

gattila_kt_460_26



Budapest University of Technology and Economics
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Department of Electronics Technology / Elektronikai Technológia Tanszék

Az áramkörüi hordozók kihívásai modern szereléstechológiai környezetben

MTA doktori értekezés tézisei

Attila Géczy

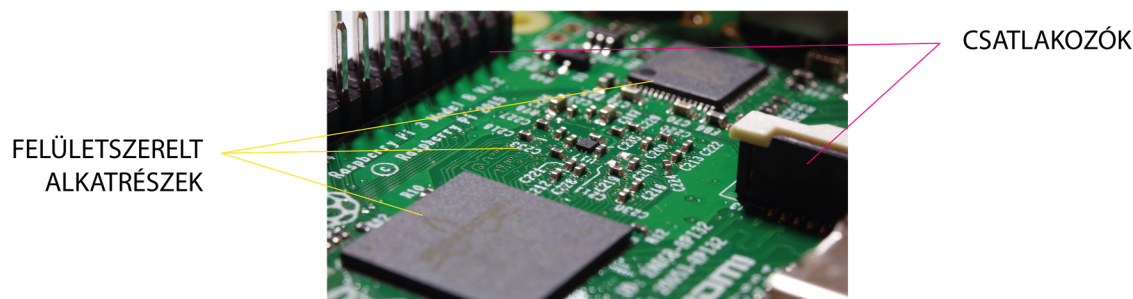
Budapest, 2026

1. Bevezetés

A korszerű elektronikus áramkörök jelen vannak a háztartásban, a járműben, az okoseszközeinkben, sőt a legkülönbébb szakmákat és szórakoztatásunkat támogató rendszereknek is szerves részei. A világ fejlett részein akár 8 órától is több időt töltenek az emberek digitális rendszerekhez kötve [1]. Az eszközeink szinte minden esetben tartalmaznak áramköri modult. Ennek a tágabb értelemben vett fogalomnak hangsúlyos része a nyomtatott áramköri hordozó (angolul „Printed Circuit Board”, röviden: PCB), másképpen nyomtatott huzalozású lemez. Ezek a hordozók az aktív és passzív alkatrészecskék síkban történő összeköttetéséért felelnek. Az áramköri gyártási és szerelési technológiák az 1960-as évek óta rohamosan fejlődnek [2], a közelmúltban a hordozható eszközök fokozott piaci jelenléte miatt az alkatrészecskék kivezetéseinek lábtávolsága (raszterosztása) 0,3 mm-re vagy még kisebbre csökkent, emellett az alkalmazott anyagok is változnak és fejlődnek. Ezek a tényezők hajtóerőt jelentenek az egyre nagyobb alkatrészecsűrűséggel bíró, jobb minőségű és megbízhatóságú elektronikai modulok gyártásához. Az iparban a felületszerelt alkatrészecskék („Surface Mounted Device”, röviden SMD) egy síkban található kivezetéseinek szerelőlemezekre történő tömeges, egyidejű bekötését, a felületszerelést („Surface Mounting Technology”, röviden SMT) egy elterjedt forrasztási technológiával, az újraömllesztéses forrasztással („reflow soldering”), jellemzően ólommentes forrasztóvízvezetékkel végzik.

A felületszerelés során a nyomtatott huzalozású lemezekre kialakított kontaktusfelületekre stencilnyomtatással viszik fel a forrasztanyagot, paszta formában, amely forrasztóvízvezeték-szemcsék szuszpenziója, folyasztószer és oldószer elegyében. A lemezre ezután automata beültetőgépekkel helyezik el az alkatrészecskéket, végül pedig hőközléssel olvasztják meg a szerelvényen a forrasztanyagot. Ez a folyamat az újraömllesztéses forrasztás, mely során a forrasztópasztában található fémötvözet megömlik, mégpedig a szerelvényen bekövetkező hőátadás hatására. A forrasztás utolsó, hűtési szakaszában a megömlött ötvözet ismét megszilárdul, kialakítva a mechanikus és villamos kötést az alkatrészecskék és a lemez kontaktusfelületei között.

A fentebb bemutatott hőtranszport mellett az anyagtranszport is jelen van a folyamatban, a kötések ugyanis a kontaktusfelület-forrasztó határfelületen diffúziós, úgynevezett intermetallikus fázis réteget alkotva („intermetallic compound layer”, röviden: IMC, ritkábban IML) alakítják ki a kötés jellegét. A kötések természetesen villamos vezetőként is fontos szerepet játszanak a hordozón lévő huzalozások és a bekötött alkatrészecskék között. Az újraömllesztéses forrasztást jellemzően infraszugázásos, kényszerkonvekciós és újabban gőzfázisú forrasztókemencékkel végzik, melyek a gyártás jellege alapján lehetnek gyártósorba illeszthető („inline”), vagy különálló („offline”) berendezések. Az 1.1. ábra egy jellegzetes, kereskedelmi forgalomban kapható áramkörön mutatja be a felületszerelt alkatrészecskék változatos kivitelét és elhelyezését néhány furatszerelt csatlakozó mellett.

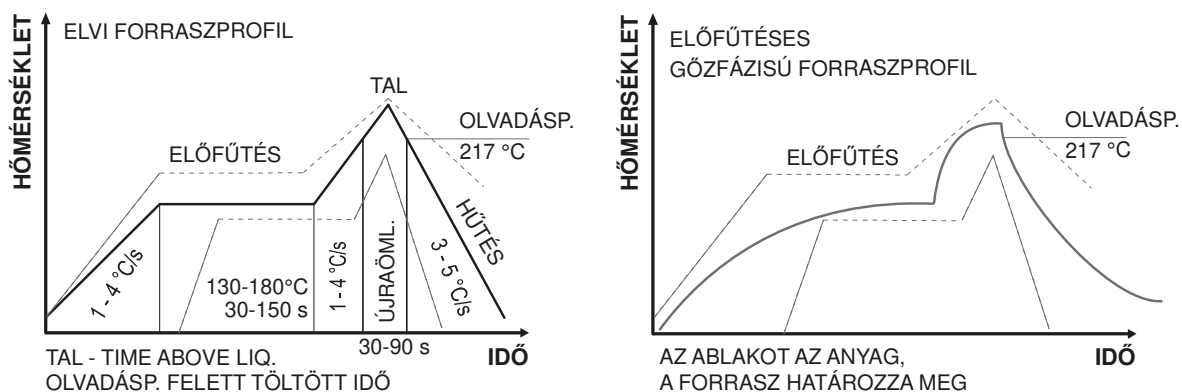


1.1. ábra. Elektronikai alkatrészecskék egy modern egykártyás számítógépen

Az elektronikai gyártók által leggyakrabban használt forrasztóberendezések a konvekciós hőátadáson alapuló kemencék. A konvekciós fűtés elve a forró gáz (levegő és pl. nitrogén) befűtésére épül. A konvekciós kemencék előnye a reprodukálható hőkezelés és a nagy termelékenység. A technológiai alkalmazásuk azonban kevésbé rugalmas, az üzemeltetési

költségük viszonylag magas más reflow forrasztási technológiákhoz képest. Bár a konvekciós kemencék robusztus rendszerek, a nem megfelelő beállítások, anyagmegválasztás, valamint az elhanyagolt, nem megfelelően karbantartott eszközök forrasztási hibákat eredményezhetnek. A gőzfázisú forrasztás („vapour phase soldering”, röviden: VPS) egy alternatív módszer, ami már a hetvenes évek óta létezik [3], de hosszú időn keresztül háttérbe szorult a fűtőközegként használt, környezetre káros hatású halogénezett szénhidrogének („Chlorofluorocarbon”, röviden CFC) miatt [4]. A kondenzációs hőátadáson alapuló VPS alkalmazása az új típusú hőközlő folyadékok [5] kifejlesztésével, valamint a magasabb hőmérsékletet igénylő ólommentes technológiák elterjedésével került ismét előtérbe. A VPS technológiával létrehozott kötések minősége általában egyenértékű, olykor jobb is [6,7,8] a konvencionális technológiákkal készült kötések minőségéhez képest, így pl. űrtechnológiai és teljesítményelektronikai szerelvények gyártásához is gyakran alkalmazzák.

Az újraömllesztés forrasztás fejlődését az áramkörü szerelvények fejlődése következetesen gyorsítja. Az ólommentes technológiák bevezetése [9] a forrasztási hőmérsékletek szintjét megnövelte – az elterjedt ón-ezüst-réz (SAC305; 96,5% ón, 3,0% ezüst és 0,5% réz) ólommentes forrasz jellemzően 30 °C-kal magasabb olvadásponttal bír (~217 °C), mint a hagyományos ón-ólom alapú (SnPb, pl. 63% ón, 37% ólom, eutektikus arányban, ~183 °C), ehhez pedig igazodnia kell a szerelvény anyagainak. Ezen a ponton érdemes megemlíteni az úgynevezett forrasztási hőprofilokat is, amely a hordozó, alkatrész, vagy kötés hőmérsékletét írja le a forrasztási ciklus során. Az 1.2 ábra az elvi újraömllesztéses profilt (bal) és egy valós előfűtési gőzfázisú forrasztási profilt (jobb) mutatja be, javasolt ablakon belül (szaggatott vonal).



1.2. ábra Elvi újraömllesztéses forrasztási profil (bal), előfűtési gőzfázisú forrasztási profil (jobb)

Az 1.2 ábra bal oldalán látható forrasztási profil első szakasza a felfűtési rámpa (tip.: 1-4 °C/s), majd az előfűtés következik, amelyre a folyasztószer aktiváció és a hőtágulási kiegyenlítés miatt van szükség (tip.: 130-180 °C, 30-150 s). Az újraömllesztés szakasza során olvad meg a forrasz (az olvadáspont felett töltött idő a TAL, „Time Above Liquidus”), és végül a hűtés következik (tip.: 3-5 °C/s). A forrasztási ablakot (szaggatott vonallal jelölve) általában az anyagi rendszer (hordozó, forrasztótvözet) határozza meg. Jól szabályozott a forrasztás, ha ezen az ablakon belül marad a folyamat. A jobb oldalon az előfűtési gőzfázisú forrasztás tipikus profilja látható, amelynek előfűtése során általában egy fűtött előtérben várakozik a hordozó, végül a telített gőzzel való érintkezés ugrásválasz-jellegű, heves fűtésben folytatódik, amely a forrásponti hőmérsékletnél tetőzik, és nem is lépi túl azt. A szerelt hordozó szempontjából itt is meghatározó az ablakon belül tartott szabályzás és az olvadáspont felett töltött idő (TAL).

A hordozóra implementált funkció- és alkatrészsűrűséget fokozó, csökkenő méretű alkatrészek elterjedése azt okozza, hogy ott is megjelentek az áramkörü tervekben (pl. a hazai iparban domináns autóipari elektronikák szerelvényeiben), ahol nem is feltétlenül lenne szükség a kicsi méretre, de az integrációs igények és a homogenizálódó alkatrészkészlet miatt alkalmazásuk gyakori.

A közelmúltban néhány számottevő szabályozás lépett életbe, amely korlátozza a veszélyes anyagok használatát az elektronikai gyártásban, például az RoHS [10] (szabad fordításban „Káros anyagok korlátozása az elektronikában”, „Restriction of Hazardous Substances”), amely fontos állomás volt a 2000-es évek közepén. Az ólomalapú ötvözetek kivonása, a kadmium, a higany és bizonyos égésgátlók (pl. polibrómozott bifenilek) tiltása határozott lépés volt a környezetbarátabb elektronika irányába. Az alternatívák kereséséről, azok alkalmazhatóságáról széles körű kutatást folytattak az elmúlt két évtizedben, például az ólommentes forrasztanyagok [2] tekintetében. Az RoHS azonban csak a lépések kezdetének számít, mert a szakma az elmúlt években a fenntarthatóság irányában keresi a CO₂ kibocsátás csökkentésének a lehetőségeit, az e-hulladék mennyiségének a csökkentését, a környezetbarát anyagok bevonását, ez pedig sokszor az ENSZ (Egyesült Nemzetek Szövetsége) által létrehozott SDG („Fenntartható Fejlődési Célok”, „Sustainable Development Goals”) pontoknak megfelelően [11] történik.

Az utóbbi években az elektronikai szereléstechológia kutatási területén kutatási és fejlesztési munkát végezve, a munkásságomhoz köthető ipari igények és szakirodalom áttekintése után megállapítottam, hogy az áramköri hordozó központi szerepet játszik a folyamatokban, a minőségi és megbízhatósági, továbbá a fenntarthatóság szempontjából fontos kérdésekben. A folyamatok leírása, modellezése, a hibaképek feltárása, anyagkészlet újragondolása pedig csak bizonyos részletekre terjed ki. Ezek alapján kezdtem feltárni a megoldandó problémákat és megfogalmazni a célkitűzéseket. Munkám kezdetben a PhD disszertációban megadott eredményeim folytatólagos megoldásain alapult, de néhány év múlva a hordozón történő hőátadás kutatásából, a tervezői, gyártói megfontolásokból és a fenntarthatósági célokból új motivációk formálódtak.

