

HŐ- ÉS ANYAGTRANSZPORT FOLYAMATOK
VIZSGÁLATA AZ ELEKTRONIKAI FELÜLETSZERELÉSI-
TECHNOLÓGIÁBAN

MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Dr. Illés Balázs, PhD

BUDAPEST
2017

I. Az értekezés tárgya, előzmények, célkitűzések

Az a fokozódó igény, hogy az elektronikus eszközeinkben egyre kisebb méretben érjünk el egyre nagyobb funkcióbeli integráltságot, a 21. századra szinte egyeduralkodóvá tette az ún. felületszerelési technológiát az elektronikai iparban. Ezen folyamathoz hozzájárultak olyan technológiai aspektusok is, mint a felületszerelésnek a korábban alkalmazott furatszerelési technológiához viszonyított könnyű automatizálhatósága és nagy termelékenysége [1]. A felületszerelés területén ma már szinte kizárólagosan valamely újraömllesztési forrasztási technológiát alkalmaznak. Az említett elnevezések a technológia azon sajátosságaiból adódnak, hogy a nyomtatott huzalozású lemezek felületére előzetesen paszta állagú forrasztótvözetet visznek fel, melyet az alkatrészek felhelyezése után egy ún. újraömllesztő kemencében az olvadáspontja fölé hevítenek, ezáltal a forrasztó megömlik, és forrasztott kötések hoz létre [2].

Az elektronikai iparban lezajlott változások az újraömllesztési forrasztási technológiát sem kerülhették el. Elég csak a 2006-ban bevezetett RoHS direktívákat említeni, amelyek megtiltották a korábban alkalmazott forrasztótvözetek egyik meghatározó elemének, az ólomnak az alkalmazását [3]. Az ipar erre gyorsan és hatékonyan reagált alternatív forrasztótvözetek kifejlesztésével, azonban a kérdés forrasztástechnikai oldalról már korántsem volt ilyen egyszerű. Az új, ólommentes forrasztótvözetek olvadáspontja általában jóval magasabb (~220°C) a korábban alkalmazott ólomtartalmú társaikénál (~180°C), amely a forrasztáskor alkalmazható ún. technológiai ablak – az alkatrészek által elviselt legmagasabb hőmérséklet és a megfelelő kötéshez szükséges hőmérséklet közötti intervallum – drasztikus beszűkülését eredményezte a 245 és 255°C közti tartományra [4]. Ennek a követelménynek a korábban széles körben alkalmazott természetes konvekciós vagy infrasaras fűtési elven működő kemencék nem tudtak megfelelni [5].

A fenti okokból kifolyólag már az ólommentes technológia 2006-os bevezetése előtt elindultak az újraömllesztő kemencék fejlesztésére irányuló kutatások, amelyek eredményeképpen először megszülettek az ún. vegyes fűtésű (infra + kényszerkonvekciós), majd a tisztán kényszerkonvekciós fűtésű kemencék, ahol pusztán a forró gáznak a kemence munkaterébe történő befújásával és megfelelő elosztásával érik el a szükséges hőközlést. A különféle felépítésű kemencetípusok közül az elektronikai iparban leginkább az alagútkemence preferált, amelyen egy szállítószalag keresztülvizetetésével biztosítják a gyártósorba integrálást. A kényszerkonvekciós forrasztás mellett néhány éve ismét előtérbe került az ún. gőzfázisú forrasztás (az elterjedten használt angol nevén: Vapour Phase Soldering – VPS), amely technológia működési elve a kondenzációkor végbemenő hőátadáson alapul. A gőzfázisú forrasztás során egy speciális hőközlő folyadékot hoznak forrásba, ezáltal egy gőzteret képeznek a kemence munkaterében. A gőztérbe merített áramkör felszínére kondenzálódó folyadék fűti fel forrasztási hőmérsékletre az áramkört [6]. A gőzfázisú forrasztási technológia már az 1970-es évek óta létezik [7], de széleskörű ipari alkalmazására mostanáig várni kellett a megfelelő hőközlő folyadék hiánya miatt. Az áttörést a néhány éve kifejlesztett ún. Galden (inert és az egészségre ártalmatlan perfluorpoliéter, PFPE) hőközlő folyadék [8] kifejlesztése hozta meg.

A fent leírtakon kívül a technológia során végbemenő fizikai folyamatok részletes, modellszintű leírása – úgymint a gőztér kialakulása, a gőztér és a forrasztott áramkör kölcsönhatása, a kondenzációs réteg felépülése és annak hatása a fűtés hatékonyságára – jelenleg még nem áll rendelkezésünkre. Általánosságban azonban elmondható, hogy a VPS technológia előnye a pontos hőmérsékleti szabályozás lehetősége (mivel a folyadék forráspontjánál magasabb hőmérséklet nem jöhet létre a munkatérben) és a jó fűtési hatások. Hátránya viszont a gyártósorba építhetőség nehézkessége (a technológia jellegéből adódóan a munkatérnek teljesen zárt rendszert kell képeznie) és az esetenkénti túl gyors fűtés. Összességében tehát a gőzfázisú forrasztás egy új és ígéretes technológia a széleskörű ipari alkalmazás szempontjából, azonban még számos nyitott kérdést tartogat.

A fent említett ólommentes forrasztóvezeték, valamint az ólommentes forrasztási bevonatok minőségi szempontból ma már sok tekintetben túlszárnyalják az ólomtartalmú társaikat [9], azonban az ólom (mint ötvöző) mellőzése miatt, a velük készített áramkörök megbízhatóságával kapcsolatban még vannak megválaszolatlan kérdések. Ezek egyike az ún. „whisker” képződési jelenségek köre. Az ún. whisker egy egykristály vagy polikristály kinövés a tiszta (vagy magas) óntartalmú felületi bevonatból vagy forrasztanyagból, amely rövidzárat okozhat az elektronikus egységben. Jellemző átmérője 0,5-20 μm , hossza pedig akár a mm-es nagyságot is elérheti [10]. A jelenség pontos mechanizmusa, a whiskerek kialakulási folyamata sok részletében még nem teljesen tisztázott.

Az általánosan elfogadott nézetek szerint az ún. whisker növekedést a kristályszemcsék között kialakuló nyomófeszültség különbség okozza. Ez többféle módon is előállhat: külső mechanikai feszültség következtében; termo-mechanikai feszültség okán; a rétegfelvitelkor a rétegben maradó belső feszültségek miatt; a rétegben végbemenő anyagtranszport jelenségek miatti intermetallikus és oxidréteg növekedése következtében, valamint a korróziós folyamatok miatt kialakuló mechanikai feszültségek létrejöttével. Az ún. whisker kialakulása a nyomófeszültség „relaxációjának” a következménye [11].

