „Effect of Boron on Microstructure and Properties of Sn-1.0Ag-0.5Cu Low-Silver Lead-Free Solder”, *Mater. Sci. Forum*, 898. évfolyam, 908-916 o., 2017.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.898.908>
- [13] Song J.M., Liu Y.R., Lai Y.S., Chiu Y.T., Lee N.C., „Influence of trace alloying elements on the ball impact test reliability of SnAgCu solder joints”, *Microelectron. Reliab.*, 52. évfolyam, 180-189 o., 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.09.003>
- [14] Lin L.W., Song J.M., Lai Y.S., Chiu Y.T., Lee N.C., Uan J.Y., „Alloying modification of Sn–Ag–Cu solders by manganese and titanium”, *Microelectron. Reliab.*, 49. évfolyam, 235-241 o., 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2008.10.001>
- [15] Tang Y., Luo S., Li G., Yang Z., Hou C., „Effects of Mn nanoparticle addition on wettability, microstructure and microhardness of low-Ag Sn-0.3Ag-0.7Cu-xMn(np) composite solders”, *Solder. Surf. Mt. Tech.*, 30. évfolyam, 3. szám, 153-163 o., 2018. <https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2017-0027>
- [16] Hurtony T., Bonyár A., Gordon P., Harsányi G., „Investigation of intermetallic compounds (IMCs) in electrochemically stripped solder joints with SEM”, *Microelectron. Reliab.*, 52. évfolyam, 1138-1142 o., 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.12.035>