1.1 A kutatási terület egyes megoldandó problémái

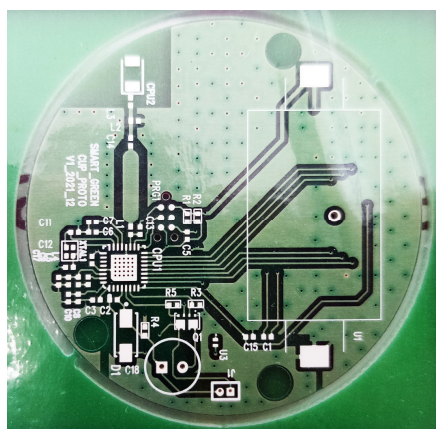
1.1.1 A hordozón történő hőátadás a gőzfázisú újraömllesztés forrasztásban

Jelen dolgozat első témaköre a hordozón gőzfázisú forrasztás során történő hőátadás sajátosságait járja körül. A gőzfázisú forrasztás irodalomban jegyzett legfőbb előnye az egyenletes kondenzációs hőátadás [2, 12]. A kondenzáció során kialakuló egybefüggő filmréteg hőátadása révén elkerülhető a sugárzáson és konvekciós hőátadáson alapuló forrasztási módszerek fő problémája: az egyenetlen melegítés és a túlfűtés. A korábbi munkáimat leszámítva, az irodalom az ipari megoldások ismertetésén és néhány egyszerű leírason felül [8] nem mutatja be részletesen a folyamat mérés technikáját, valamint hiányosan adja meg a folyamat kondenzációs hőátadáson alapuló leírását.

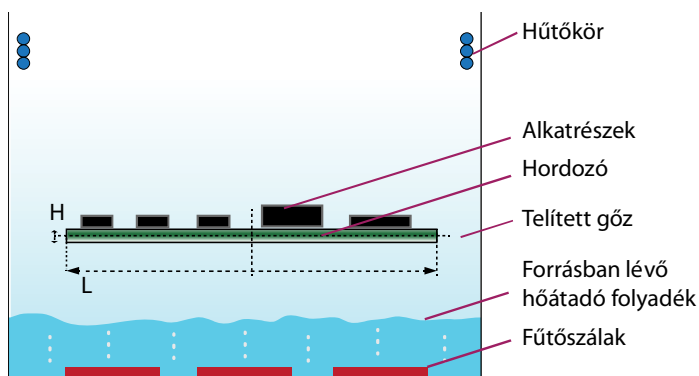
A lecsapódó hőközlő folyadék (gyakorlatban kizárólagosan alkalmazott „Galden” perfluor-poliéter, azaz PFPE hőátadó folyadék, eredetileg Solvay, ma Syensqo gyártmány, Olaszország) jól nedvesíti az áramköri hordozó felületét, a gőzfázisú forrasztás során filmszerű kondenzáció [13] megy végbe a vízszintes módon gőztérbe helyezett lemez alsó és felső felületén. A kondenzációs hőátadás leírására az irodalomban olyan modellek találhatók [14, 15], melyek a Nusselt-féle leírásból kiindulva speciálisan a vízszintes, lemez jellegű testek felületén lezajló folyamatokkal foglalkoznak. Ezek egy test adott alsó és felső oldalait külön vizsgálják. Az irodalomban azonban még nem található példa arra vonatkozólag, hogy a specifikusan, gőzfázisú forrasztás esetében is alkalmazható párhuzamos elvű (pl. egy munkatérben elhelyezett, alsó és felső oldalon egyszerre fűtött szerelőlemezre értelmezett), explicit modellel közelítené a problémát. Ez kifejezetten hiányzik a különféle alakzatoknak megfelelő, például szögletes, négyzetes, vagy görbékkkel határolt, köralakú, különböző méretű hordozók tekintetében. A PhD dolgozatom [16] bemutatott eredményeiben megtalálható négyszög alakú szerelőlemezek leírásának kiegészítéseként szükség van a korong („disc”) alakú lemezek leírására, mert a filmszerű kondenzáció minőségét tekintve eltérő módon zajlik ezeken a testeken a sarkok és az egyenes élek híján, mint a szokásos négyszög alakú hordozókon. Az áramkörtervezői tevékenységem során számos helyzetben köralakú szerelőlemez tervezésére is felmerült igény, ezek az alakok a moduláris beépülés és az az ipari megoldások tekintetében is, például LED-es

(világító dióda, „light emitting diode”) fényforrások hordozóiban [17] egyre gyakoribb megoldásként jelentkeznek. Az 1.3. ábrán egy általam tervezett, vezeték nélküli kommunikációra képes, autóelektronikai környezetben használt, folyadékszint-mérésre specifikált nyomásmérő modul hordozóját mutatom be (keretben, a hordozó körben kivágott, két rögzítő között gyakorlatilag szabad élekkel rendelkezik).

Vizsgálni kell tehát a lemezek alsó és felső oldalra alkalmazott modellek és az irodalomban található korrekciós tényezők gőzfázisú forrasztásra történő alkalmazhatóságát. A cél egy párhuzamos, alsó-felső oldalra érvényes, a folyamatokat figyelembe vevő (lecsapódás, áramlás, gravitáció, szabad él hatása, alsó torlódások hatása), összegzett hőátadási együttható meghatározása. Így, a korábbi munkámban négyszög alakú lemezekre felírt módszer kibővítéseként, a korong alakú nyomtatott huzalozású lemez melegezése zárt alakban számolhatóvá válik, telített gőzben való forrasztás esetére. Az ilyen módon megalkotott modell pontosíthatja az irodalomban található [8,15] hőátadási együttható értékeket. A modell segítségével összetett szimulációs szoftverek nélkül is gyors számításokon alapuló becslést lehet adni a lemez folyamat során várható hőmérsékletéről, azaz a forrasztási hőprofilról.



1.3. ábra Kör alakú szerelőlemez felületszerelt alkatrészek rajzolataival szerelés előtt (saját terv)



1.4. ábra A szerelőlemez gőztérbe helyezve: a hordozó magassága (H) és hossza (L) jelölve.

Mivel a gőzben történő folyamat (abban a munkatérben, amit az 1.4. ábra is bemutat), vagy szűkebb értelemben a kondenzáció modelljének felírása rendkívül komplex, ezért a mérési hőmérsékletre visszavezethető determinisztikus inverz hőátadási probléma vizsgálata fontos megközelítés, és az irodalom még ezt sem vizsgálta kellő részletességgel gőzfázisú forrasztás esetére. Ez azt jelenti, hogy mért hőmérsékleti profilok segítségével, analitikus úton, zárt alakban, a vizsgált geometria anyagának ismeretében, a rendszert a lehető legkevésbé megzavaró szenzoros hőmérsékletmérési eredményekből vissza lehet következtetni egy adott testben értelmezett hőátadási együtthatóra. Megfelelően elhelyezett és rögzített hőelemekkel a szerelőlemezen zajló filmszerű kondenzáció hőátadásának sarok- és szélhatása kvantitatív módon is vizsgálható. A modellekben alapértelmezett feltétel a lemez vízszintes orientációja. Az 1.3. ábrán is látható, széleken történő elfolyások egyenetlen rétegvastagságot feltételeznek, ami a hőátadást is befolyásolhatja. A vízszintes orientáció változása, enyhe dőlésszögek hatása is jelentős lehet. A kondenzátum lefolyását nagyban befolyásolhatja a dőlésszög, ez pedig a kondenzátumréteg torlódó vastagodása és vékonyodása miatt [15] a hőátadásra is hatással lehet, adott ponton fokozva vagy mérsékelve azt. Fontos látni, hogy a hőátadásbeli egyenetlenségek forrasztási hibajelenségekhez, pl. sárkőeffektushoz vezethetnek, amennyiben két-kivezetéses alkatrészek két forrasztási pontja közötti tengelyen a megolvadás pillanatában is jelentős különbségek lépnek fel. Ekkor a hamarabb megolvadó oldal forrasztása a hirtelen megnövekedő felületi feszültség miatt kihúzza a másik oldal forrasztásából az alkatrészt [2].

A hordozón történő hőátadás a hőközlő folyadékok forraszpontjától függ, ezek pontos gyári beállítása a PFPE polimerláncok hosszától függ, a folyamat szempontjából viszont alacsonyabb

forráspontú folyadékkal is helyettesítő lehet a klasszikus újraömllesztési folyamatok vizsgálata; ezzel a validációs mérések is laboratóriumi szinten kezelhetőbbé válhatnak, és egy új kutatási irány is nyílhat az alacsony olvadáspontú forrasztótvözetek (röviden: LTS, azaz „low temperature soldering”) aspektusából.

A gőzfázisú forrasztás során hőátadást szenvedő hordozó tématerületével az 2. fejezetben foglalkozom.

1.1.2 A hordozó tervezéséből fakadó kérdések: zsugorodás (maradó alakváltozás)

A második vizsgált problémakör is a hordozón történő hőátadásból ered, de itt ipari környezetben, nagy volumenű gyártás esetében felmerülő, hőátadásból fakadó problémára összpontosítok. A terület egyik aktuálisan vizsgált problémája a forrasztási hőmérséklet változása által kiváltott maradó alakváltozás [18, 19]. A lemezek Z tengelye (azaz vastagsága) mentén értelmezett vetemedés („warpage”) széles körben vizsgált jelenség [20, 21]. A laterális (XY) maradó alakváltozással, pontosabban a hordozó zsugorodásával kapcsolatban azonban korlátozottak a tapasztalatok és a kutatásom kezdetekor az irodalomban sem volt megalapozva a terület. A zsugorodás elsősorban az első szerelt oldal (felső, „top” oldal) újraömllesztési ciklusa után figyelhető meg, és a második szerelési oldal (alsó, „bottom”) technológiai folyamatainál okoz problémát. A méretváltozás alapvetően a hordozó üvegesedési hőmérsékletének (T_g) elérése után lesz számottevő – az FR4 (azaz égésgátolt, 4. osztály; „Flame-Resistant/Flame-Retardant Class 4”) típusú kompozit áramköri lemezekben található vázanyag (gyanta) epoxi a T_g fölött fokozott hőtágulást szenved el, ami adott esetben visszahűléskor megfigyelhető hiszterézissel terheli a hordozót, és maradó zsugorodást eredményez.

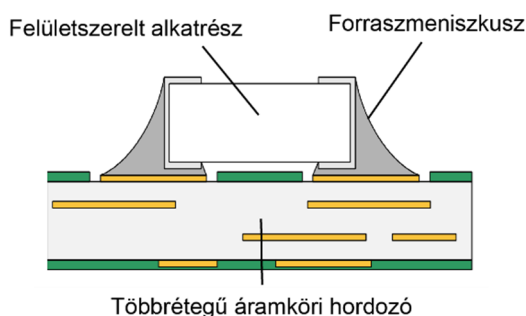
Ha az újraömllesztési forrasztás felfűtési ciklusa során zajló melegedés, majd hűlés maradó negatív alakváltozást okoz, akkor beszélhetünk „zsugorodásról” azaz „shrinkage” jelenségről. Az ólommentes technológia megnövekedett hőmérsékleti követelményeivel a jelenség fokozódik. A zsugorodási hatások a kisebb felületszerelt alkatrészeknél tombstone, azaz „sírkőeffektus” hibajelenséget okozhatnak (ld. 1.1.1). Ennek a fentiekben tárgyaltól eltérő gyökérok az, hogy a stencilnyomtatással felvitt forrasztás a zsugorodott oldal mintázatán eltolási (offset), vagy más néven pozícióhibával rendelkezik. A zsugorodás okozta forrasztási hibák a szerelvény oldalai által meghatározott XY tengelyek mentén, jellemzően a szerelvény hosszabbik oldala mentén jelennek meg. A zsugorodás és az ebből következő, a stencilnyomtatás során okozott eltolási pozícióhiba problémáját Li [22] említi, azonban a téma mélyebb tárgyalása, gyökérokainak pontosítása, és a megoldási módszerek nem álltak készen az irodalomban.

Jelen dolgozat a 3. fejezetben részletezi a hordozó zsugorodásával és a következő hibajelenségek enyhítési lépéseivel foglalkozó kutatást.