Az ún. whisker jelenségek kialakulásának megakadályozására és csökkentésére az elektronikai iparban több módszert is kidolgoztak, amelyek többsége a fent felsorolt kiváltó tényezők hatását igyekszik gátolni. Ezek közé tartozik az ónréteg felviteli paramétereinek optimalizálása; a felvitt réteg újrakristályosítása az ún. whisker növekedés szempontjából ideális kevert szemcseszerkezet elérése céljából; az ún. ötvöztetés egyéb fémekkel (réz, ezüst, bizmut, stb.); valamint a réz bázisfém és az ónbevonat közé elhelyezett köztes fémréteg alkalmazása (általában nikkel vagy ezüst) az ón-réz intermetallikus réteg kialakulásának megakadályozása érdekében. Megjegyzendő azonban, hogy a fenti módszerek hatásmechanizmusa még nem minden esetben tisztázott.

A fentiekben tárgyalt elektronikai technológiák és hibajelenségek közös pontja, hogy mindegyikben kulcsszerepet játszanak a hő- és/vagy anyagtranszport folyamatok, így azok vizsgálatát is célszerű ebből a megközelítésből elvégezni. A vonatkozó szakirodalom áttekintése alapján megállapítottam, hogy a fent bemutatott elektronikai technológiák és hibajelenségek hő- és anyagtranszport szempontjából történt vizsgálatait számos nyitott

kérdést tartalmaznak, amelyek a PhD fokozat megszerzését követő kutatásaim gerincét alkották, és amelyek két súlyponti terület köré csoportosíthatóak:

1. A gőzfázisú forrasztás numerikus modellezése. A gőzfázisú forrasztási technológia ipari alkalmazása mára ugyan elkezdődött, viszont a széleskörű tömeggyártásban történő alkalmazása még várat magára. A tömeggyártásban való alkalmazást ugyanúgy hátráltatja a technológia során lezajló fizikai folyamatokat leíró szimulációs modellek hiánya, mint az a sajátossága, hogy a gőzfázisú forrasztási technológiának nehezebb a gyártósorba történő integrálása. Mindezt egyetlen komoly mű foglalkozott a gőzfázisú forrasztás modellezési aspektusaival [12], azonban ez túlzottan leegyszerűsített és mára már bizonyítottan túl pontatlan eredményeket szolgáltatott. A megfelelő szimulációs modellek hiánya megnehezíti a technológia adott termékre történő optimalizálását, csakúgy, mint a termék technológiára történő gyárthatósági optimalizálását. Emellett magának a technológiának a továbbfejlesztését is gátolja, mivel a technológia alkalmazása során lezajló fizikai folyamatok (pl. a gőztér vagy a kondenzációs filmréteg kialakulása) a munkatérben uralkodó extrém körülmények miatt mérésekkel csak nehézkesen és pontatlanul vizsgálhatók, ezért leírásuk szükségessé teszi a numerikus szimulációk elvégzését. Mindezek alapján a gőzfázisú forrasztás területén a kutatómunkám célja a következő volt:

- *a gőzfázisú forrasztás komplex szimulációs modelljének létrehozása, valamint*
- *a technológia alkalmazásakor végbemenő fizikai folyamatok vizsgálata a létrehozott modell segítségével.*

2. Az ón whisker növekedés és az egyes gátló tényezők hatásmechanizmusának vizsgálata. Napjainkban az ón whiskerek kutatása két jelentősebb irányzatra bontható: az egyik az olyan új technológiai megoldások kifejlesztése, amelyek a széles körben alkalmazott anyagok és eljárások esetén meggátolják, vagy legalább csökkentik a jelenség előfordulásának valószínűségét; a másik az új ónbevonatok és magas óntartalmú ötvözetek whisker képződési hajlamának vizsgálata különféle környezeti hatások mellett. 2008-ban az Elektronikai Technológia Tanszéken témavezetésemmel indított ón whisker kutatás mind a két irányzatba bekapcsolódott, majd kutatásunkhoz 2011-ben a japán National Institute of Material Science (NIMS), valamint 2015-ben a lengyel Institute of Elektron Technology (ITE) kutatóközpont is csatlakozott. Az elért eredmények közül a számos publikáció és az azokra érkezett hivatkozások mellett kiemelendő Dr. Horváth Barbara kolléganőnk PhD disszertációja [13], aki a nikkel és az ezüst köztesrétegek whisker gátló hatásai mellett az ón-réz ötvözetek whisker növesztési tulajdonságait vizsgálta.

A disszertáció kiterjedt vizsgálataira ellenére is hagyott megválaszolatlan kérdéseket, mint például a nikkel köztesréteg és az ón forrasztási bevonat között végbemenő intermetallikus réteg kialakulásának jellemzése az ón whisker képződést gátló hatásának szempontjából. Emellett lényeges és tisztázatlan kérdésnek tekinthető a szakirodalomban ellentmondásos eredményekkel rendelkező ón vékonyrétegek whisker növesztési tulajdonságainak tisztázása [14-18], mivel ezen bevonatok kedvező áruk és kiváló forrasztási paraméterek

miatt egyre nagyobb teret nyernek az elektronikai iparban. Csakúgy, mint a klasszikus ón-ezüst-réz övezeteknél kedvezőbb árú, úgynevezett mikro-ötvözös magas óntartalmú forrasztótvözetek, amelyek ón whisker növesztési hajlama szintén tisztázatlan egyelőre [19, 20]. Mindezek alapján az ón whiskerekkel kapcsolatos kutatómunka egyik részének célja:

- *a nikkel köztesréteg és az ón forrasztási bevonat között lezajló intermetallikus réteg kialakulásának leírása a nikkel köztesrétegnek az ón whisker képződésgátló hatásának szempontjából.*
- *az ón vékonyrétegek ón whisker képződési tulajdonságainak vizsgálata, valamint a kiváltó tényezők feltérképezése.*
- *az iparban alkalmazott mikro-ötvözös magas óntartalmú SAC forrasztótvözetek ón whisker képződési tulajdonságainak vizsgálata, valamint az áramterhelés ón whisker növesztésre gyakorolt hatásának vizsgálata a fenti ötvözetek alkalmazásakor.*

