



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
Elektronikai Technológia Tanszék

# Megnövelt áramsűrűség hatása különböző ólommentes forraszkötésekben

**TDK dolgozat**

KÉSZÍTETTE:

Straubinger Dániel

KONZULENS:

Dr. Géczy Attila

BUDAPEST, 2017

# Tartalomjegyzék

<b>Tartalomjegyzék .....</b>	<b>2</b>
<b>1 Bevezetés .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Felületszerelési technológia .....</b>	<b>5</b>
2.1 Tulajdonságai .....	5
2.2 SMT forrasztási technológiák .....	6
2.2.1 Újraömlesztéses forrasztás .....	6
2.2.2 Legjellemzőbb forrasztótvözetek tulajdonságai .....	8
<b>3 Elektromigráció és annak fontossága .....</b>	<b>10</b>
3.1 Elektromigráció .....	10
3.2 Minőségi és megbízhatósági problémák .....	12
<b>4 Különböző kutatások az EM témakörében .....</b>	<b>15</b>
4.1 BGA tokozású alkatrészekhez készült szimulációs vizsgálatok .....	15
4.2 Hőmérséklet és elektromigráció hatása forraszkötésekre .....	16
4.3 Meghibásodási mechanizmusok forraszkötésekben áram terhelés alatt elektronikai eszközökben .....	17
4.4 Elektromigráció kialakulásának fázisai .....	19
4.5 Ólommentes forraszkötések nyírási szilárdsága .....	20
<b>5 Korábbi szimulációs eredmények .....</b>	<b>22</b>
<b>6 Verifikációs kísérletterv .....</b>	<b>25</b>
6.1 Kiindulási paraméterek .....	25
6.2 Áramköri terv .....	26
6.2.1 Alkatrészek kiválasztása .....	27
<b>7 Kísérleti elrendezés előkészítése .....</b>	<b>29</b>
7.1 Tesztáramkörök legyártása .....	29
7.1.1 Nyomtatott huzalozású lemez .....	29
7.1.2 Stencilnyomtatás .....	29
7.1.3 Alkatrészek beültetése .....	30
7.1.4 Újraömlesztéses forrasztás .....	32
<b>8 Terheléses vizsgálat - kísérletterv .....</b>	<b>33</b>
8.1 Mérési összeállítás, paraméterek .....	33
8.1.1 Vizsgálati módszerek .....	37

8.1.2 Csiszolás menete, megfontolások .....	37
8.1.3 Irodalom alapján várható eredmények.....	40
<b>9 Eredmények.....</b>	<b>41</b>
9.1 Röntgen vizsgálat.....	41
9.2 Keresztmetszeti csiszolatok .....	41
9.2.1 A keresztmetszeti csiszolatok optikai mikroszkópos vizsgálata.....	41
9.3 Letolási vizsgálatok, nyírási szilárdság .....	45
9.3.1 Nyírási szilárdság értékek.....	45
9.3.2 Optikai mikroszkópia a letolt mintákon.....	47
9.3.3 Pásztázó elektronmikroszkóp .....	48
<b>10 Továbbfejlesztési lehetőségek .....</b>	<b>52</b>
10.1 Jelenlegi összeállítás korlátai.....	52
10.2 Lehetséges továbbfejlesztés .....	52
<b>11 Összegzés.....</b>	<b>53</b>
<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>55</b>
<b>Függelék.....</b>	<b>57</b>

# 1 Bevezetés

Az elektromos eszközök funkcionális fejlődése, és mindennapjainkba történő beszivárgása olyan igényeket támaszt a tervezők és gyártók elé, melyek új problémákkal is együtt járnak. Az áramkörök méretei egyre kisebbek, funkciósűrűségük azonban folyamatosan növekszik. Az elektronikai technológiában egyre kisebb méretű alkatrészeket használnak, ilyenek többek között a dolgozat témáját képező 0603, 0402 illetve a 0201 méretű alkatrészek is. Utóbbi legnagyobb dimenziói is már 1 mm alattiak, így forraszkötéseikben a kis felület miatt arányosan magasabb áramsűrűség értékek alakulhatnak ki.

Dolgozatomban kritikus mértékű áramsűrűség érték felett megjelenő jelenséggel, az elektromigrációval foglalkozom. A kisebb geometria alapvetően magával hordozza a nagyobb áramsűrűség értéket, még akkor is, ha a tervezés során a vezetõn átfolyó áram értékét alacsonyabbra tervezik. Fontos azonban azt is megjegyezni, hogy a jelenség hétköznapi körülmények között is előfordul, azaz normál működés esetén is foglalkoznunk kell ezzel a hibajelenséggel.