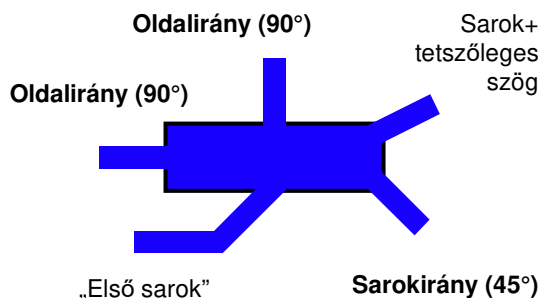
1.1.3 A hordozó tervezéséből fakadó kérdések: elektromigráció

Az iparban is egyre gyakrabban használt, kis méretkódú felületszerelt ellenállások (pl. 0603, 0402) nem csak a szerelés, hanem a hosszú távú működés megbízhatósága kapcsán is új kérdéseket vetnek fel. Az irodalomban alaposan részletezik a BGA (Ball Grid Array típusú alkatrészek) és flip-chip lapkák golyós kötéseinek minőségi és megbízhatósági kérdéseit, ezek között kiemelten a nagy áramsűrűséggel terhelt kötések hosszú távú megbízhatóságát [23-27]. Az irodalom megállapítja, hogy a kötés meniszkuszban (ld. 1.5. ábra) található áramút olyan áramsűrűségeket eredményezhet a kötések bizonyos pontjaiban, amelyek akár a forraszkötés szerkezetének változásához, a Joule-hő miatt megemelkedett hőmérséklet miatti felgyorsult diffúzióhoz, komolyabb esetekben elektromigrációhoz vezethetnek, ami anyagtranszportot okozhat az áram útjában. Ez minőségi és megbízhatósági problémákhoz vezethet: megvastagodhat a diffúziós IMC réteg, anyagelhordódásban zárványok és anyagtöbbletet jelentő kitérkedések (hillock) keletkezhetnek, megváltozhat a kötés mechanikai szilárdsága. A felületszerelt chipméretű alkatrészek kötéseinek ilyen irányból történő jellemzésére viszont nem találtam példát az irodalomban, pedig ezek az alkatrészek nagy számban vannak jelen a hordozón és komplex problémát vetnek fel. Egyrészről a kötések mérete csökkenő tendenciát mutat [28],

a forrasztott kötés meniszkusz alakja pedig az áramút szempontjából aszimmetriával jellemezhető, amit a hordozó tervezésekor megvalósított vezeték becsatlakozás („track-to-pad”, vagy másképpen „pad entry”) iránya tovább bonyolít (lásd 1.6. ábra). A becsatlakozási szögek esetében az oldalirányt (90°) és a sarokirányt (45°) preferálja a tervezői ökölszabály, minimalizálva a hegyesszögeket, és az ebből következő gyártási pontatlanságokat, rézréteg-alámaródást. (A tetszőleges becsatlakozási szöget a rács-, azaz grid-alapú tervezés miatt nem preferálják, az „első sarok” esetében pedig az első töréspont a kontaktusfelület szélénél nem javasolt, mert hegyes szöget és nem megfelelő vezető-vezető távolságokat eredményezhet).



1.4. ábra Bekötött felületszerelt ellenállás



1.5. ábra Vezeték-kontaktusfelület becsatlakozási szögek áramkört tervezés során

Célom tehát, hogy a golyós kötések hengerszimmetrikus irodalmi példáitól eltávolodva a geometriai szempontból komplex meniszkusz alakzatokban (lásd 1.4. ábra) is feltárjam az áramsűrűség térbeli alakulását, és a bekötések irányából fakadó aszimmetrikus áramutak során kialakuló áramsűrűség maximumokat, valamint az ebből fakadó hatásokat (pl. anyagtranszport az intermetallikus határreteken és a kötés tömbi anyagában). Ehhez kézenfekvő megoldás lehet a különböző golyós kötések vizsgálatára is gyakran alkalmazott végeelem modellezés [29, 30]; ennek igazolását pedig időben több száz órán át terhelt kötéseken lehet elvégezni, időszakos mintavételezéssel. Így a diffúziós rétegek átalakulásának folyamata követhetővé válik, illetve megfigyelhető lesz tényleges elektromigráció esetén a kötésben lezajló anyagtranszport. A jelenség igazolása után meghatározható lehet a megbízhatóbb kötések szavatoló áramkört hordozó layout tervezési szabály.

A fenti példákban felmerülő elektromigráció kérdésével a 4. fejezetben foglalkozom.

1.1.4 A hordozó anyagának fenntartható alternatívája: PLA/Lenvászon kompozit

Az 1987-ben közzétett Brundtland-jelentést [31] az ENSZ fogalmazta meg. Ez a fenntarthatóságot úgy definiálja, hogy a társadalmi és gazdasági fejlődés a jelen szükségleteinek kielégítése közben nem veszélyezteti a jövő generációk szükségleteit. Röviden: egy fenntartható fejlődési modellben a gyermekeink holnap is hasonló lehetőségekkel és erőforrásokkal tudnak gazdálkodni, mint amilyenekkel mi is tudunk a mai napon. A szigorú modell szerint a gazdasági tőke növelése csak a természeti tőke rovására lehetséges. A természeti tőke ugyanis véges, környezetünk részeiként és azok alrendszeréből származhatnak. Sajnos meg kell állapítani, hogy a jelenlegi elektronikai ipar sem közel, sem pedig hosszú távon nem tud megfelelni a fenntarthatóságnak, végesek a nyersanyag-készleteink és végesek a hulladéktároló, valamint hulladék-feldolgozó kapacitásaink is.

A környezet és az erőforrások fenntarthatósága nem megkerülhető. Az elektronikai hulladék, a körforgásos feldolgozás, a környezetbarát hulladékkezelés hatalmas terhet ró az elektronikai iparágra. Egy lehetséges megoldás a terhelés enyhítésére az alternatív technológiák és anyagok keresése. Az újraömlasztás forrasztás kapcsán kerültem a hőtechnikai szempontokból igen érzékeny politejsav-alapú („polylactic acid”, röviden: PLA), fenntartható, lebontható, bioforrásból származó műanyagokból készült áramkört hordozók témaköréhez. A kezdetben vázerősítés nélküli hordozókon sikeres demonstrátorokat hoztunk létre, ám az erősítés és

égésgátlás elengedhetetlen része a magasabb szintű elektronikai alkalmazhatóságnak. Az áttörésre várni kellett.

Ezt egy kutatási együttműködés kapcsán előtérbe került égésgátolt PLA/Lenvászon kompozit elektronikai alkalmazhatósági kutatása követte, meghozva a várt eredményeket. A széles körű szakmai elfogadáshoz azonban az elektronikai elvárásoknak megfelelő minősítéseket el kell végezni, az eredmények alapján pedig a jelenlegi szabványok szerinti összevetésekből következtetéseket kell levonni, amit az irodalomban biológiai forrásból származó, égésgátolt, fenntartható kompozitokra (elektronikai szempontból) még nem végeztek el. A technológia demonstrálása emelt (megközelítőleg 3-4-es szintű) technológiai készültségi szinten („Technological Readiness Level 3-4”, röviden: TRL 3-4 [32]) tovább bizonyíthatja az újszerű megoldás hitelességét és érettségét az esetleges továbblépésre. A szabványokkal való összevetés, az ezekhez kapcsolódó komplex, multidiszciplináris kísérletek új eredményekkel szolgálhatnak a hordozó jövőbeli alkalmazhatósága kapcsán.

A hordozó fenntarthatóbb anyagon való megvalósításával az 5. fejezetben foglalkozom.

1.2 Célkitűzés, kutatás módszerei

Áttekintve az áramköri hordozók kapcsán felemerült nyitott kérdéseket, az alábbi pontokat tűztem ki kutatásaim céljául:

A hordozón történő gőzfázisú forrasztás során bekövetkező hőátadással kapcsolódóan:

- olyan hordozószintű hőátadási modell létrehozását, amely a filmszerű kondenzáció elvéből levezetett hőátadási együtthatóval, explicit módon leírja a munkatérbe helyezett köralakú hordozók mindkét oldalának párhuzamos melegegését, azaz a telített gőzben történő forrasztáshoz szükséges hőátadást.
- Olyan hordozószintű, alkalmazott szenzorikai kísérletsorozaton, valamint determinisztikus inverz hőátadási megoldáson alapuló számítás kidolgozását, amellyel effektíven leírható a négyszétes és a köralakú szerelőlemezeken zajló kétoldali hőátadás, valamint a felmerülő sarokhatás.
- Olyan hordozószintű, alkalmazott szenzorikai kísérletsorozaton, valamint determinisztikus inverz hőátadási megoldáson alapuló módszer kidolgozását, amellyel a gyakorlatban is előforduló, dőlésszöggel rendelkező hordozótartó esetleges hőátadási jellemzőit, valamint az ebből fakadó változásokat fel lehet tárni, adott esetben pedig az alkalmazó hasznára fordítani.

A hordozó XY zsugorodásával és az ebből fakadó hibaminimalizálással kapcsolódóan:

- olyan részletes módszer kidolgozását, amelyben a hordozószintű maradó alakváltozás, specifikusabban a zsugorodási hiba feltárható az elmélet és az ipari gyakorlat megfelelő kidolgozásával és összeillesztésével. A kutatás során fel kell tárnom a zsugorodás gyökérokát, valamint meg kell valósítanom a következőképpen előálló pozícióhiba kompenzálását. Így a keletkező gyártási hibaköltség és hulladék redukálása az alkalmazási cél.

A hordozó huzalozásának tervezéséből fakadó, felületszerelt kötésekben kialakuló elektromigráció-hibaminimalizáláshoz kapcsolódóan:

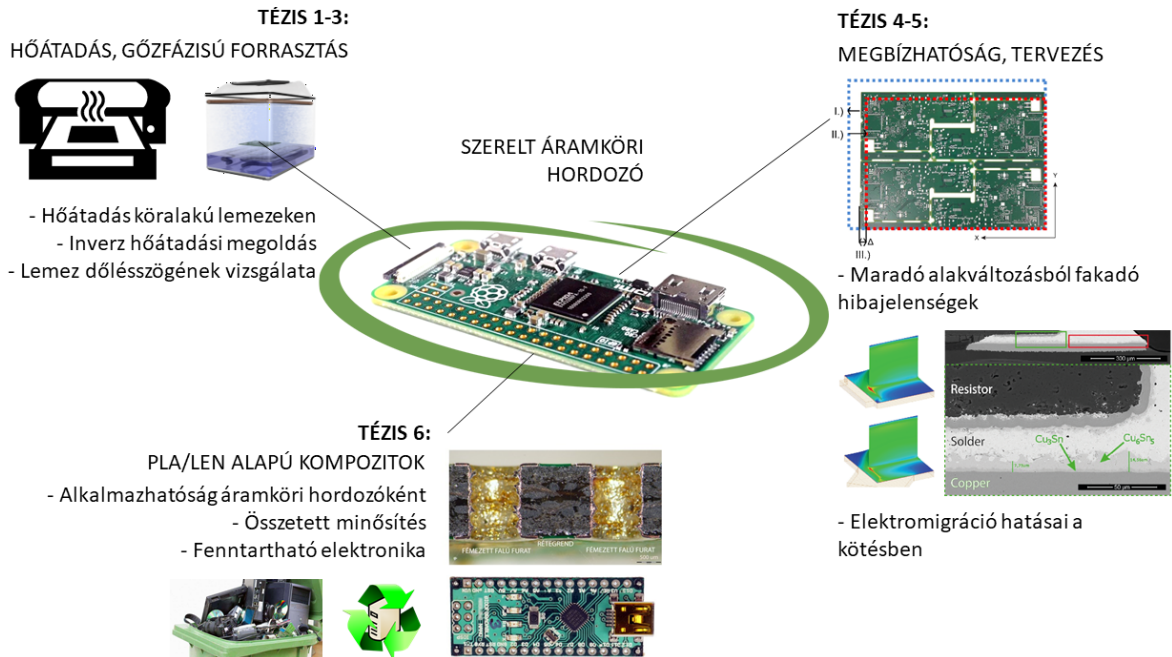
- olyan hordozószintű, áramköri tervezésből gyökerező jelenség feltárását, modellezését és igazolását, amely a gyakran alkalmazott, felületszerelt, chipméretű passzív alkatrészek komplex geometriájú forraszkötésében folyó áram eloszlásából ered és kellő áramerősség esetében elektromigrációs jelenség formájában is megjelenhet, a layout-tervezésénél a huzal-kontaktusfelület (track-to-pad) becsatlakozási szögétől függően.

A hordozó fenntartható, PLA-alapú, lenvászonnal erősített, lebontható alapanyagokkal való helyettesítéséhez kapcsolódóan:

- A PLA/len kompozitból készült hordozó minimum kétrétegű áramköri hordozóként való alkalmazhatóságát, valamint hiteles demonstrátor bemutatását, amely a lehetőségek és feltárt korlátok keretein belül először igazolja a PLA/len alkalmazási lehetőségeit.

- Olyan, az alkalmazási területnek (többretegű, felületszereléssel kompatibilis áramköri hordozó) megfelelő *komplex, multidiszciplináris minősítés* kidolgozását, amellyel az újszerű, lebontható, környezetbarát PLA/len kompozitból készült hordozók lehetséges alkalmazási területeinek megfelelő *perspektivikus technológiai készsűltsege is igazolható*.

Az 1.7. ábra bemutatja az áramköri hordozó kapcsán felmerült célok és kutatási irányok, valamint a hozzájuk tartozó tézisek csoportosítását.