II. Alkalmazott eszközök és módszerek

A gőzfázisú forrasztással kapcsolatos kutatásaim során, modelljeimet az Elektronikai Technológia Tanszéken található kísérleti gőzfázisú berendezést alkalmaztam [31] (ez alól kivételt képez a vákuumos gőzfázisú forrasztással kapcsolatos munkám, ahol egy Asscon VP8000 típusú berendezést vizsgáltam). A modelleket MATLAB 7.0 és 11.0 szoftverben implementáltam. A numerikus számítások véges differencia közelítő módszerrel (angol elnevezése Finite Differnce Method, FDM) történtek. A parciális differenciál egyenletek diszkretizálását három dimenziós explicit időben előrelépő térben centrális formula (angol elnevezése Forward Time Central Space, FTCS) segítségével végeztem. A kísérletek során HT170, LS230 és HS240 típusú Galden folyadékot használtam, melynek forráspontja rendre 170°C, 230°C és 240°C. A gőztér numerikus eredményeinek verifikálása a Dr. Géczy Attila kollégám által kifejlesztett dinamikus hőmérséklet- és nyomásmérő szenzorlétra alkalmazásával történtek [21].

Az ón whiskerek kialakulása nem egy hirtelen megváltozott környezeti hatás következménye, hanem természetes körülmények között egy igen lassan lezajló folyamat. A kutatások során ezért célszerű öregbítési (más néven gyorsított élettartam) vizsgálatokat végezni. Kísérleteim során a különféle ón whisker növekedést kiváltó hatások elősegítésére és gyorsítására háromféle öregbítési eljárást alkalmaztam, amelyek a következők voltak:

- Száraz-meleg teszt (angol elnevezése High Temperature Storage Life, HTSL), Denkal 4K/1100 típusú kemence segítségével. Tesztparaméterek: 125°C/20%RH.
- Nedves-meleg teszt (angol elnevezése Temperature Humidity, TH), ESPEC SH-241 típusú kemence segítségével. Tesztparaméterek: 40°C/95%RH, és 85°C/85%RH.
- Túlnyomásos nedves-meleg teszt (angol elnevezése Highly Accelerated Stress Test, HAST), ESPEC EHS-211 típusú kemence segítségével. Tesztparaméterek: 105°C/100%RH.

A fenti tesztkörülményeket a JEDEC J-STD22 szabványcsalád tartalmazza.

Az analitikai vizsgálatok során a felületek vizsgálata és az ön whiskerek detektálása FEI Inspect S50 típusú pásztázó elektronmikroszkóp (SEM, 20kV gyorsító feszültség), valamint Olympus BX-51 optikai mikroszkóp segítségével történt. A whiskerek és rétegszerkezetek vizsgálatához keresztmetszeteket készítettem a mintákból szimpla keresztcsiszolással, valamint JEM-9320-FIB típusú fókuszált ionsugaras megmunkáló berendezéssel (FIB, Ga ionforrással és 30 kV gyorsító feszültséggel). A FIB-bel végzett vizsgálatok előtt a minták ~50nm-es szén védőbevonatot kaptak. A keresztmetszeti minták szemcseszerkezetét és elemösszetételét JEM-9320-SIM típusú pásztázó ionmikroszkóp (SIM, Ga ionforrással és 30 kV gyorsító feszültséggel), valamint JEM-2100F TEM típusú transzmissziós elektronmikroszkóp (200 kV gyorsító feszültséggel) segítségével vizsgáltam, amely készülékek fel voltak szerelve energia diszperzív röntgen spektroszkóppal (EDS) és a TEM esetében elektron diffrakciós egységgel is (pontos angol nevén Selective Area Electron Diffraction, SAED)¹.

III. Az új tudományos eredmények összefoglalása tézisekben

1. tézis [T1, T2, T3, T4, T5, T6, **T7, T8, T9**, T10, **T11, T12**, T20, **T21**]: **Megalkottam a gőzfázisú forrasztási technológia komplex modelljét**, amely segítségével a technológia kellő mélységeiben vizsgálható. A modell három fő részre bontható: **a gőztér kialakulásának és a forrasztott áramkör bemerítése miatti változásainak leírása**; **a forrasztandó hordozó felszínén a kondenzációs filmréteg kialakulásának és dinamikus változásának leírása**; valamint **a gőztér eltávolításának leírása** a vákuumos zárványmentesítéskor. A modell a rendszerben egymásra kölcsönösen ható transzportfolyamatokat kezel, amelyek a következők: a hővezetés okozta energiatranszport, a halmazállapot-változás miatti anyag- és energiatranszport, a gőztérben és a hőközlő folyadékban kialakuló diffúzió okozta anyag- és energiatranszport, valamint a kondenzációs filmrétegben és a gőztérben kialakuló konvektív anyag- és energiatranszport. **A modellt a véges differencia módszer és az ún. „co-simulation” technika alkalmazásával, numerikus szimulációs eszközként implementáltam.**

2. tézis [**T1, T7, T8**, T13, T14, T15, **T16**]: Az 1. tézisben ismertetett modell segítségével jellemeztem, hogy az egyes fizikai folyamatok és anyagi paraméterek milyen mértékben járulnak hozzá a fűtéséhez a gőzfázisú forrasztás során.

- **Bebizonyítottam, hogy a gőzfázisú forrasztáskor a fűtésében lényeges (15-20%-os) hányadot képez a gőztérből hővezetés útján érkező hő.** A harmatpont elérése miatt, az érdemi kondenzáció a hordozó felületén a csúcshőmérséklet elérésének körülbelül 70%-ánál leáll, és onnantól a hővezetés dominál.

¹ A FIB és a TEM berendezésekhez a hozzáférést a NIMS (Japán), az ITE (Lengyelország) és a PSI (Svájc) biztosította.

- **Bebizonyítottam, hogy a harmatpont figyelembevétele elengedhetetlen a gőzfázisú forrasztás modellezésekor,** mivel a forrasztott hordozó környezetében végbemenő intenzív kondenzáció jelentős hatással van a gőztér hődiffúzivitására. Harmatpont nélkül a modell szerint a kondenzáció a teljes gőzteret felemésztene a hordozó körül (ami nem valóságghú mértékben növeli a gőztér hődiffúziós állandóját és csökkenti a gőztérben tárolható hőenergiát) és végezetül jelentős számítási hibát eredményez.
- **Bebizonyítottam, hogy a gőzfázisú forrasztás dinamikus hőátadási tényezője (HTC) a hordozó anyagának hődiffúzivitásával és a kondenzátum réteg vastagságával együttesen jellemezhető.** A hordozó nagyobb hődiffúzivitása nagyobb HTC értéket eredményez, míg a kondenzátum rétegvastagság növekedése az ellenkező hatást váltja ki. A kondenzátum rétegvastagsága jól jellemezhető a hordozó anyagának térfogati hőkapacitásával, amely paraméter növekedése a rétegvastagság növekedését eredményezi.