Az elektromigrációt okozó áramsűrűségek meghatározását irodalmi forrásokra, és korábbi tanszéki szimulációs vizsgálatokra alapozom, célom egy olyan terv kidolgozása, mellyel ezeket az eredményeket paraméter hűen verifikálni lehet, azaz az elméleti szimulációk hatásának gyakorlati vizsgálatokkal lehet igazolni.

A továbbiakban ismertetem az elektronikai technológiának ezen folyamathoz kapcsolódó területeit, részletesen foglalkozom az elektromigráció kialakulásának okaival és hatásaival. Különösen érdekes ez a tématerület, mert korábban passzív SMD alkatrésszel még nem készítették hasonló vizsgálatot, de a sokat vizsgált BGA tokozású alkatrészekhez hasonló geometriai méretek mindenképpen indokoltá teszik ezeknek a vizsgálatát is.

Dolgozatomban ismertetem a vizsgálat előkészítését és gyakorlati megfontolásait, valamint bemutatom a munka közben felmerülő problémák és tapasztalatok miatt bevezetett optimalizálásokat. A dolgozat végén az eredmények kiértékelésével levonom a megfelelő következtetéseket.

## 2 Felületszerelési technológia

### 2.1 Tulajdonságai

A felületszerelési technológia (SMT, Surface Mounting Technology) először 1960-as években jelent meg az űr- és hadiiparban. Kezdetben kerámia tokozást és síralyszárny kivezetést használtak, majd az 1970-es évek elejétől megjelentek kivezetés nélküli (leadless) alkatrészek is. Az 1970-es évek végén már műanyag tokozást is használtak. A telekommunikáció, számítógép- és az autóiipar is nagy szerepet játszott a technológia térnyerésében.

A technológia egyre népszerűbbé vált annak volt köszönhetően, hogy kisebb méretet igényeltek az alkatrészek, a hordozó mindkét oldalára tudtak szerelni, ezzel is növelve a funkciósűrűséget. A standard méretkódoknak köszönhetően, napjainkban beültető gépek segítségével óránként akár százezernél is több alkatrész beültetésére is lehetőség nyílik. A technikai fejlődés következtében olyan kis méretek váltak megvalósíthatóvá, amikkel azonban új megbízhatósági problémák is felmerülhetnek, köztük a későbbiekben tárgyalt elektromigráció.

A napjainkban gyakran használt méretkódokat és a hozzájuk tartozó fizikai méreteket az 2-1. táblázat foglalja össze:

2-1. táblázat – jellemző SMT alkatrészek méretei [1]

méretkód	hosszúság [mm] x szélesség [mm]
1812	4,6 x 3
1206	3 x 1,5
0805	2 x 1,3
0603	1,5 x 0,8
0402	1 x 0,5
0201	0,6 x 0,3
01005	0,4 x 0,2

A méretkódok jelentése a 0402-es kódig az, hogy a hosszúság az első két szám értéke, szorozva 10 milliinch-el, a szélesség hasonlóképp. Ezzel a módszerrel fejben is könnyen kiszámíthatóak a fizikai méretek. 0402-nél kisebb esetben ez a szabály már nem érvényes.

## 2.2 SMT forrasztási technológiák

### 2.2.1 Újraömllesztéses forrasztás

Az elektronikai szereléstechnológiában általánosan megfogalmazott forrasztott kötés lényegében egy adhéziós-diffúziós kötés, amelyet egy hozaganyag (forraszötívózet) segítségével hoznak létre két fémes kivezetés között. Ilyen kivezetés lehet például egy alkatrészláb és egy áramköri hordozón kialakított kontaktusfelület. Legelterjedtebb módja a forrasztott kötés létrehozásának az újraömllesztéses (reflow) forrasztás, aminek lényege, hogy a forraszanyagot általában stencilnyomtatással, paszta formában viszik fel a kontaktusfelületekre. A paszta tartalmazza a felület nedvesítéséhez szükséges folyasztószert, illetve a forrasz szemcséket, amik körülbelül a térfogat felét, de a tömeg 90%-át teszik ki. Stencilek közül a legelterjedtebben használt a rozsdamentes acélból készülő 75-250 µm vastag, kifeszített fémfólia, amelyre lézer segítségével apertúrákat (ablakokat) vágnak a nyomtatandó áramkörnek megfelelően. Ezt követően a beültető gép automata módon képes az alkatrészek beültetésére. A gép fiduciális (pozicionálást segítő) ábrák alapján egy optimalizált algoritmus alapján helyezi fel a hordozóra az alkatrészeket, amiket vákuumos fejjel vesz fel a tárákból.