1.7. ábra: Az áramköri hordozóhoz köthető egyes célkitűzések ábrázolása

2. Új tudományos eredmények

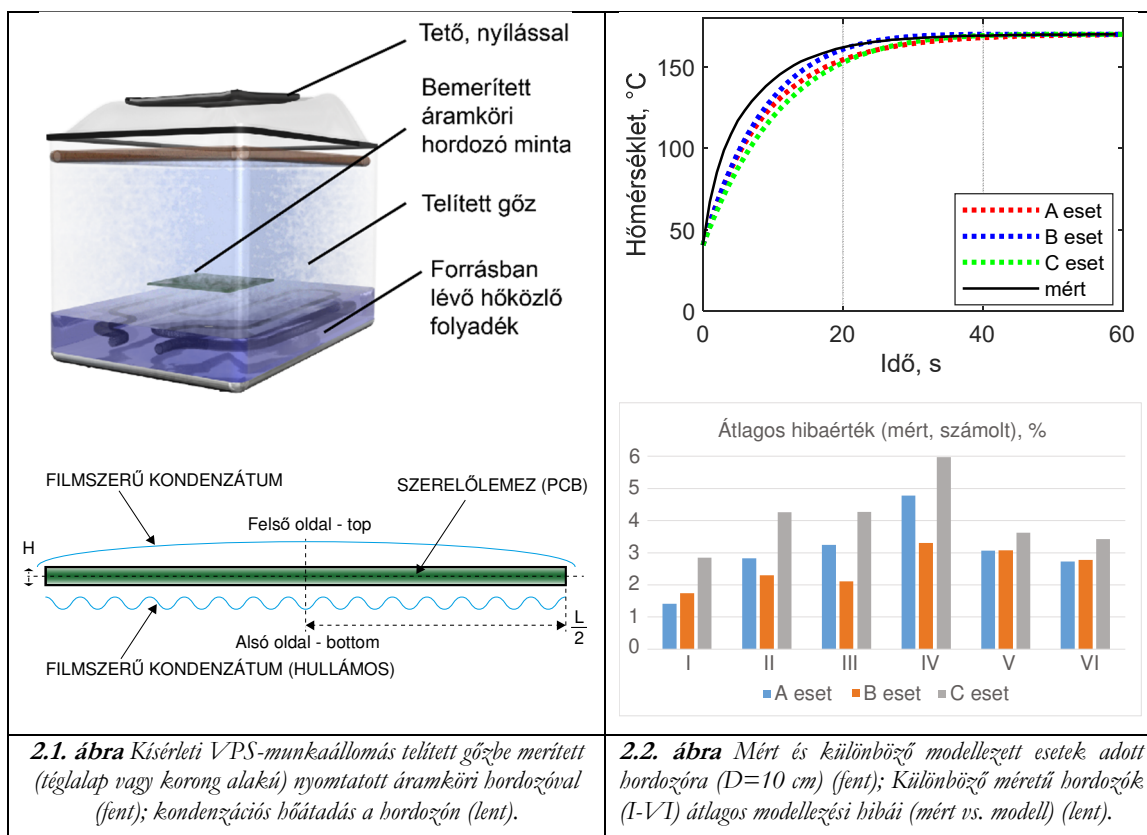
1. Tézis: Megadtam gőzfázisú forrasztás esetében a korong formájú áramköri hordozók hőátadásának explicit leírását. Megállapítottam, hogy a filmszerű kondenzáció hőátadási együtthatója ($\overline{h_{DiVPS}}$) telített gőzzel történő gőzfázisú forrasztás esetében a korong formájú hordozókon párhuzamos módszerrel közelíthető a korong alsó és felső oldalán a *Bejan és Gerstmann-Griffith* módszerének párhuzamos alkalmazásával.

$$\overline{h_{DiVPS}} = \overline{h_{DiBE}}' + \overline{h_{DiGG}}',$$

ahol, $\overline{h_{DiBE}}' = 1,368 \cdot \frac{k_l}{D} \cdot \left(\frac{h_{lv}' \cdot \rho_l' \cdot (\rho_l' - \rho_v) \cdot g \cdot D^3}{(T_{sat} - T_b) \cdot \mu_l' \cdot k_l} \right)^{\frac{1}{5}}$, és

ahol, $\overline{h_{DiGG}}' = 0,69 \cdot \frac{k_l}{D} \cdot \left(\frac{h_{lv}' \cdot \rho_l' \cdot (\rho_l' - \rho_v) \cdot g}{(T_{sat} - T_b) \cdot \mu_l' \cdot k_l} \right)^{\frac{1}{5}} \cdot \left(\frac{\gamma}{g \cdot (\rho_l' - \rho_v)} \right)^{\frac{3}{10}}$.

A hőátadás D átmérő karakterisztikus hossza mentén átlagolt, korong alakú szerelőlemezek alsó és felső oldalán, a klasszikus Newton-féle hűlési tétel alapján értelmezhető – így a modell együttesen veszi figyelembe a szerelőlemez alsó és felső oldalán lezajló filmszerű kondenzáció folyamatát, valamint alkalmazza Drew áramlási ellenállásra és Roshenow hőméretekre vonatkozó korrekcióit. Előbbi a kondenzált folyadékrétegben lévő áramlási ellenállás, az utóbbi a kondenzált rétegben megjelenő hőmérsékleti gradiens miatt korrigálja a modellt. Az ipari gyakorlatban előforduló esetekre jellemző laboratóriumi mérések eredményeivel összehasonlítva a modell átlagos hibája 2-3%, legrosszabb pillanatban (komplex dinamikai elhanyagolások miatt a bemelegítés szakaszában) 22% körüli.



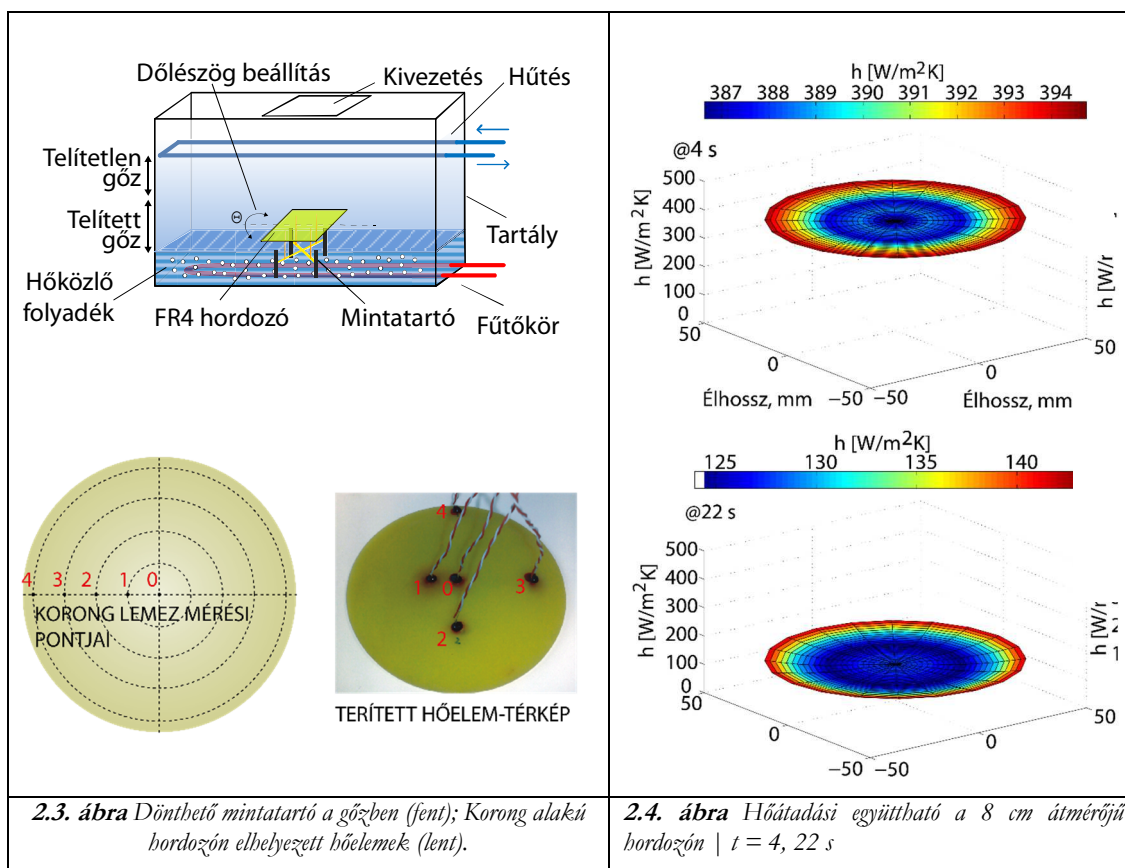
A téziszhez kapcsolódó publikációk: [L1.1], [L1.2], [R1], [K1]

2. Tézis: Rámutattam, hogy a gőzfázisú forrasztás során a négyzetes alakú szerelőlemezek hőátadásánál a sarok- és a peremhatás nem elhanyagolható. Korong alakú szerelőlemezek esetében csak a peremhatás jelentkezik.

Determinisztikus inverz hőátadási probléma megoldásával, az alsó és felső oldalakon történő párhuzamos hőátadást figyelembe véve megmutattam, hogy mérettől függően a négyzet alakú hordozók esetében a középponttól az élek és sarkok felé haladva akár $\sim 10\text{-}30\%$ relatív hőátadási együttható különbség adódhat. Megállapítottam, hogy a peremhatás jelen van kör alakú szerelőlemezekben is, ez a lemez középpontjától a perem felé haladva $\sim 2\text{-}21\%$ nagyságrendű relatív hőátadási együttható különbség formájában jelentkezik. Az eltérés kisebb ($\sim 10\%$), mint négyzetes alakú lemezek esetében, tehát a korong alakú lemezekben a fűtés egyenletesebbnek tekinthető.

Az eltérés a négyzetes lemezekben nagyságrendileg legfeljebb $\sim 65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, kör alakú lemezekben legfeljebb $\sim 30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ különbség formájában jelentkezhet.

A különbség a sarok- és peremhatás a filmszerű kondenzátum felső rétegén történő kialakulásából, a sarok és a peremek irányába történő lefolyásból, az így zajló réteg-elvékonyodásból, és az ebből következő intenzívebb lecsapódásból származik.



A tézishöz kapcsolódó publikációk: [L2], [R2.1], [R.2.2], [K1]

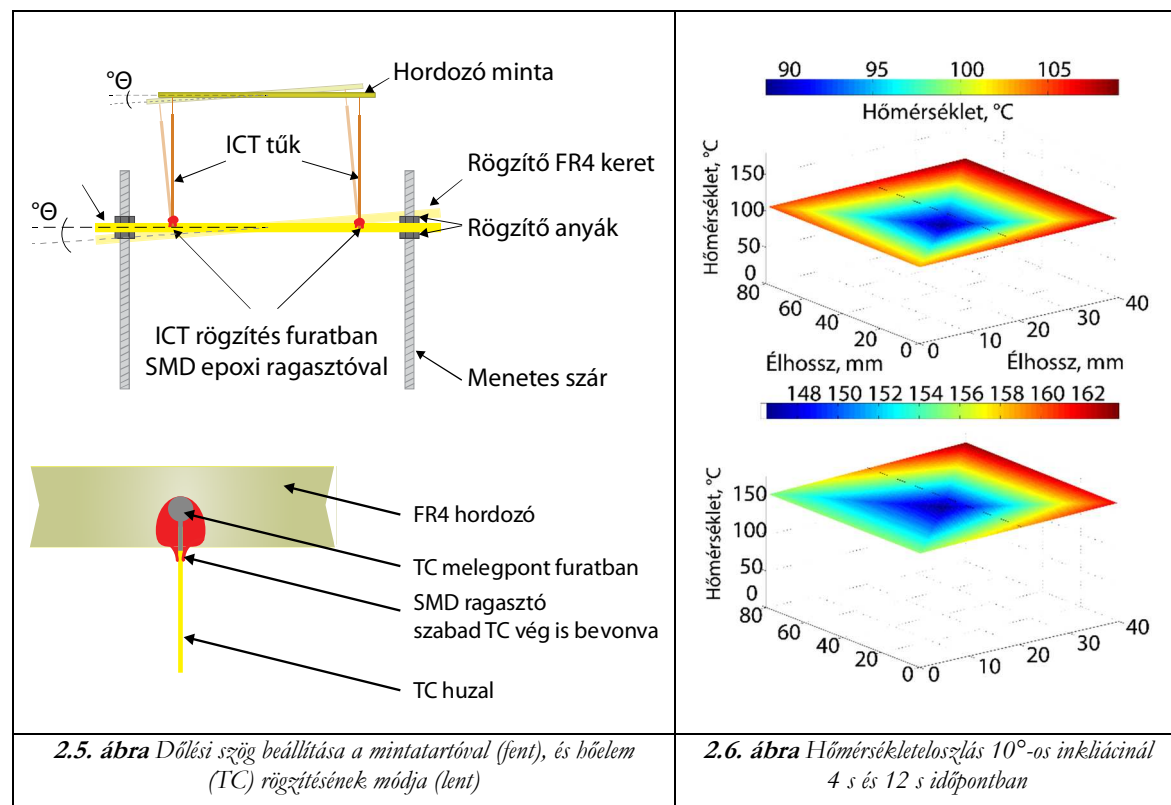
3. Tézis: Igazoltam, hogy a telített gőzzel történő gőzfázisú forrasztás közben már néhány fokok (pl. $1\text{-}10^\circ$ nagyságrendű) dőlésszög is jelentős hatással van a szerelőlemezen történő, alsó és felső oldali együttes hőátadásra és ezáltal a hőmérséklet hordozó síkján történő eloszlására, legfeljebb akár 20% relatív hőmérséklet különbség formájában.