3. tézis [T10, **T12**, **T17**, T18, T19]: Az 1. tézisben ismertetett modell segítségével jellemeztem a kondenzátum réteg dinamikus viselkedését gőzfázisú forrasztáskor.

- **Bebizonyítottam, hogy a gőzfázisú forrasztáskor a hordozó felszínén kialakuló kondenzációs filmréteg közel sem tekinthető statikusnak.** A hordozó felső oldalán a kondenzációs filmréteg néhány másodperc alatt eléri a maximális vastagságát, majd csökkenni kezd. A hordozó alsó oldalán a kondenzációs filmréteg vastagsága exponenciális telítődési jelleget mutat. A kondenzációs filmrétegben kialakuló konvekciós energiaáramlás hőmérséklet-különbséget okoz a hordozó szélei és középpontja között. A fenti jelenségek számottevő fűtési különbséget okoznak a forrasztott hordozó felszínén, amit a forrasztáskor figyelembe kell venni.
- **Bebizonyítottam, hogy gőzfázisú forrasztáskor a hordozó kisszögű (1–10°-os) megdöntése egyenletesebbé teszi a hordozó fűtését.** Az 1° alatti minimális megdöntés hatása (amely akár a berendezés pontatlan elhelyezéséből is adódhat) elhanyagolható a folyamat során. Ezzel szemben az 1–10°-os megdöntés csökkenti a kondenzátum réteg vastagságának lokális különbségeit, ezzel javítja a fűtés homogenitását.

4. tézis [T20, **T21**, T22, T23]: Az 1. tézisben ismertetett modell segítségével **bebizonyítottam, hogy a vákuumos gőzfázisú forrasztáskor különös figyelemmel kell lenni a rendszer hőveszteségeire, a szerelt áramkör felépítésre és rendszer beállításaira.** Az elszívócsövön **elhanyagolhatónak tűnő hőveszteség** – a gőzelszívás okozta erőteljes konvektív hőtranszport miatt – jelentős hőmérsékletesést okozhat a vákuumkamrában, amely **kis hőkapacitású hordozók és alkatrészek esetén a forrasztott kötések korai megszilárdulásához vezethet, ami csökkenti a zárványeltávolítás hatékonyságát.**

5. tézis [T24, T25, T26, T27, T28, T29, T30, T31]: **Elvégeztem a szilárd/szilárd fázisban létrejött Sn/Ni réteghatáron az intermetallikus réteg kialakulásának jellemzését emelt hőmérsékletű öregbítés során.**

- **Igazoltam, hogy az Ni/Sn réteghatáron kialakuló (több fázist is tartalmazó Ni_xSn_y) intermetallikus réteg növekedésének jellege megegyezik az Sn/Cu réteghatáron kialakuló, Cu_6Sn_5 összetételű intermetallikus rétegével.** A rétegfelvitelt követően a Cu_6Sn_5 összetételű intermetallikus réteg mind vastagságában, mind határfelületi érdességében 3–5-szörös értékekkel rendelkezik az Ni_xSn_y összetételű intermetallikus réteghez képest. Ugyanakkor az egyes intermetallikus réteg típusok növekedési rátái (amely az intermetallikus réteg vastagságának relatív százalékos változása adott idő alatt) között a különbség átlagosan csak 1,6-szoros a Cu_6Sn_5 javára, valamint a határfelületi érdességük változása ugyanolyan jelleget mutat. **Így indirekt igazoltam, hogy az Sn/Cu rétegszerkezet az Sn/Ni/Cu-hez képest intenzívebb ón whisker képződési hajlamának egyik lényeges tényezője az ónréteg felvitelekor kialakuló (kezdeti) intermetallikus rétegek szerkezetbeli különbsége és nem csak a Cu_6Sn_5 réteg nagyobb abszolút növekedési sebességének.**
- **Igazoltam, hogy a relatíve alacsony 125°C -os hőmérsékleten és a nikkellréteg bármiféle kémiai aktivációja (amely művelet célja a nikkell réteg katalitikus aktivitásának növelése az ón réteg felvitele előtt) nélkül is mind a három, az Sn és a Ni között lehetséges intermetallikus fázis (Ni_3Sn_4 , Ni_3Sn_2 és Ni_3Sn) jelen van a kialakuló intermetallikus rétegben, a következő sorrendben az Ni rétegtől az Sn felé haladva: Ni_3Sn , Ni_3Sn_2 , Ni_3Sn_4 .** Az intermetallikus rétegben az egyes vegyületek aránya közel állandó marad a magas hőmérsékletű ($125^\circ\text{C}/500$ óra) öregbítés során.

6. tézis [T32, T33, T34, T35, T36, T37]: **Megvizsgáltam az ón vékonyrétegek whisker képződési tulajdonságait.**

- **Bebizonyítottam, hogy magas hőmérsékletű öregbítés hatására a $0.5\text{--}2.5\ \mu\text{m}$ vastagságú, réz bázisra felvitt kémiai ónréteg is képes ón whisker növesztésre, valamint, hogy a növekedés fő kiváltó tényezője a magas hőmérséklet indukálta intermetallikus rétegnövekedés.** Igazoltam, hogy a magas páratartalom whisker indukáló hatása a kémiai ónrétegek esetén elhanyagolható, mivel a hőmérséklet indukálta Cu_6Sn_5 intermetallikus réteg gyors növekedése hamarabb felemésztí a vékony kémiai ónréteget, minthogy a korrózió érdemben beindulhatna. Az elektron diffrakciós vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a whiskerek bázisszemcséjének orientációja eltér az őt körülvevő szemcsék orientációjától.
- **Bebizonyítottam, hogy $300\text{--}500\ \text{nm}$ vastagságú, réz bázisra vákuumpárolgatott ónrétegekre a szobahőmérsékleten képződő $100\text{--}150\ \text{nm}$ vastagságú intermetallikus réteg akkora nyomófeszültséget fejt ki, hogy az intenzív whisker növekedést eredményez.** Emellett a whiskerek testében található nagymennyiségű réz segítségével indirekt igazoltam, hogy a nyomófeszültség olyan mértékű, hogy képes indukálni az

ún. interfészfolyás jelenségét az ónréteg és az intermetallikus réteg között, amivel az intenzív, akár $0,5 \mu\text{m}/\text{óra}$ növekedési sebességű whisker képződés is magyarázható.