Az iparban használt anyagok felhasználhatóságát az RoHS direktíva (Restriction of Hazardous Substances Directive, azaz a veszélyes anyagok szabályozásának direktívája) keretein belül fogalmazta meg és fogadta el az Európai Parlament 2003-ban. A 2002/95/EK irányelv tilalmat rendelt el az ólom, a higany, a kadmium, a hat vegyértékű króm, a polibrómozott bifenilek (PBB) és a polibrómozott difenil-éterek (PBDE) alkalmazására a 2006. július 1. forgalomba kerülő elektromos és elektronikus berendezésekben. A szabályozás alóli mentesség felülvizsgálat alapján speciális esetekben lehetséges. [2]

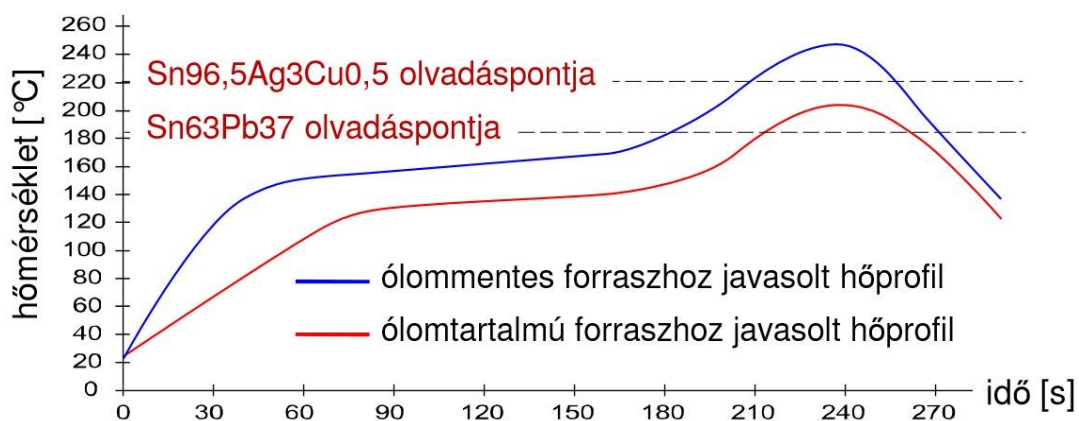
A közkedvelt és jól optimalizált ólmos forraszanyagok kiváltásának legfőbb problémája az általánosan használt ólommentes forraszanyagok magasabb olvadáspontja jelentette. A 2-1. táblázat tartalmaz néhány, gyakran használt ólommentes és ólom tartalmú (utóbbiakat sötét háttérrel jelöltem) forraszötívózetet.

2-2. táblázat – az elektronikában leginkább elterjedt forrasztanyagok

Összetétel	Olvadáspont [°C]
Sn <sub>96.5</sub> Ag <sub>3</sub> Cu <sub>0.5</sub>	217
Sn <sub>96.5</sub> Ag <sub>3.5</sub>	221
Sn <sub>99.3</sub> Cu <sub>0.7</sub>	227
Sn <sub>67</sub> Pb <sub>37</sub>	~185
Sn <sub>60</sub> Pb <sub>40</sub>	~188
Sn <sub>62</sub> Pb <sub>36</sub> Ag <sub>2</sub>	179

### 2.2.1.1 Alagútkemencék (konvekciós) és tálcás (infrásugárzásos) újraömlasztó kemencék

Az újraömlasztó kemencék két fő fajtája a tálcás kemence és az alagútkemence. Utóbbi az iparban leggyakrabban használt, hiszen gyártósorban illeszthető. A forrasztás folyamat mindkét esetben hasonló: adott hőprofilal készítik, létrehozva a mechanikai és elektromos kötést. A hőprofil egy lehetséges esete, és a különbség ólomtartalmú és ólommentes forrasztanyag esetén látható a 2-1. ábrán, ennek főbb részei: előmelegítés, hőntartás, újraömlasztás, hűtés. Hőátadás szerint az alagútkemencék általában konvekciós elven (meleg- és hideglevegő áramoltatással) működnek, míg tálcás kemencék esetében a melegítés általában infrásugárzással történik. Utóbbi esetében az alkatrészek hőmérsékletének különbsége nagyobb lehet, sőt még az alkatrészek tokozásának színe is befolyásolja azok melegedését.