A dőlésszög állításán alapuló, vezérelt mintamozgatás segítségével a hőtranszport-folyamat intenzitása igény szerinti lokálisan fokozható akár $20\text{-}40\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ (nagyságrendileg 10%) értékkel.

Determinisztikus inverz hőátadási probléma megoldásával megállapítottam, hogy a folyamat felfűtési szakaszának adott pillanatában nagyságrendileg $\sim 25^\circ\text{C}$ hőmérsékleti differencia is mérhető (10° -os dőlésszögnél) a szerelőlemez felületén. A különbségek magyarázata a *kondenzátum vastagságának változása – a lemez kiemelkedő részén mindkét oldalt elvékonyodik, a besüllyedt részén megvastagodik – ezzel gyorsítva (vékonyodás) vagy lassítva (vastagodás) a hőátadást*. A lemez felső oldalán a lefolyó él által okozott hatással, a lemez alsó oldalán a Rayleigh-Taylor instabilitással, összességében tehát ezen két hatás együttesével magyarázható a jelenség.

Finom, akár $1^\circ\text{-}10^\circ$ -os dőlésszög állításával már szándékosan is fokozható a hőátadás, ami egy pontosabb forrasztási hőprofil beállítást tehet lehetővé a telített gőzt alkalmazó gőzfázisú forrasztóállomásokban. Ez a jelenség akár a folyamat előnyére is használható.

A különbségek nagyságrendje akár 10°C lehet, pl. a forrasztó megömlésének időpillanatában, ami szintén kritikus érték lehet kétpólusú alkatrészek esetében.



A tézishöz kapcsolódó publikációk: [L3.1], [L3.2]

4. Tézis: Megmutattam, hogy az elektronikai gyártásban széles körben elterjedt, FR-4 típusú nyomtatott áramköri hordozók újraömllesztés forrasztás során zsugorodás jellegű maradó alakváltozása és az ebből következő hibajelenségek a kompozitban található epoxi utólagos térhálósodására vezethetők vissza.

Termoanalitikai módszerrel (DSC analízis) megállapítottam, hogy az ipari-tömeggyártási környezetben, újraömllesztés forrasztás során utólagos térhálósodás („post-curing”) következik be a szerelvények epoxi-alapú hordozó anyagában, ez üvegesedési hőmérséklet (T_g) növekedést (4,2-5,5%) és maradó (100-250 ppm) negatív alakváltozást, azaz zsugorodást okoz az első, a jelenség szempontjából jelentős, forrasztási ciklus során.

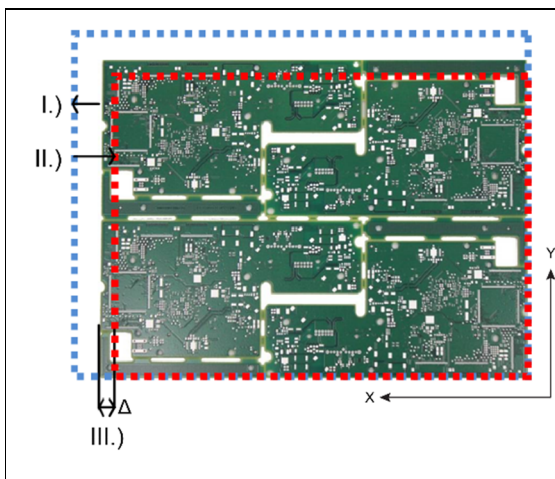
A kvantitatív XY méretváltozás kompenzálható a második forrasztási ciklusra X és Y irányban a stencilfólia gyártásához szükséges tervrajz (Gerber) D-kódjainak helyzetét megadó koordináták teljes felületre vonatkozó síkbeli transzformációjával (XY skálázás). Ezzel a hibaszám jelentősen csökkenthető, ezáltal a gyártási kihozatal jelentősen javítható (nagy mintaszámon: akár 75%-os, konkrét hibajelenségre visszavezethető hibaredukció, és akár 65%-os összesített hibaredukció).

Precíziós XY koordinátamérővel azt is igazoltam, hogy az alakváltozás *izotróp jellegű*, tehát elhanyagolható az üvegszálszövés vagy a rézrétegek és kivágások hatása az alakváltozásra.

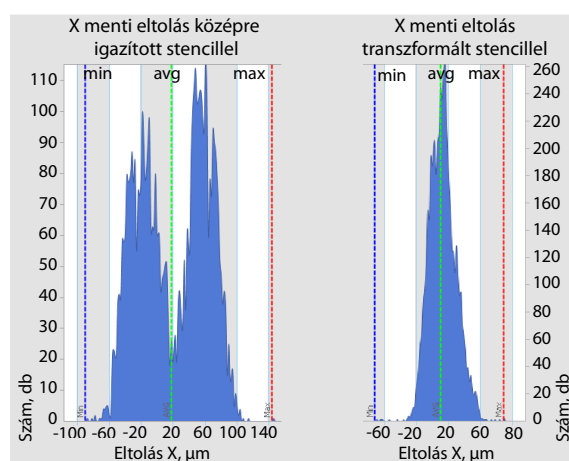
Ezt a folyamatot áramköri hordozókon elsőként mutattam be, egy statisztikai szempontból nagy mintaszámokat bevonó ipari problémán keresztül.

A differenciális pásztázó kalorimetriai (DSC) módszer alkalmazásával azt is megállapítottam, hogy a *maradó alakváltozás vizsgálatában a későbbi ciklusok, esetleges javító forrasztási lépések hatása elhanyagolható*.

Az eredményem beépült a gyakorlatba: a kompenzációs lépést egy évtizede használja a kutatásban részt vevő ipari partner minden kétoldalas szereléssel gyártott áramkörnél.



2.7. ábra A bordoző tágulása (I.), a bordoző összehúzódása maradó alakváltozással (II.), a megfigyelt hiszterézis X mentén jelölve (III.)



2.8. ábra Pasztanyomat-eltolás statisztika középre igazított stencillel (bimodális) és transzformált stencillel (unimodális)

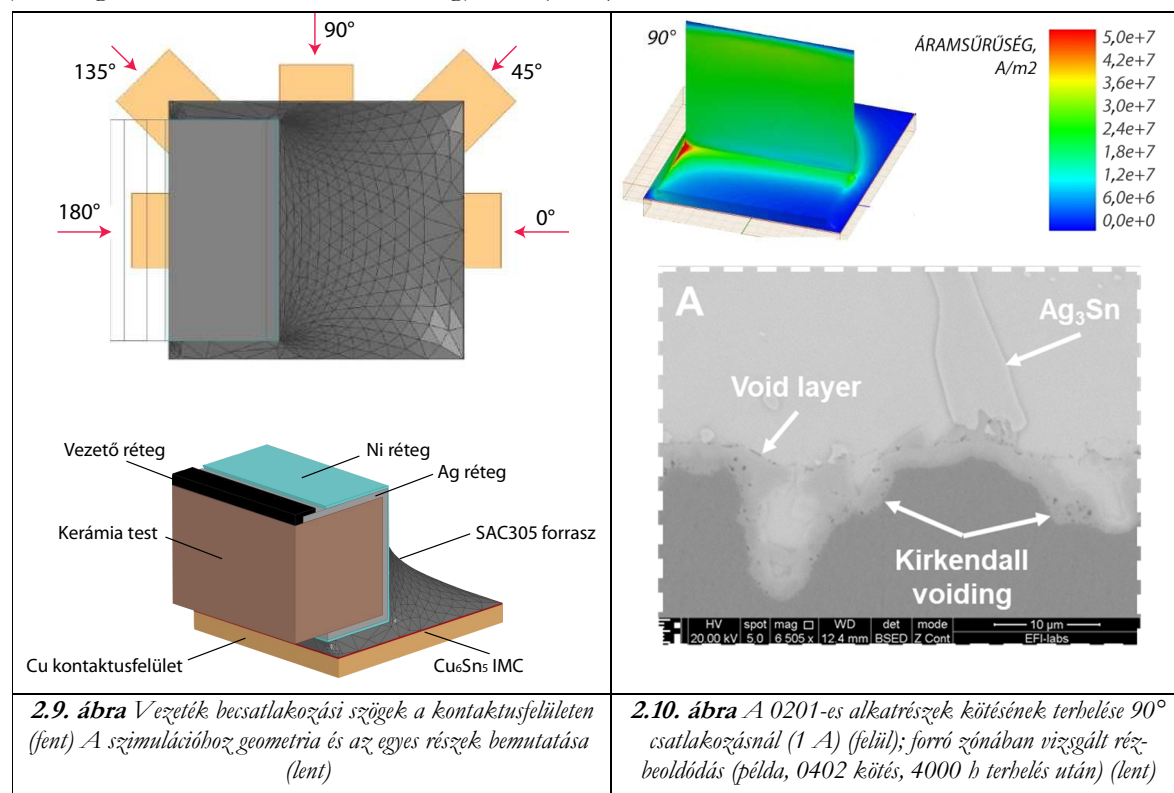
A tézishöz kapcsolódó publikációk: [L4.1] [R4.1] [R4.2]

5. Tézis: Megállapítottam, hogy elektromigrációs jelenségek szempontjából kritikus áramsűrűség értékek alakulhatnak ki felületszerelt, passzív, chipméretű alkatrészek ólommentes forraszkötéseiben, a vezeték-kontaktusfelület becsatlakozási szögétől függően.

Végelelem modellezés segítségével megállapítottam, hogy elsősorban a 90° és 135° -os áramköri vezeték-kontaktusfelület (track-to-pad) becsatlakozási szögeknél 0603, 0402 és 0201 méretkódú alkatrészek esetében az áramsűrűség elérheti akár az $1\text{-}5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ értékeket, ami a jellemző irodalmi adatok és az ellenőrző kísérletek alapján elektromigrációs jelenségek kialakulásához vezethet.

A 90° és a 135° az alkatrész hossz tengelyéhez képest a kontaktusfelület oldalsó és belső sarokszögénél található becsatlakozást jelenti. Az áramköri hordozók tervezési jellemzőinek a szabványok szerinti alkatrész, kontaktus és vezetékvezetés méreteket vettem figyelembe, a kötés formáját felületi feszültség (energiaminimalizálás) módszerével számoltam ki. A modellekhez figyelembe vettem a jellemző pad-becsatlakozási szögeket. A kontaktusfelületeket az IPC-7351, a vezeték szélességét az IPC 2221 szabvány által javasolt módon határoztam meg, és eszerint maximalizáltam a kötésen áthajtott áram mértékét.

A terhelt eszköz keresztcsiszolattal történő ellenőrzése közben kvalitatív módon megállapítottam, hogy a kritikus zónákban, a tömbi forrasztanyagban zárványhibák, kritikus ellenállásváltozást okozó anyagtranszport jelenségek és diffúziós folyamatok szempontjából jelentős intermetallikus-réteg vastagodási jelenségek *kialakulhatnak akár a 0603 méretkódú alkatrészek esetében*. A méretek csökkenésével skálázódik a terhelési áram maximuma is, de a jelenség kisebb alkatrészeknél is megjelent (0402), kisebb áramoknál.



A tézishez kapcsolódó publikációk: [L5.1, L5.2, L5.3, L5.4] [R5.1-5.5]

6. Tézis: Igazoltam a lebontható, erősített és égésgátolt PLA/lenvászón kompozit merev, többoldalas, fenntartható áramköri hordozóként történő alkalmazhatóságát.

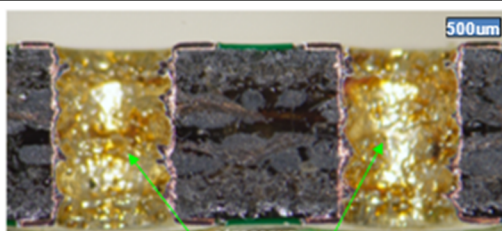
Termomechanikai karakterizálással demonstráltam a PLA/len kompozit minimum kétrétegű áramköri hordozó gyártásban való alkalmazhatósági perspektíváját (Z-irányú hőtágulási együtthatói (α_z : 80-100 ppm/°C, α_x : 200-210 ppm/°C)) fémezett falú furatok implementációjának lehetőségével.

Megmutattam a PLA/len hordozók újraömllesztéses forrasztásban való alkalmazhatóságát és elfogadható hőmérséklet-ablakát az SnBi ötvözet olvadáspontjához (138 °C) és az alkalmazott PLA olvadáspontjához igazítva (150-155 °C csúcshőmérséklet, másfél perces maximumon). A teljes hőmérsékleti terjedelemben képest ez nagyságrendileg hasonló (~10%) ablak, mint amit a klasszikus ólommentes forrasztásnál is alkalmaznak.