7. tézis [T38, T39, T40, T41, T342, **T43**, T44, T45, **T46**, **T47**, T48]: **Igazoltam, hogy korrozív körülményeknek alávetve az ólommentes ón-ezüst-réz (SnAgCu, SAC) forrasztótvözetek a tiszta ónnal összevetésben hasonló mértékben képesek ón whisker növesztésére.**

- $85^\circ\text{C}/85\%\text{RH}/3000$ óra öregbítést alkalmazva, három, az iparban alkalmazott forrasztótvözet: $96.5\text{Sn}/3\text{Ag}/0.5\text{Cu}$; $98.4\text{Sn}/0.8\text{Ag}/0.7\text{Cu}/0.1\text{Bi}$; $98.9\text{Sn}/0.3\text{Ag}/0.7\text{Cu}/0.1\text{Bi}/0.01\text{Sb}$ esetén mutattam ki a tiszta ónnál tapasztalt mértékű ón whisker növekedést. A két utóbbinál – úgynevezett mikro-ötvözös forrasztótvözetnél – **elsőként igazoltam, hogy képesek ón whisker növesztésre.** Rétegszerkezet vizsgálatok során **igazoltam, hogy az ón whisker növekedést kiváltó fő tényező a forrasztott kötésekben kialakuló korrózió által kifejtett mechanikai nyomás, valamint, hogy a forrasztótvözetek között tapasztalható ón whisker növekedési különbség fő okozója az ötvözetek különböző korróziós ellenállása.** Elektron diffrakciós vizsgálatokkal **megmutattam, hogy az ólommentes ón-ezüst-réz forrasztótvözetek esetén a „csavarodott” (nodule) whisker típus feltűnően nagy számban való megjelenését a whiskerekbe kerülő réz- és bizmut atomok okozzák,** amelyek a whisker testébe kerülve „fragmentálják” a bázisszemcsét további szemcséket létrehozva abban, ami szakaszosan megtöri a whisker növekedési irányát.
- **Bebizonyítottam, hogy a korrozív klímában az áramterhelés csökkenti az SAC ötvözetből képződő whiskerek számát, mivel késlelteti és csökkenti a kötésekben végbemenő korróziós folyamatokat.** A forrasztott kötések korróziós hajlamának kvantitatív elemzésre bevezettem a „térbeli korróziós mélység” („spatial corrosion depth, d_{sc}) fogalmát, ami az átlagos korróziós mélység súlyozva a korróziós folt hosszának és a kötés meniszkusz hosszának az arányával. **Az áramterhelés növekedésével a kötésekben csökken a térbeli korróziós mélység, amely hatására csökken a mechanikai feszültség is és kevesebb whisker növekszik.** A fenti jelenség az ún. „aktív katód védelem” effektusával magyarázható, miszerint a kötések felszínén lévő víz filmrétegben a forraszt és a réz között galvanikus cella alakul ki, amelyben a terhelő áram csökkenti a forraszt oxidációját.

IV. Az eredmények hasznosulása

A gőzfázisú forrasztás során a gőztér felépülését leíró modellem (1. tézis) segítségével dr. Géczy Attila kollégám sikeresen optimalizálta a tanszéki kísérleti gőzfázisú forrasztó-berendezés munkaterének méretét, valamint a modellre épülő numerikus szimulációs szoftver segítségével elért eredményeiből tézist fogalmazott meg a PhD disszertációjában. Az elért eredmények hasznosultak továbbá a BME Új Széchenyi Terv keretén belül meghirdetett „Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos

műhelyeiben” című projektben (Projektazonosító: TÁMOP - 4.2.2.B-10/1--2010-0009). A gőzfázisú forrasztás során a kondenzációs filmréteg kialakulásának vizsgálata terén elért eredményeim (2. és 3. tézis) alapján „gyárthatóságra tervezési” kritériumokat fogalmaztam meg a nyomtatott huzalozású (és egyéb más hordozóval rendelkező) áramkörök gőzfázisú forrasztással történő szerelése terén (részletesen ld. [T11], [T17], és [T18]). Az ismertetett eredmények részét képezik a 2013-ban elnyert Bolyai János kutatói ösztöndíjam programjának. Ugyancsak javaslatokat tettem a vákuumos gőzfázisú technológia további fejlesztéseire (4. tézis, [T21-23]). A gőzfázisú forrasztás területén elért eredményeimet a belga Exmore Ltd. felhasználta az új típusú forrasztó berendezésük fejlesztése során.

A nikkel köztesréteg és az ón forrasztási bevonat között végbemenő intermetallikus rétegnövekedés vizsgálata terén elért eredményeim (5. tézis) hozzájárultak a nikkel köztesréteg ón whisker növekedésgátló hatásának mélyebb megértéséhez, valamint beépültek két külföldi kutatócsoport munkájába: dr. Wahyu Diyatmika, National Taiwan University of Science and Technology; dr. Jung-Lae Jo, Osaka University (az innét érkezett számos hivatkozás alapján). Az eredmények hasznosultak továbbá a BME Új Széchenyi Terv keretén belül elnyert „Kutatóegyetem pályázatában” (Projektazonosító: TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002), a Nanofizika, nanotechnológia, anyagtudomány (NNA) alprojektjében, valamint a Robert Bosch Elektronika kft.-nél.

Az ón vékonyrétegek vizsgálata terén elért eredményeim (6. tézis) hozzájárultak azon felismeréshez, hogy az eddig az iparban „ón whisker mentesnek” hitt ón vékonyrétegek is képesek whisker jelenségeket produkálni, emellett bázisát képezhetik további kutatásoknak ebben a témában. A kutatás témája hasznosult Robert Bosch Elektronika kft.-nél. A mikro-ötvözős forrasztótvözetek ón whisker képződési hajlamának vizsgálata során elért eredményeim (7. tézis) hozzájárultak ezen új, minőségi és ár szempontjából előnyös forrasztótvözetek megbízhatósági paramétereinek pontosabb megismeréséhez – ami elengedhetetlen a forrasztótvözet tömeges ipari alkalmazása előtt –, valamint és forraszpaszták továbbfejlesztéséhez. Az eredmények hasznosultak amerikai Alpha forraszpasztá gyártó cégnél.