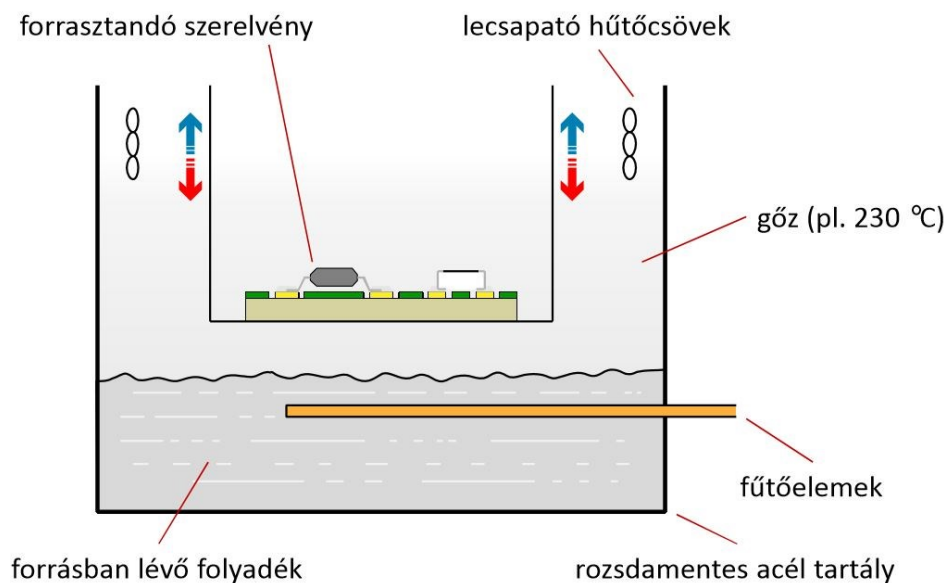


2-1. ábra - újraömlasztási forrasztás lehetséges hőprofilja, ólomtartalmú (piros) és ólommentes (kék) forrasztó esetén [3]

A csúcshőmérséklet ólommentes forrasztóanyagok esetén 250 °C körüli, a korábban használt ólomtartalmú forrasztóanyag esetén 20-30 °C-kal kevesebb. Napjainkban egyre inkább nagyobb figyelmet fordítanak a környezetvédelemre.

### 2.2.1.2 Gőzfázisú forrasztás

A gőzfázisú forrasztás elve, hogy egy adott forráspontú folyadékot fűtőcsövek segítségével forralunk, így gőz képződik a forrasztásra előkészített tartályban. A tartály tetején lecsapató hűtőcsövek vannak. A forrasztandó szerelvényt leengedjük a gőzbe, aminek a hőmérséklete fizikailag meghatározott: egészen addig, amíg a forrasztanyag folyadék és gőz halmazállapotban is jelen van, a gőz maximális hőmérséklete a folyadék forráspontja. A különböző halmazállapotokat és a folyamat menetét a 2-2. ábra szemlélteti.



2-2. ábra – gőzfázisú forrasztás megvalósítása [3]

A folyamat legfőbb előnye a nagyon egyenletes hőátadás, ami annak köszönhető, hogy a forrasztáshoz használt gőz arra törekszik, hogy egyenletesen töltsen ki a számára rendelkezésre álló térfogatot, ami a forrasztási minőség szempontjából fontos tényező. A forrasztáshoz szükséges energiaátadás a gőz kondenzációjával történik meg, aminek hőátadási hatékonysága jóval egyenletesebb és magasabb, mint a konvekciós illetve sugárzásos hőátadás esetében. Az egyenletes hőátadás és az inert gőz megelőzheti a sűrűképződési effektust, valamint a gázzárvány-képződést, azonban a hirtelen melegedés ezeket problémákat katalizálhatja is nem megfelelő beállítás esetén. Energiaigénye sokkal kisebb az újraömlésztéses- és hullámforrasztáshoz képest. [4][5]

### 2.2.2 Legjellemzőbb forrasztótvözetek tulajdonságai

Az általánosan használt forrasztótvözetek legjellemzőbb paramétereit a 2-3. táblázat foglalja össze:



2-3. táblázat - legjellemzőbb forrasztóötvözetek tulajdonságai [6]