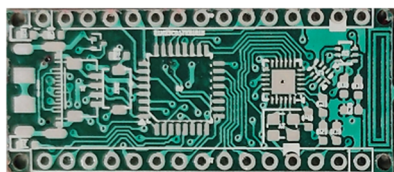
A fenti pontokra alapozva először mutattam meg, hogy PLA/lenvászón kompoziton, kétfoldalas szubtraktív technológiával és felületszereléssel megvalósítható egy összetett, kompakt, integrált, beágyazott elektronikát tartalmazó, felületszerelt áramkör a jelenleg alkalmazott szubtraktív és felületszerelési technológiákkal kompatibilis módon.

Kiemelt paraméterek: (10 mil (~250 μ m) vezetéksszélesség, 8 mil (~200 μ m) szigetelési távolság, 500 μ m -es minimális furatátmérő, 400 μ m széltől való vezetői távolság, 500 μ m alkatrész-lábtávolság).

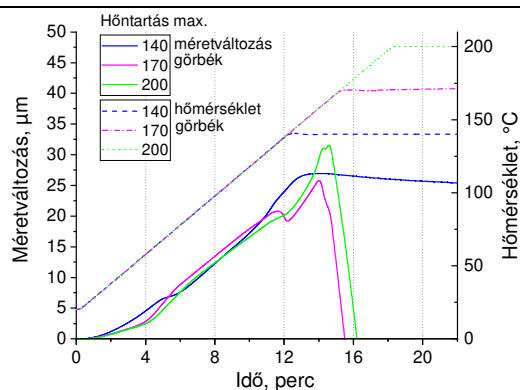
Az 50%-os kihozatal és sikeres működési tesztek demonstrálták a korai technológiai érettséget, technológiai mérföldkőként meghaladva a PLA-alapú publikált demonstrátorok eddigi szintjét. A jelenlegi technológiákkal való kompatibilitás a jövőbeli magasabb TRL szintek felé vezető átmenet kulcsa.



Fémezett falú furatok



2.11. ábra PLA-lenvászón hordozó kompozit keresztcsiszolata (fent), kísérleti egyedi tervezésű Arduino demonstrátor áramkör a hordozón elkészítve (lent)



2.12. ábra TMA görbék különböző hőntartásokon (fent), szerelt, működő demonstrátor a hordozón (lent)

A tézishöz kapcsolódó publikációk: [L6.1, L6.2, L6.3, L6.4, L6.5], [R6.1-6.18];

7. Tézis: Először adtam komplex, multidiszciplináris összehasonlító minősítést lebontható, biológiai-eredetű, szálerősített, merev PLA-kompozit alapú áramköri hordozóra.

Megállapítottam, hogy a PLA/len hordozók és a merev lebontható áramköri hordozók az elfogadott hordozó alapanyag kategóriákon túl (FR1-2, FR4, CEM1), a jellemző paramétereknek megfelelően új hordozókat igényelnek.

A szabvány szerinti besorolási rendet a következő táblázatok foglalják össze:

Vizsgálat, szabvány	Vizsgált paraméter	FR4 értékek	FR1-FR2	CEM1-3	PLA/Len
Üvegesedési hőmérséklet IPC TM-650 2.4.24	T _g , °C minimum	110–170 [195]	105–130 [210]	110 [195]	~60
Term. bomlási hőmérséklet IPC TM-650 2.4.24.6	T _d , °C minimum	310–340 [195]	NE	310 [195]	310
Z-tengely hőtágulási együttható (CTE) IPC TM-650 2.4.24.1	α ₁ , ppm/°C max	60 [195]	jellemzően nagy	NE	~80–100
	α ₂ , ppm/°C max	300 [195]	jellemzően nagy	250–275 [213]	~210–220
	20-140, °C % max	-	-	-	~2
	50-260, °C % max	3–4,5% [195]	NE	NE	-
Delaminációig eltelt idő IPC TM-650 2.4.24.1	T140, perc	-	-	-	10
	T260, perc	10–30 [195]	10	30	-
	T288, perc	5–10 [195]	5–10	5	-
Vízfelvétel IPC TM-650 2.6.2.1	Tömegnövv., wt%	0,8 [195]	5,6-, 1,3 [195]	0,5 [195]	2
Rézlefejtés IPC TM-650 2.4.8.1	Lefejtési szilárdság, N	0,7–1,4 [195]	1,05 [195]	0,8–1,05 [195]	3
SIR teszt IPC 2.6.3.4	Szigetelési ellenállás, MΩ	1,2 10e+5	10e+7 [214]	10e+4 [215]	2–3,9 10e+4

		PLA/ Len ref.		
-	<	T _g	<	FR1-2, CEM, FR4
-	<	T _d	<	-
FR4	<	Z CTE α ₁ *	<	FR1-2
-	<	Z CTE α ₂ *	<	FR1-2, FR4, CEM1-3
FR2, FR4, CEM	<	Vízfelvétel *	<	FR1
FR1-2, FR4, CEM	<	Rézlefejtés	<	-
CEM1-3	<	SIR	<	FR1-2, FR4,

DSC és TMA mérésekkel igazoltam, hogy a termoplasztikus PLA alkalmazása limitálja a felhasználást. A táblázatok alapján (az üvegesedési hőmérséklet (T_g=60 °C), és a 260-288 °C-ra méretezett delaminációs vizsgálatok kivételével) közelíthető és meghaladható az FR1-FR2 hordozó teljesítménye (vízfelvétel, ~2%; delaminációig eltelt idő, 10 perc), közelíthető CEM1 hordozók teljesítménye (termikus bomlási hőmérséklet: 310 °C, SIR ellenállás 2 - 3,9 10e+4 MΩ) és az FR4 hordozó teljesítménye (Z irányú CTE, A1). A többi paraméterben az FR4 teljesítményét is meghaladhatja a hordozó.

A tézishez kapcsolódó publikációk: [L6.1, L6.2, L6.3, L6.4, L6.5], [R6.1-6.18];

3. A Tézispontok gyakorlati hasznosulása, utóélet

A gőzfázisú forrasztással kapcsolatos munkám alapkutatásnak tekinthető egy a világon egyedülálló tanszéki kutatási platformmal a VPS téma köré fűzve.

- A dolgozatomban bemutatott eredmények alapot adtak az OTKA-FK 132186 „Gőzfázisú újraömllesztési forrasztási technológiák vizsgálata és fejlesztése numerikus eszközökkel” pályázatnak, amelyet sikeresen zártam a bemutatott eredményekkel.
- A tézispontok tartalma részben hasznosult a személyes Bolyai János Kutatási Ösztöndíj eredményeiben, és az Új Nemzeti Kiválóság Program (ÚNKP-18-4)-ban vállalt feladatokban.
- A VPS-sel kapcsolatos kutatásokba szállt be Budapestre érkezett vendégkutatóként David Busek (FEL-CVUT, Prága, Csehország), ami megalapozta az ottani kutatóműhellyel való, mai napig tartó gyümölcsöző együttműködésem.
- A gőzfázisú forrasztással kapcsolatos alapkutatás egy ipari projektben is megjelent (alacsony TRL-szinten), ahol az Exmore vállalattal vizsgáltuk a szerelvényeken való hőátadás alkalmazott szenzorikai megoldásokra való visszavezetésének lehetőségét és a munkatér gőzkonzentrációjának nyomás alapú vizsgálatát.
- Az eredmények alapján felvettem a kapcsolatot a Rehm Thermal Systems és az Elas Kft. munkatársaival; az első közös ipari eredményeken a dolgozat megírásakor az általam konzultált PhD hallgató (Havellant Gergő) dolgozik.
- A kutatás egyes részletei megjelentek az Elseviernél megjelent könyvünk [K1] negyedik fejezetében.

A hordozó zsugorodásának témaköre a kutatási eredményeken felül, amelyeket a Bosch ösztöndíjas kutatójaként értem el, a valóságos gyártási környezetben is hasznosult: ennek a kutatásomnak van az egyik legnagyobb számszerűsíthető lenyomata.

- A stenciltranszformáció módszerét a Robert Bosch Hatvan Hungary Kft. (RBHH) először 2014 vezette be, majd fokozatosan, a módszert minden kétoldalas szerelésű termék második oldalára bevezették.

Becsülő adatok alapján az elmúlt évek tapasztalatai alapján, egy évben, csak a magyarországi üzemben körülbelül 50 millió második oldali forrasztás történik „zsugorított” stencillel; ez a gyakorlatban több száz millió legyártott terméken végzett korrekciónak, tehát ipari hasznosulásnak felel meg, csak hazai viszonylatban.

- A munkám a gyártásközi keletkező hulladék mennyiségét is jelentősen csökkenti elősegítve a fenntarthatóságot; termékenként $n \cdot 10$ millió legyártott panel esetében akár több tonna nagyságrendben.
- A munka során nem csak az Robert Bosch munkatársaival, de a Polimertechnika Tanszék munkatársával, Fejős Mártával is együttműködhettem.

Az **5. tézis** egy irodalmi hiányosságot fed le – az eddigi publikációk ugyanis vagy ólmos forrasztra vagy főleg flip-chipekre, tokon belüli kötésekre és BGA alkatrészekre vizsgálták az áramsűrűség kialakulását és az így bekövetkező hatásokat. Ennek újszerű kiterjesztése a gyakorlatban is hatalmas volumenben szerelt felületszerelt alkatrészek vizsgálata.

- Egyedi megközelítésben az eredményeim az áramköri hordozó rajzolat kialakítás-tervezési irányelveiből fejlődtek ki és tervezői irányelveket is felvezetnek (nagyáramú jelutak esetében érdemes elkerülni a 90° - 135° becsatlakozásokat), és a jövőben akár többféle forrasztótvözet EM-vizsgálatához is alapot nyújthatnak.

- A Bécsi Műszaki Egyetem doktorandusza, Irina Wodak, a tanszékünkön töltött fél éves vendégkutatói jelenléte során a téma továbbvitelét célozta meg, és helyi társművezetőként felügyeltem munkáját.

A fenntartható elektronikai alap kutatásokban az első tíz év munkája vezetett a Meshlin Kft.-vel való sikeres együttműködésre, amely a SINANO Institute hálózati rendszerén keresztül egy Horizon Pathfinder EIC projektben csúcsosodott (Desire4EU). A projektben a vezetője vagyok a WP2-es munkacsomagnak, amely a kompozitfejlesztést és a szereléstechológia kialakítását jelenti a hordozón.

- A fenti pályázat megírása előtt az Arduino érdeklődését is felkeltettem. A projekt demonstrátorai Arduino áramkörökön alapulnak. A kompozitot a dolgozat beadása utáni évben ~2000 db kísérleti áramkörön fogjuk oktatási körülmények között „béta-tesztelni”. A környezetbarát elektronika üzenetét így a tanulóknak és tervezőknek-alkotóknak („maker”) szánt elektronikákon keresztül fogjuk célba juttatni.
- A kutatásnak köszönhetően organikusán alapult meg a Fenntartható Elektronika Kutatócsoport a BME-n belül. Mára kari képviselője vagyok a BME Fenntarthatósági Munkacsoportnak is.
- A munkát öt innovációs ponttal ismerte el az European Commission (Európai Bizottság az Európai Unió végrehajtó szerve) az Innovációs Radar (Innovation Radar) felületén, ahol mindben „key innovator”-ként, azaz kulcs innovátorként, újítként szerepel a kutatócsoport. Az öt pont jelentős szám a BME összesen jegyzett kilenc pontjához képest.

4. Tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

Lektorált, idegen nyelvű, külföldön megjelent folyóiratcikk

- [L1.1] **A. Géczy**, B. Illés, T. Darnai (2015) *Investigating condensation heat transfer during vapour phase soldering on round-shaped PCB plates*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 86, pp. 639-647, [10.1016/j.jheatmasstransfer.2015.02.068](https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2015.02.068)
- [L1.2] **A. Géczy** ; B. Illés ; Zs. Péter ; Zs. Illyefalvi-Vitéz (2015) *Simplified Heat Transfer Modeling for Vapour Phase Soldering Based on Filmwise Condensation for Different Horizontal Printed Circuit Boards*, Heat and Mass Transfer, Vol. (51) 3. pp. 335-342. [10.1007/s00231-014-1386-1](https://doi.org/10.1007/s00231-014-1386-1)
- [L2] **A. Géczy** (2017) *Investigating heat transfer coefficient differences on printed circuit boards during vapour phase reflow soldering*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 109, pp. 167-174. [10.1016/j.jheatmasstransfer.2017.01.091](https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2017.01.091)
- [L3.1] **A. Géczy**, D. Nagy, B. Illés, L. Fazekas, O. Krammer, D. Busek (2017) *Studying heat transfer on inclined printed circuit boards during vapour phase soldering*, Soldering & Surface Mount Technology, Vol. 29 No. 1, pp. 34-41. [10.1108/SSMT-11-2016-0029](https://doi.org/10.1108/SSMT-11-2016-0029)
- [L3.2] D. Straubinger, I. Bozsóki, B. Illés, O. Krammer, D. Bušek, **A. Géczy** (2020) *Heat transfer aspects of condensation during vapour phase soldering on aligned PCB-based surfaces*, Soldering & Surface Mount Technology, Vol. 32(4), pp. 247–252. [10.1108/SSMT-11-2019-0038](https://doi.org/10.1108/SSMT-11-2019-0038)
- [L4] **A. Géczy**, M. Fejős, L. Tersztyánszky (2015) *Investigating and compensating printed circuit board shrinkage induced failures during reflow soldering*, Soldering & Surface Mount Technology, Vol. 27 No. 2, pp. 61-68. [10.1108/SSMT-07-2014-0014](https://doi.org/10.1108/SSMT-07-2014-0014)
- [L5.1] **A. Géczy**, D. Straubinger, A. Kovács, O. Krammer, P. Mach, G. Harsányi (2018) *Effects of high current density on lead-free solder joints of chip-size passive SMD components*, Soldering & Surface Mount Technology, Vol. 30 No. 2, pp. 74-80. [10.1108/SSMT-10-2017-0032](https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2017-0032)
- [L5.2] D. Straubinger, **A. Géczy**, A. Sipos, A. Kiss, D. Gyarmati, O. Krammer, D. Rigler, D. Bušek, G. Harsányi, (2019) *Advances on high current load effects on lead-free solder joints of SMD chip-size components and BGAs*, Circuit World, Vol. 45 No. 1, pp. 37-44. [10.1108/CW-11-2018-0088](https://doi.org/10.1108/CW-11-2018-0088)

- [L5.3] D. Straubinger, T. Hurtony, **A. Géczy** (2022) *Impact of electromigration and isothermal ageing on lead-free solder joints of chip-sized SMD components*, Journal of Materials Research and Technology, Vol. 21. Pages 308-318. [10.1016/j.jmrt.2022.09.048](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.048)
- [L5.4] I. Wodak, **A. Géczy**, O. Krammer, B. Illés, P. P. Michalowski, Z. Tafferner, G. Khatibi, A. Yakymovych (2025) *Influence of Fe-nanoparticle doped flux on electromigration effects in SAC305 solder joints*, Journal of Materials Research and Technology, Vol. 38, pp. 5866–5877. [10.1016/j.jmrt.2025.09.054](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.09.054).
- [L5.5] Z. Tafferner, D. Bušek, **A. Géczy** (2026) *Electromigration behaviour of solder joints under high current load: A Review*, Materials Today Electronics, Vol. 16. 100211. [10.1016/j.mtelec.2026.100211](https://doi.org/10.1016/j.mtelec.2026.100211)
- [L6.1] **A. Géczy**, D. Piffkó, R. Berényi, K. Dusek, P. Xavier, D. Cuartielles (2024) *Implementation of microcontroller board on a sustainable and degradable PLA/Flax composite substrate: a case study*, IOP Nanotechnology, Vol. 35(43) Paper: 435201 , 12 p. (2024) [10.1088/1361-6528/ad66d3](https://doi.org/10.1088/1361-6528/ad66d3)
- [L6.2] Cs. Farkas, L. Gál, A. Csiszár, V. Grennerat, PO. Jeannin, P. Xavier, D. Rigler, O. Krammer, Z. Plachy, K. Dusek, R. Kovács, A. Fehér, **A. Géczy** (2024) *Sustainable printed circuit board substrates based on flame-retarded PLA/flax composites to reduce environmental load of electronics: Quality, reliability, degradation and application tests*, Sustainable Materials and Tehnologies, Vol. 40. Paper: e00902, [10.1016/j.susmat.2024.e00902](https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00902)
- [L6.3] B. Kovács, **A. Géczy**, G. Horváth, I. Hajdu, L. Gál (2016) *Advances in Producing Functional Circuits on Biodegradable PCBs* Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science, 60(4), pp. 223–231. [10.3311/PPee.9690](https://doi.org/10.3311/PPee.9690)
- [L6.4] **A. Géczy**, Cs. Farkas, R. Kovács, D. Fros, P. Vesely, A. Bonyár (2022) *Biodegradable and nanocomposite materials as printed circuit substrates: a mini-review*, IEEE Open Journal of Nanotechnology, Vol. 3. pp. 182–190. , 9 p. [10.1109/OJNANO.2022.3221273](https://doi.org/10.1109/OJNANO.2022.3221273)
- [L6.5] K. Dusek, D. Koc, P. Vesely, D. Fros, **A. Géczy**, *Biodegradable Substrates for Rigid and Flexible Circuit Boards: A Review*, Advanced Sustainable Systems, Vol. 9(1) Paper: 2400518 , 23 p. (2025) [10.1002/adsu.202400518](https://doi.org/10.1002/adsu.202400518)

Idegen nyelvű, külföldön megjelent szakkönyv

- [K1] B. Illés, O. Krammer, **A. Géczy**, Reflow Soldering, Apparatus and Heat Transfer Processes, Elsevier, Amsterdam, Hollandia, 285 p. 2020 ISBN: 978-0-12-818505-6, [10.1016/C2018-0-02965-5](https://doi.org/10.1016/C2018-0-02965-5)

Referált, idegen nyelvű, nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent előadás

- [R1] **A. Géczy**, I. Bozsóki, B. Illés, Modelling approaches of Vapour Phase Reflow Soldering (2018) IEEE 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC), Dresden, DE
- [R2.1] L. Fazekas, D. Nagy, **A. Géczy** and D. Busek, Investigations on heat transfer with different PCB substrates during Vapour Phase Soldering, (2016) IEEE 22nd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Oradea, Romania, pp. 48-54,
- [R2.2] D. Bušek, L. Fazekas, **A. Géczy** and M. Plaček, Substrate influence on temperature distribution along the PCB during vapor phase soldering, (2016) IEEE 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Pilsen, Czech Republic, pp. 267-272,
- [R4.1] **A. Géczy**, L. Tersztyánszky, B. Illés, A. Kemler, A. Szabó, Reducing Lead-free Soldering Failures Caused by Printed Circuit Board Shrinkage, (2013) IEEE 19th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), pp. 65-68.
- [R4.2] **A. Géczy**, M. Fejős, L. Tersztyánszky, A. Kemler and A. Szabó, Investigating Printed Circuit Board shrinkage during reflow soldering, (2014) IEEE 37th International Spring Seminar on Electronics Technology, pp. 215-220,
- [R5.1] **A. Géczy**, D. Straubinger, T. Hurtony, O. Krammer, A. Kovács, Investigating current density in the lead free solder joints of surface mounted resistors with experimental approach (2017) IEEE 40th International Spring Seminar on Electronics Technology,
- [R5.2] **A. Géczy**, O. Krammer, A. Kovács, A. Sipos, Analysing current density in the solder joints of chip-size Surface Mounted resistors, (2015), IEEE 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE) pp. 376-380.
- [R5.3] D. Straubinger, **A. Géczy**, Effect of highly increased current density in the microstructure of lead-free solder joints (2021) 23rd European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition (EMPC), Gothenburg, Sweden, 2021,

- [R5.4] D. Straubinger, D. Rigler, **A. Géczy** and B. Synkiewicz-Musialska, Electromigration in lead-free solder joints on ceramic PCB substrates (2020) IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), pp. 52-56
- [R5.5] I. Wodak, **A. Géczy**, O. Krammer, G. Khatibi, A. Yakymovych, F. Khodabakhshi, Z. Tafferner (2024) Impact of Fe-NPs doped flux on electromigration in Sn-based solder joints of chip-sized SMD components at lower Joule heating, (2024), IEEE 30th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), pp. 370-373,
- [R6.1] **A. Géczy**, V. Léner, I. Hajdu, Zs. Illyefalvi-Vitéz, Low temperature soldering on biopolymer (PLA) printed wiring board substrate (2011) IEEE 34th International Spring Seminar on Electronics Technology, pp. 57-62.
- [R6.2] **A. Géczy**, T. Garami, B. Kovács, D. Nagy, L. Gál, M. Ruzinkó, I. Hajdu, Soldering Tests with Biodegradable Printed Circuit Boards (2013) IEEE 19th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), pp. 39-42.
- [R6.3] **A. Géczy**, L. Gál, I. Hajdu, B. Kovács, D. Nagy, M. Ruzinkó, Optimizing Solder Joints on Biodegradable PCBs with Vapour Phase Soldering (2014) IEEE 37th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), pp. 33–38.
- [R6.4] **A. Géczy**, I. Hajdu, L. Gál, C. N. Barna, M. Kovács, G. Harsányi, Challenges of SMT assembling on biodegradable PCB substrates (2019) European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC), pp. 1–5.
- [R6.5] **A. Géczy**, M. Kovács, I. Hajdu, Conductive Layer Deposition and Peel Tests on Biodegradable Printed Circuit Boards (2012) 18th IEEE International Symposium for Design and Technology of Electronic Packaging, SIITME, 3pp. 139-142.
- [R6.6] L. Gál, **A. Géczy**, G. Horváth, D. Rigler, I. Hajdu, Aspects of additive copper deposition on biodegradable and environmentally friendly PCB substrates (PLA, CA, GPTE-DETDA) (2018) IEEE 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Paper 8443956.
- [R6.7] **A. Géczy**, D. Nagy, I. Hajdu, Á. Kmetty, B. Szolnoki, Investigating Mechanical Performance of PLA and CA Biodegradable Printed Circuit Boards (2015) IEEE 21st International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), pp. 45–49.
- [R6.8] **A. Géczy**, G. Horváth, L. Dudás, L. Gál, I. Hajdu, G. Harsányi, RFID cards on biodegradable substrates: Realization aspects and future trends (2014) 1st International Conference and Exhibition on Future RFID Technologies, pp. 35–42.
- [R6.9] **A. Géczy**, L. Gál, L. Dudás, G. Horváth, B. Kovács, D. Nagy, I. Hajdu, Experimental 13.56 MHz RFID cards on biodegradable substrates (2015) 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), pp. 52–56.
- [R6.10] **A. Géczy**, L. Gál, B. Kovács, I. Hajdu, Toward producing commercial electronics on biodegradable PCB substrates (2016) IEEE 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), pp. 37–42.
- [R6.11] **A. Géczy**, A. Csiszár, E. Rozs, I. Hajdu, B. Medgyes, O. Krammer, D. Straubinger, L. Gál, Novel PLA/Flax Based Biodegradable Printed Circuit Boards (2022) IEEE 45th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE),
- [R6.12] **A. Géczy**, A. Csiszár, P. Xavier, N. Corrao, D. Rauly, R. Kovács, A. E. Fehér, E. Rozs, L. Gál, Thermal and RF Characterization of Novel PLA/Flax Based Biodegradable Printed Circuit Boards (2022) IEEE Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), pp. 329–333.
- [R6.13] V. Grennerat, P. Xavier, P-O. Jeannin, N. Corrao, **A. Géczy**, High-Speed Digital Electronics Board on a Novel Biobased and Biodegradable Substrate (2023) IEEE 46th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)
- [R6.14] O. Krammer, G. Hambuch, R. Bátorfi, B. Illés, **A. Géczy**, Investigating the Copper Peel and Solder Joint Shear Strength on Biodegradable Substrates (2024) IEEE 30th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), pp. 262–265.
- [R6.15] D. J. Cuartielles Ruiz, **A. Géczy**, V. Grennerat, P. Xavier, Tiny, Distributed, and Eco-Optimized: Design Guidelines for Environmentally Friendly ML Devices (2024) IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC), pp. 443–448.

- [R6.16] V. Grennerat, G. Z. Nashef, A. Sabra, P. Xavier, T. Lacrevez, N. Corrao, H. Liang, **A. Géczy**, N. Chevalier, Exploring PLA/Flax Substrates for Antenna Applications (2024) European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Paper 10501367.
- [R6.17] G. Havellant, **A. Géczy**, Enhancing the Manufacturability of Biodegradable PLA/Flax PCB Assemblies Through Design Optimization (2025) IEEE International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Paper 11121033.
- [R6.18] V. Grennerat, P. Xavier, P-O. Jeannin, **A. Géczy**, Power Electronics Solar Inverter on a Biosourced and Biodegradable Substrate – Thermal Study (2025) IEEE International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Paper 11120895.