V. A tézisekről megjelent publikációk

(Vastag számozás jelöli a legjelentősebbeket.)

[T1] Illés B., Géczy A., Multi-Physics Modelling of a Vapour Phase Soldering (VPS) System, APPL THERM ENG 48 (2012) 54-62. (IF = 2.127)

[T2] Géczy A., Péter Zs., Illés B., Illyefalvi-Vitéz Zs., Pressure Sensing: A Novel Method for Characterizing the Processing Zone in Vapour Phase Soldering System, Proc. of 35th IEEE-ISSE conference, Bade Ausse, Ausztria, pp. 55-58., (2012).

[T3] Géczy A., Kvanduk B., Illés B., Illyefalvi-Vitéz Zs., Thermocouple Attachment Methods for PCB Profiling During Vapour Phase Soldering, Proc. of 18th IEEE SIITME conference, Alba Iulia, Románai, pp. 133-137, (2012).

- [T4] Péter Zs., Géczy A., Illés B., Illyefalvi-Vitéz Zs., Pressure Measurements in a Batch Type Vapour Phase Soldering Station, Proc. of 18th IEEE SIITME conference, Alba Iulia, Románai, pp. 163-166, (2012).
- [T5] Géczy A., **Illés B.**, Illyefalvi-Vitéz Zs., Investigating the process zone of a Vapour Phase Soldering oven, Proc. of the TAMOP PhD Workshop: TAMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0009, Budapest, Magyarország, pp: 1-4. (P3), (2012).
- [T6] **Illés B.**, Géczy A., Condensation Model of Vapour Phase Soldering, Proc. of 18th IEEE SIITME conference, Alba Iulia, Románai, pp. 63-68, (2012).
- [T7] Géczy A., **Illés B.**, Péter Zs., Illyefalvi-Vitéz Zs., Characterization of Vapour Phase Soldering Process Zone with Pressure Measurements, SOLDER SURF MT TECH 25/2 (2013) 99-106 (IF = 0.688)
- [T8] **Illés B.**, Géczy A., Investigating the dynamic changes of the vapour concentration in a vapour phase soldering oven by simplified condensation modeling, APPL THERM ENG 59 (2013) 94-100. (IF = 2.624)
- [T9] Géczy A., **Illés B.**, Illyefalvi-Vitéz Zs., Modeling Method of Heat Transfer During Vapour Phase Soldering Based on Filmwise Condensation Theory, INT J HEAT MASS TRAN 67 (2013) 1145-1150. (IF=2.522).
- [T10] **Illés B.**, Modeling Galden Layer Formation on PCB Surface During Vapour Phase Soldering, Proc. of 19th IEEE SIITME conference, Galti, Románia, pp. 69-74, (2013).
- [T11] Géczy A., **Illés B.**, Illyefalvi-Vitéz Zs., Modeling of Condensation Heating During Vapour Phase Soldering, Proc. of 36th IEEE-ISSE conference, Alba Iulia, Romania, pp. 274–279, (2013).
- [T12] **Illés B.**, Géczy A., Numerical Simulation of Condensate Layer Formation During Vapour Phase Soldering, APPL THERM ENG 70 (2014) 421-429. (IF = 2.739).
- [T13] A. Géczy, **B. Illés**, Zs. Péter, Z. Illyefalvi-Vitéz, Simplified Heat Transfer Modeling for Vapour Phase Soldering Based on Filmwise Condensation for Different Horizontal Printed Circuit Boards, HEAT MASS TRANSFER 51 (2015) 335-342. (IF = 1.044)
- [T14] A. Géczy, **B. Illés**, T. Darnai, Investigating Condensation Heat Transfer during Vapour Phase Soldering on Round-Shaped PCB Plates, INT J HEAT MASS TRAN 86 (2015) 639-647. (IF=2.857)
- [T15] **Illés B.**, Dependence of Condensate Thickness on the Substrate Properties during Vapour Phase Soldering, Proc. of 21th IEEE-SIITME conference, Brasov, Romania, pp. 71-76, (2015).
- [T16] **Illés B.**, Géczy A., Skwarek A., Busek D., Effects of substrate thermal properties on the heat transfer coefficient of vapour phase soldering, INT J HEAT MASS TRAN 101 (2016) 69-75. (IF=3.458)
- [T17] **Illés B.**, Géczy A., Investigating the heat transfer on the top side of inclined printed circuit boards during vapour phase soldering, APPL THERM ENG 103 (2016) 1398-1407. (IF = 3.356)
- [T18] Géczy A., Kvanduk B., **Illés B.**, Harsányi G., Comparative Study on Proper Thermocouple Attachment for Vapour Phase Soldering Profiling, SOLDER SURF MT TECH 28/1 (2016) 7-12 (IF = 1.460)
- [T19] Géczy A., Nagy D., **Illés B.**, Fazekas L., Krammer O., Busek D., Studying heat transfer on inclined printed circuit boards during vapour phase soldering, SOLDER SURF MT TECH 29/1 (2017) 34-41 (IF = 1.460 (2016))
- [T20] **Illés B.**, Skwarek A., Géczy A., Witek K., Numerical Study of Vapour Concentration Reduction in a Vacuum Vapour Phase Soldering Oven, Proc. of 40th IEEE-ISSE conference, Sofia, Bulgaria, pp: 1-6, (2017), DOI: 10.1109/ISSE.2017.8000941.