Ötvözet	Olvadáspont	Általános felhasználási terület
<b>Ólomtartalmú ötvözetek</b>		
$\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$	183 °C	A legáltalánosabban elterjedt ólomtartalmú eutektikus forrasztóanyag. Manapság már az elektronikai gyártásban csak ritka esetekben alkalmazzák.
$\text{Sn}_{60}\text{Pb}_{40}$	183-190 °C	Katonai alkalmazások, régi szabványok
$\text{Sn}_{43}\text{Pb}_{43}\text{Bi}_{14}$	144-163 °C	Rendkívül alacsony olvadáspontja miatt kedvező tulajdonságú Bizmut tartalmú ötvözet.
<b>Ólommentes ötvözetek</b>		
$\text{Sn}_{96.5}\text{Ag}_{3.5}$	221 °C	Eutektikus ötvözet, nagy megbízhatóságú alkalmazásoknál alkalmazzák. Az ezüsttartalom miatt magasabb az ára.
100% Sn	232 °C	Általában érintkezők védőbevonatának használják.
$\text{Sn}_{96.5}\text{Ag}_{3.0}\text{Cu}_{0.5}$ (SAC305)	217-220 °C	A leg elterjedtebb ólommentes forrasztóanyag. Az iparban is ezzel próbálják felváltani a korábbi SnPb anyagokat.
$\text{Sn}_{95.4}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.8}$ (SAC405)	217-221 °C	Hasonló összetételű, mint a SAC305, vitatkoznak arról, hogy melyik az előnyösebb ötvözet. Magasabb ezüsttartalma miatt kicsit magasabb az ára társához képest.

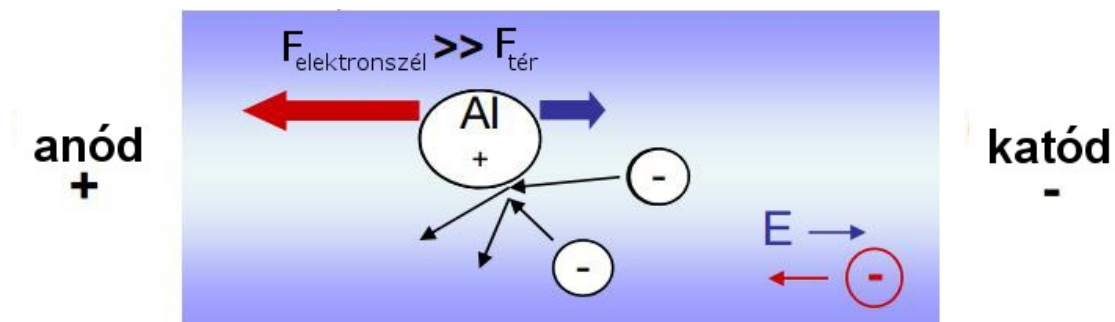
## 3 Elektromigráció és annak fontossága

### 3.1 Elektromigráció

A mai elektronika egyik legfontosabb törekvése a növekvő funkciósűrűség mellett a méretek minimalizálása. A kisméretű alkatrész méretek és vezetősége miatt kialakulhatnak olyan kritikus áramsűrűség értékek, aminek hatására elektromigráció jöhet létre, hibákat idézve elő. A jelenség hatásával mindenképp foglalkoznunk kell.

Elektromigráció jön létre abban az esetben, ha a megnövekedett áramsűrűség következtében, annak bizonyos (későbbiekben tárgyalt) szintje fölött a nagy energiájú elektronok (elektronoszél) momentum átadással kiszakítják az atomokat a helyükről, ezzel anyaghiányt, vakanciát (üresedés) illetve hillock-okat (domb, halom) idézve elő.

A folyamat kialakulásának feltétele a 3-1-es ábrán látható: az elektronok momentumátadásából származó erőnek ( $F_{\text{elektronoszél}}$ ) sokkal nagyobbak kell lennie, mint a külső elektrosztatikus téré ( $F_{\text{tér}}$ ).