8. Rövidítések és jelölések jegyzéke

BGA	Ball Grid Array	golyós mátrix kivezetés elrendezés
BME	Budapest University of Technology and Economics	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
CEM	Composite Epoxy Material	epoxi-kompozit
CFC	Chlorofluorocarbon	klór-fluor szénhidrogén
CTE	Coefficient of Thermal Expansion	hőtágulási együttható
DSC	Differential Scanning Calorimetry	differenciális pásztázó kalorimetria
ENSZ	UN/United Nations	Egyesült Nemzetek Szövetsége
ETT	Department of Electronics Technology	Elektronikai Technológia Tanszék
FR4	Flame-Resistant/Retarded Class 4	éégsgátolt hordozó, 4. osztály
IMC	Intermetallic compound	intermetallikus vegyület
IML	Intermetallic layer	intermetallikus réteg
IPC	Association Connecting Electronics Industries	-
K-TC	K-type Thermocouple	K-típusú hőelem
LED	Light Emitting Diode	világító dióda
LTS	Low temperature solder	alacsony olvadáspontú forrasz
PCB	Printed Circuit Board	nyomtatott áramkört hordozó, nyomtatott huzalozású lemez
PFPE	Perfluoropolyether	perfluor-poliéter
PLA	Polylactic Acid	politejsav
RoHS	Reduction of Hazardous Substances	Káros anyagok csökkentése az elektronikában
SDG	Sustainable Development Goals	Fenntartható Fejlődési Célok
SEM	Scanning Electron Microscopy	pásztázó elektronmikroszkópia
SIR	Surface Insulation Resistance	-
SMD	Surface Mounted Device	felületszerelhető áramkör
SMT	Surface Mount Technology	felületszerelési technológia
TAL	Time Above Liquidus	olvadáspont felett eltöltött idő
TMA	Thermomechanical Analysis	termomechanikai elemzés
TRL	Technological Readiness Level	technológiai készültségi szint
VPS	Vapour Phase Soldering	gőzfázisú forrasztás

<i>Paraméterek latin szimbólumokkal</i>			<i>Indexek</i>	
CTE	dimenziótlán	hőtágulási együttható	b	body, test
D	m	korong alakú lemez átmérője	BE	Bejan modellje
g	m/s ²	nehézségi gyorsulás	d	dekompozíció, bomlási
h	W/m ² K	hőátadási együttható	Di	disc, korong
h _{lv}	J/kg	látens hő	EM	elektromigráció
SIR	Ω	felületi szigetelési ellenállás	g	üvegesedési
$\bar{S}_{XY}$	dimenziótlán	skálázási mátrix	GG	Gerstmann-Griffith modellje
t	s	idő	i	lépések indexe
T	°C	abszolút hőmérséklet	l	liquid, folyadék
T _b	°C, K	test hőmérséklete	sat	szaturáció, telítődés
T _d	°C	dekompozíció, bomlási hőmérséklet	v	vapour, gőz
			'	korrigált tényező

gattila_kt_460_26

T_g	°C	üvegesedési hőmérséklet
T_v	°C, K	gőz hőmérséklete
<i>Paraméterek görög szimbólumokkal</i>		
γ	J/m ²	felületi feszültség
μ_l	kg/ms	folyadék dinamikus viszkozitása
ρ	kg/m ³	sűrűség

Köszönetnyilvánítás

- A tanszék részéről köszönetet szeretnék mondani Harsányi Gábornak és Illyefalvi-Vitéz Zsoltnak, akik pályafutásom kezdetén, a PhD elvégzésében és utána is vezetőként és témavezetőként egyengették a pályám, és lehetőségeket nyújtottak bekapcsolódni a nemzetközi kutatói körforgásba. Jakab Lászlónak, mint volt dékánnak, a kari körforgásba való becsatlakozásért tartozom köszönettel.
- Köszönettel tartozom közvetlen kollégáimnak, Illés Baláznak, Krammer Olivérnek, Bonyár Attilának, akik a kutatásokban, pályázatokban, mindennapi életben társként és barátként kísérek.
- Köszönet a tanszék további munkatársainak, akikre mindig lehet számítani: Gál László, Farkas Csaba, Gordon Péter, Berényi Richárd, Medgyes Bálint, Hajdu István, Hurtony Tamás, és az EFI-csapat, Bátorfi Réka, Takács Gergő, Szalai Zoltán és Ruszinkó Miklós (†). Kari és egyetemi szintre bővítve a sort már ki sem férne a lista.
- Sokat köszönhetek a hallgatóimnak, akikkel nagy számosságban készültünk együtt a mérnöki-kutatói létre, és a fenti témák kivitelezésére. Kivétel nélkül mindenkiel kiváló munkaviszonyban teltek a hónapok, évek. Remélem mindenki megtalálta a számítását!
- Szeretném megköszönni a Polimertechnika Tanszék munkatársainak a mérések kivitelezésében nyújtott segítséget és a mindig kedves, segítőkész, példaértékű hozzáállásukat a kooperációban. Elsősorban Prof. Czigány Tibornak és Dr. Bárány Tamás tanszékvezető uraknak, akik az elmúlt évtizedekben mindig eligazítottak a megfelelő fiatal kollégákhoz. Innen pedig köszönet Fejős Mártának, Gere Dánielnek és Pinke Baláznak a mérésekben és tanácsokban nyújtott segítségükért.
- A Bosch-ban történő kutatómunka lehetőségét tanszéki oldalról Dr. Jakab Lászlónak és Dr. Harsányi Gábornak, a Bosch oldaláról pedig elsősorban Szabó Andrásnak és Kemler Andrásnak köszönhetem. Természetesen nem feledkezhetem meg Tersztyánszky László, Kerek Viktor, Holló Gergely és Szurok Andrásné (†) támogató szakmai és emberi hozzáállásáról sem.
- A fenntartható hordozókon való kísérletezés csírája Hajdu István tanár úrtól származik, aki ötleteivel és lelkesedésével bő másfél évtizedig motorja volt a téma beindításának. Nagy köszönettel tartozom neki, hogy a téma megjelenésekor bevont a témakörbe, akkor még a VPS forrasztás alkalmazhatóságának vizsgálatára.
- Köszönetem szeretném kifejezni a Meshlin Kft. munkatársainak, elsősorban Csiszár Andrásnak (†), aki az új áramköri hordozó szubsztrát ötletével megkeresett. Köszönet Molnár Gábornak és Kozma Lászlónak, akikkel a munkát hasonló lendületben és tisztelettel tudtuk folytatni. Köszönet illeti a Sinano-ban résztvevő kollégákat és az Arduino hazai képviselőt, akik a PLA/Len-nel történő pályázat ötletét és a megkeresésem magasabb szintre tudták emelni. Köszönet illeti Pascal Xavier-t és csapatát.
- Köszönetem szeretném kifejezni az MTA MTO EETTB egykori tagjának és első szakmai mentoromnak, Dr. Kandár Tibornak, akitől az áramkörtervezés szeretetét, az iparban is elvárt rendezettséget tanultam, és aki az első külföldi, idegen nyelvű publikációmban is nagy segítséget nyújtott.
- Köszönetem és legmélyebb tiszteletem szeretném kifejezni Szüleimnek, akik minden pillanatban, minden erejükkel támogatták ambícióimat, tanulmányaimat, emberi utamat.
- Végül, de nem utolsósorban köszönetet szeretnék mondani a támogató (és tűrő) feleségemnek, aki jelen dolgozat nyelvtenát is nagy gondossággal és erőfeszítéssel vizsgálta végig. Valamint kislányomnak, aki a disszertáció írásának nehéz pillanataiban is képes volt mosolyával és humorával új erővel felvértezni

Hivatkozásjegyzék

- [1] J. Bourne, Time Spent With Connected Devices, (2025). Elérhető: <https://www.emarketer.com/content/time-spent-with-connected-devices-2025>. Elérés dátuma: 2026. 01. 30.
- [2] N.-C. Lee, Reflow Soldering Processes and Troubleshooting: SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies., (2002). Newnes, ISBN 0750672188
- [3] R. C. Pfahl and H. H. Amman, Method for Soldering, Fusing or Brazing, U.S. Patent 3,866,307, 1975.
- [4] C. Lea, Heat Transfer Fluids for Vapour Phase Soldering – An Appraisal (1989) Soldering and Surface Mount Technology, vol. 1, no. 1, pp. 23–32, 1989.
- [5] M. Avataneo, W. Navarrini, U. De Patto, and G. Marchionni, Novel perfluoropolyethers containing 2,2,4-trifluoro-5-trifluoromethoxy-1,3-dioxole blocks: synthesis and characterization, (2009) Journal of Fluorine Chemistry, vol. 130, pp. 933–937,
- [6] O. Krammer and T. Garami, Comparing the Intermetallic Layer Formation of Infrared and Vapour Phase Soldering (2011) Proc. 34th Int. Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), May 11–15, pp. 196–201.
- [7] W. Gatzka and T. Evans, Thermal Cycle Reliability Study of Vapor Phase BGA Joints (2012) Proc. IPC APEX, San Diego, USA, Paper S04-2.
- [8] W. Leider, Dampfphasenlöten – Grundlagen und praktische Anwendung (2002) Eugen G. Leuze Verlag, pp. 31–39.
- [9] S. Cheng, C.-M. Huang, and M. Pecht, A review of lead-free solders for electronics applications (2017) Microelectronics Reliability, vol. 75, pp. 77–95.
- [10] Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (RoHS), elérhető: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/rohs-directive_en, elérés dátuma: 2026. 03. 04.
- [11] United Nations General Assembly, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/70/1), 2015. Elérhető: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Elérés dátuma: 2026. 01. 30.
- [12] D. Suihkonen, Vapor phase for lead-free reflow (2007) Global SMT & Packaging, vol. 7, no. 9, pp. 30–32.
- [13] C. Zabel, Condensation Reflow-Soldering – The Soldering Process with Solutions for Future Technological Demands, ASSCON Systemtechnik-Elektronik GmbH technical paper, 2011. Elérhető: www.amtest.bg. Elérés dátuma: 2012. 06. 02.
- [14] B. G. Nimmo and G. Leppert, Laminar Film Condensation on a Finite Horizontal Surface (1970) Proc. 4th Int. Heat Transfer Conf., Paris, France, , pp. 402–403.
- [15] A. Bejan, Film condensation on an upward facing plate with free edges (1991) Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 34, pp. 582–587,
- [16] A. Géczy, Investigations into the Process of Vapour Phase Soldering. Ph.D. dissertation, Budapest Univ. Technology and Economics, 2014.
- [17] A. Poppe, M. Rencz, G. Hantos, J. Hegedüs, A. Poppe, M. Rencz, G. Farkas, and L. Gaál, Virtual Prototyping of LED Applications through Multi-Domain Models of LED Packages: The 'Industry 4.0'-Like Approach of the Delphi4LED Project, (2018) Proc. VII. Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4), Sept. 18–20.
- [18] E. J. Kelley, Selecting Base Materials for Lead-Free Assembly Applications, in Printed Circuit Handbook, 6th ed., C. F. Coombs, (2007), pp. 240/12.5.2.2. Ed. New York: McGraw-Hill,
- [19] D. Price, Thermomechanical Analysis. Loughborough Univ., IPTIME, 2006. Elérhető: www.sump4.com/downloads/TMA.ppt. Elérés dátuma: 2014. 07. 07.
- [20] A. Addagarla and N. S. Prasad, Finite element analysis of flip chip on board (FCOB) assembly during reflow soldering process, (2012.) Soldering & Surface Mount Technology, vol. 24, no. 2, pp. 92–99,
- [21] W. Xia, M. Xiao, Y. Chen, F. Wu, Z. Liu, and H. Fu, Thermal warpage analysis of PBGA mounted on PCB during reflow process by FEM and experimental measurement, (2014) Soldering & Surface Mount Technology, vol. 26, no. 3, pp. 162–171,
- [22] F. Li, SMT Process Characterization and Financial Impact, (2009) Proc. IPC Apex Expo, Las Vegas, USA, Mar. 31–Apr. 2, Paper S04.
- [23] P. L. A Tu, Y. C. Chan, K. C. Hung, and J. K. L. Lai, Study of micro-BGA solder joint reliability, (2001) Microelectronics Reliability, vol. 41, no. 2, pp. 287–293,
- [24] K.-N. Tu, Solder Joint Technology: Materials, Properties and Reliability (2007) Springer,
- [25] H.-Y. Chen, M.-F. Ku, and C. Chen, Effect of Under-Bump-Metallization Structure on Electromigration of Sn-Ag Solder Joints, (2012.) Advances in Materials Research, vol. 1, no. 1, pp. 83–92,
- [26] R. M. Digilov, Prediction of surface properties of metals from the law of corresponding states, (2003) J. Crystal Growth, vol. 249, pp. 363–371.
- [27] L. Meinshausen, H. Frémont, and K. Weide-Zaage, Migration induced IMC formation in SAC305 solder joints on Cu, NiAu and NiP metal layers (2012) Microelectronics Reliability, vol. 52, pp. 1827–1832.
- [28] Y. Tao, D. Ding, T. Li, J. Guo, G. Fan, Reflow of tiny 01005 capacitor/SAC305 solder joints in protective atmosphere (2017), Solder. Surf. Mt. Tech., Vol. 29. Issue: 3, pp. 144-150.
- [29] D. C. Whalley and H. Kristiansen, 'Current Density Simulations for Polymer Cored CSP Interconnects,' in Proc. 3rd IEEE CPMT Electronic System Integration Technology Conf., vol. 3, 2010, pp. 1–5.
- [30] D. C. Whalley, A simplified reflow soldering process modelm (2004) J. Mater. Process. Technol., vol. 150, no. 1–2, pp. 134–144.
- [31] B. R. Keeble, Medicine and War, (1988) vol. 4, pp. 17–25,
- [32] J. C. Mankins, Technology Readiness Levels: A White Paper. NASA, 1995.