- [T21] **Illés B.**, Skwarek A., Géczy A., Krammer O., Bušek D., Numerical modelling of the heat and mass transport processes in a Vacuum Vapour Phase Soldering System, INT J HEAT MASS TRAN 114 (2017) 613–620. (IF=3.458 (2016))
- [T22] **Illés B.**, Skwarek A., Géczy A., Szwagierczak D., Witek K., Void Separation Efficiency of Vacuum VPS technology on FR4 and LTCC Substrates, Proc. of 23rd IEEE SIITME conference, Constanca, Románai, pp. 1-6, (2017). (közlésre elfogadva)
- [T23] **Illés B.**, Skwarek A., Géczy A., Jakab L., Effect of the Vapour Concentration Decrease on the Solder Joints Temperature in a Vacuum Vapour Phase Soldering System, Proc. of 41th International Microelectronics and Packaging Conference, Warsaw, Poland, pp. 1-6, (2017). (közlésre elfogadva)
- [T24] B. Horváth, **B. Illés**, G. Harsányi, Investigation of tin whisker growth: The effects of Ni and Ag underplates, Proc. of 32th IEEE-ISSE conference, Brúno, Csehország, pp. 1-5, DOI: 10.1109/ISSE.2009.5207031 (2009).
- [T25] **Illés B.**, Horváth B., Harsányi G., Effect of Strongly Oxidizing Environment on Whisker Growth form Tin Coating, SURF COAT TECH, 205 (2010) 2262-2266. (IF=2.135)
- [T26] Horváth B., Shinohara T., **Illés B.**, Harsányi G., Tin Whisker Growth at High Humidity Environments – Investigated on Ni and Ag Underlayered Leadframes, Proc. of the 57th Materials and Environment Debate, Okinawa, Japán, pp. 304-307, (2010).
- [T27] Horváth B., **Illés B.**, Shinohara T., Harsányi G., Effects of Humidity on Tin Whisker Growth - Investigated on Ni and Ag Underplated Layer Construction, THIN SOLID FILMS 520 (2011) 384-390 (IF=1.890)
- [T28] Horváth B., **Illés B.**, Shinohara T., Growth of intermetallics between Sn/Ni/Cu, Sn/Ag/Cu and Sn/Cu layered structures, THIN SOLID FILMS 556 (2014) 345-353. (IF=1.759)
- [T29] **Illés B.**, Horváth B., Comparing the IMC layer growth in Sn-Cu, Sn-Ag-Cu and Sn-Ni-Cu layer systems, Proc. of 36th IEEE-ISSE conference, Alba Iulia, pp. 103-108, (2013).
- [T30] **Illés B.**, Horváth B., Lipák B., Investigating Whisker Growth on Annealed and Recrystallized Tin Platings, Proc. of 34th IEEE-ISSE conference, Tatra Lomnic, Szlovákia, pp. 141-146, (2011).
- [T31] Horváth B., **Illés B.**, Shinohara T., Harsányi G., Whisker Growth on Annealed and Recrystallized Tin Platings, THIN SOLID FILMS 520 (2012) 5733-5740, (IF=1.604)
- [T32] **Illés B.**, Horváth B., Lipák B., Géczy A., Investigating Whisker Growth on Immersion Tin Surface Finishing, Proceedings of 35th IEEE-ISSE conference 2012:242-247
- [T33] **Illés B.**, Horváth B., Whiskering Behaviour of Immersion Tin Surface Coating, MICROELECTRON RELIAB 53 (2013) 755-760, (IF = 1.214)
- [T34] Horváth B., **Illés B.**, Shinohara T., Harsányi G., Microstructure of Sn Thin Films and its Effect on Whisker Growth after Stretching and Annealing, Proc. of 3rd Asian Materials Data Symposium, Okinawa, Japán, pp. 267-268, (2012).
- [T35] **Illés B.**, Skwarek A., Krammer O., Medgyes B., Horváth B., Bátorfi R., Tin Whisker Growth from Tin Thin Film, Proceedings of 39th IEEE-ISSE conference 2016:173-178.
- [T36] **Illés B.**, Skwarek A., Bátorfi R., Ratajczak J., Czerwinski A., Krammer O., Medgyes B., Horváth B., Hurtony T., Whisker growth from vacuum evaporated submicron Sn thin films, SURF COAT TECH 311 (2017) 216-222. (IF=2.589 (2016))
- [T37] Krammer O., **Illés B.**, Bátorfi R., Dušek K., Automatic characterisation method for statistical evaluation of tin whisker growth, MICROELECTRON RELIAB 73 (2017) 14-21 (IF = 1.371 (2016))
- [T38] Horváth B., **Illés B.**, Shinohara T., Harsányi G., Determining Whiskering Properties of Tin-Copper Alloy Solder-dipped Platings, PERIOD POLYTECH ELEC 54/3-4 (2010) 107-110.

- [T39] **Illés B.**, Horváth B., Shinohara T., Harsányi G., Tin Whisker Growth from Sn-Cu (0-5 wt%) Surface Finishes, Proc. of 17th IEEE SIITME conference, Temesvár, Románia, pp. 49-54, (2011).
- [T40] Horváth B., Shinohara T., **Illés B.**, Corrosion Properties and Tin Whisker Growth Behavior of Tin-Copper Alloy Thin Films, Proc. of 16th APCCC conference, Taiwan, pp. 1-5, (2012).
- [T41] Horváth B., Shinohara T., **Illés B.**, Corrosion Properties of Tin-Copper Alloy Coatings in Aspect of Tin Whisker Growth, J ALLOY COMPD, 577 (2013) 439-444. (IF=2.726)
- [T42] Horváth B., **Illés B.**, Shinohara T., Harsányi G., Copper-Oxide Whisker Growth on Tin-Copper Alloy Coatings Caused by the Corrosion of Cu₆Sn₅ Intermetallics, J MATER SCI 48 (2013) 8052-8059 (IF=2.305)
- [T43] **Illés B.**, Horváth B., Tin Whisker Growth from Micro-alloyed SAC Solders in Corrosive Climate, J ALLOY COMPD 616 (2014) 116–121. (IF=2.999)
- [T44] **Illés B.**, Horváth B., Tin Whisker Growth from Low Ag Content Micro-alloyed SAC Solders, Proc. of 37th IEEE-ISSE conference, Drezda, Németország, pp. 152-157, (2014).
- [T45] **Illés B.**, Fehérvári N., Relation between Tin Whiskering Ability Sn/Ag/Cu Solder Alloys and Current Load, Proceedings of 38th IEEE-ISSE conference 2015:173-178.
- [T46] **Illés B.**, Hurtony T., Medgyes B., Effect of current load on corrosion induced tin whisker growth from SnAgCu solder alloys, CORROS SCI 99 (2015) 313-319 (IF = 5.154)
- [T47] **Illés B.**, Horváth B., Géczy A., Krammer O., Dusek K., Corrosion induced tin whisker growth in electronic devices: A review, SOLDER SURF MT TECH 29/1 (2017) 59-68 (IF = 1.460 (2016))
- [T48] Bátorfi R., **Illés B.**, Krammer O., Whisker Formation from SnAgCu Alloys and Tin Platings – Review on the Latest Results, Proceedings of 21th IEEE-SIITME conference 2015:373-376

A tézisek tématerületeihez kapcsolódó egyéb publikációk:

- [E1] **Illés B.**, Measuring heat transfer coefficient in convection reflow ovens, MEASUREMENT 43 (2010) 1134–1141. (IF = 0.846))
- [E2] **Illés B.**, Distribution of the heat transfer coefficient in convection reflow oven, APPL THERM ENG 30 (2010) 1523–1530. (IF = 1.823)
- [E3] **Illés B.**, Kristóf G., Jakab L., Ruzinkó M., Gas Flow Simulation of a Fluxless Si Solder Bonding Oven, Proc. of 33th IEEE-ISSE conference, Varsó, Lengyelország, pp. 326-331, (2010).
- [E4] **Illés B.**, Kristóf G., Jakab L., Thermal and gas flow characterization of a fluxless Si solder bonding oven, EXP THERM FLUID SCI 35 (2011) 29–36. (IF = 1.414)
- [E5] **Illés B.**, Kristóf G., Gas Flow Simulations of a Fluxless Si Solder Bonding Oven, MICROELECTRON ENG 88 (2011) 760–766. (IF = 1.557)
- [E6] **Illés B.**, Bakó I., Numerical study of the gas flow velocity space in convection reflow oven, INT J HEAT MASS TRAN 70 (2014) 195-191. (IF=2.383)
- [E7] **Illés B.**, Comparing 2D and 3D numerical simulation results of gas flow velocity in convection reflow oven, SOLDER SURF MT TECH 26/4 (2014) 223-230 (IF = 0.872)
- [E8] Skwarek A., **Illés B.**, Synkiewicz B., Wroński S., Tarasiuk J., Witek K., Characterization of solder joints made with VPS on DBC substrate, J MATER SCI-MATER EL 28/2 (2017) 1769-1776. (IF = 2.019 (2016))
- [E9] Skwarek A., **Illés B.**, Horváth B., Géczy A., Zachariasz P., Bušek D., Identification and characterization of $\beta \rightarrow \alpha$ -Sn transition in SnCu1 bulk alloy inoculated with InSb, J MATER SCI-MATER EL (2017) in press (IF = 2.019 (2016))

[E10] Dušek K., Bušek D., Plaček M., Géczy A., Krammer O., **Illés B.**, Influence of vapor phase soldering fluid Galden on wetting forces (tombstone effect), J MATER PROCESS TECH 251 (2018) 20-25 (IF=3.147 (2016))

VI. Hivatkozott irodalom

- [1] Harsányi G., Illyefalvi-Vitéz Zs., Ripka G.: Multichip modulok, Műegyetemi Könyvkiadó, 2000.
- [2] Whalley D.C., A simplified reflow soldering process model, J MATER PROCESS TECH 150 (2004) 134-144.
- [3] RoHS, Restriction of Hazardous Substances Directive 2002/95/EC
- [4] Illyefalvi-Vitéz Zs., Krammer O., Pinkola J., Riegel B., Ruzsics N., Juhász G., Lead-free Soldering Implementation Issues, Proc. of the 4th European Microelectronics and Packaging Symposium (EMPS), Terme Catez, Slovenia, pp. 231-236, (2006).
- [5] Eftychiou M.A., Bergman T.L., Masada G.Y., A Detailed Thermal Model of the Infrared Reflow Soldering Process, J ELECTRON PACKAGING 115/1 (1993) 55-62.
- [6] Géczy A., Illyefalvi-Vitéz Zs., Szőke P., Investigations on Vapor Phase Soldering Process in an Experimental Soldering Station, MICRO AND NANOSYSTEMS 2/3 (2010) 170-177.
- [7] Pfahl R.C., Amman H.H., Method for Soldering, Fusing or Brazing, US Patent 3,866,307 1975.
- [8] Avataneo M., Navarrini W., De Patto U., Marchionni G., Novel perfluoropolyethers containing 2,2,4-trifluoro-5-trifluoromethoxy-1,3-dioxole blocks: synthesis and characterization, J FLUORINE CHEM 130 (2009) 933-937.
- [9] Krammer O., Illés B., Lead-Free Soldering Technology Review - Evaluating Solder Pastes and Stencils, Proc. of 29th IEEE International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), St. Marienthal, Németország, pp. 86-91, (2006).
- [10] Britton S.C., Spontaneous Growth of Whiskers on Tin Coatings: 20 Years of Observation, Transactions of the Institute of Metal Finishes 52 (1974) 95-102.
- [11] Lee B.Z., Lee D.N., Spontaneous Growth Mechanism of Tin Whiskers, ACTA MATER 46/10 (1998) 3701-3714.
- [12] Leider W., „Dampfphasenlöten - Grundlagen und praktische Anwendung“, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Germany, 2002.
- [13] Horváth B., Examination of tin whisker growth on electronics devices, Phd disszertáció, 2012, BME-OMIKK.
- [14] Su P., Ding M., Chopin S., Effects of reflow on the microstructure and whisker growth propensity of Sn finish, Proc. of Electronic Components and Technology Conference, Orlando, USA, pp. 434-440, (2005).
- [15] Chen Y. H., Wang Y. Y., Wan C. C.: Microstructural characteristics of immersion tin coatings on copper circuitries in circuit boards, SURF COAT TECH 202 (2007) 417-424.
- [16] Takeuchi M., Kamiyama K., Suganuma K., Suppression of tin whisker formation on fine pitch connectors by surface roughening, J ELECTRON MATER 35 (2006) 1918-1925.
- [17] Kehrner H.P., Kadereit H.G., Tracer Experiments on the growth of tin whiskers, APPL PHYS LETT 16 (1970) 41.
- [18] Bozack M.J., Crandall E.R., Rodekohl C.L., Dean R.N., Flowers G.T., Suhling J.C., High Lateral Resolution Auger Electron Spectroscopic (AES) Measurements for Sn Whiskers on Brass, IEEE Trans. Elect. Packag. Manuf., 33/3 (2010) 198-204.
- [19] Chuang T.-H., Chi C.-C., Effect of adding Ge on rapid whisker growth of Sn-3Ag-0.5Cu-0.5Ce alloy, J ALLOY COMPD480 (2009) 974-980.
- [20] Li C.-F., Liu Z.-Q., Shang J.-K., The effects of temperature and humidity on the growth of tin whisker and hillock from Sn5Nd alloy, J ALLOY COMPD550 (2013) 231-238.
- [21] Géczy A., Investigations into the Process of Vapour Phase Soldering, Phd disszertáció, BME, (2014).