3-1. ábra – Elektromigráció kialakulása [7]

A folyamatot az előbbi két erő eredője határozza meg, az alábbi módon írható fel képletszerű alakban [8][9]:

$$F_{EM} = Z' \cdot e \cdot E \quad (1)$$

ahol:

$Z'$  : a migráló ion effektív töltésszáma

$e$  : az elektron töltése [ $1,6 \cdot 10^{-19}$  C]

$E$  : az elektromos térerősség [V/m]

Az atom fluxus [ $\text{atom}/\text{cm}^2$ ] az alábbi módon számolható:

$$J_{EM} = C \cdot \frac{D}{kT} \cdot Z' \cdot e \cdot E \quad (2)$$

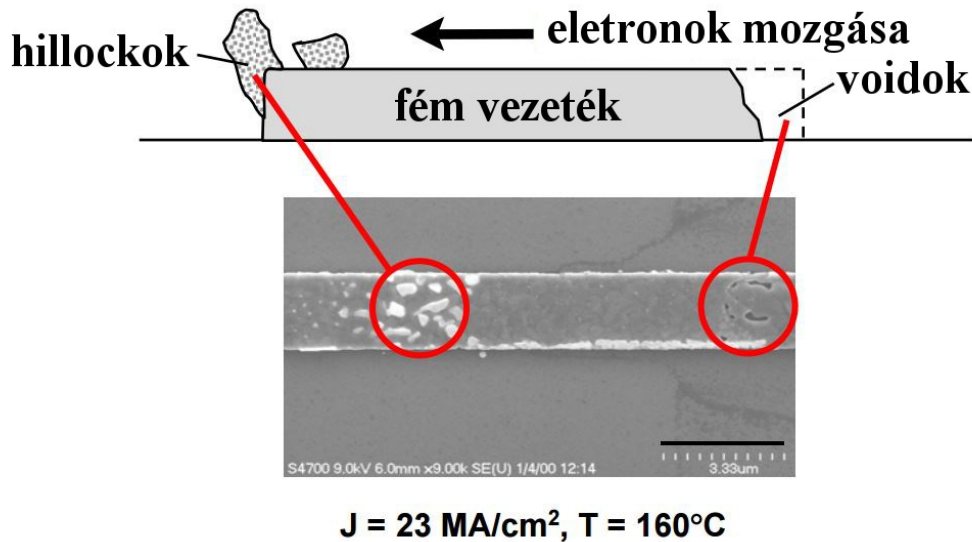
ahol:

$\frac{D}{kT}$  : a migráló atom mobilitása

$C$  : atomi koncentráció

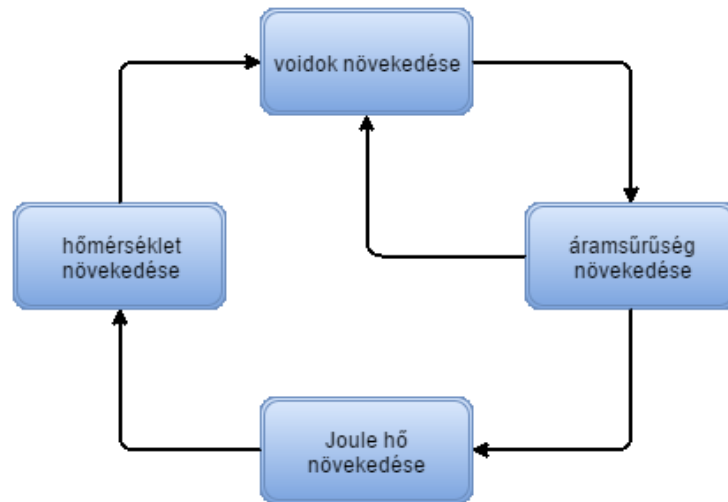
Az atomok mozgásának iránya megegyezik az elektronok mozgásának irányával.

Ahogy a 3-2. ábra mutatja, anyaghiány, azaz zárványok (voidok) alakulhatnak ki ott, ahonnan az atomok elsodródnak, hillock növekedhet ott, ahol az elektronok által sodort atomok lerakódnak. Utóbbi esetén a lerakódás oly mértékű is lehet, hogy rövidzár jön létre közel elhelyezett vezeték között.



3-2. ábra – EM következtében kialakuló hibák: voidok és hillockok,  $2,3 \times 10^{10} \text{A/m}^2$  áramsűrűség esetén,  $160^\circ\text{C}$ -os környezeti hőmérséklettel [10]

Az EM fokozódik annak következtében, hogy a voidok helyén a hiányzó atomok miatt az effektív vezető keresztmetszet lecsökken, aminek hatására növekszik a lokális áramsűrűség valamint a Joule hő, ami az áram effektív értékétől is függ, így az áramnak illetve áramsűrűségnek kritikus szerepe van a folyamatban. Ezek következtében növekszik a hőmérséklet, és mivel a diffúzió egy hőmérsékletfüggő folyamat, ezért felgyorsul a voidok növekedése, tehát a folyamat öngerjesztő lesz, amit az alábbi 3-3. ábra szemléltet:



3-3. ábra – Elektromigráció (EM) folyamata [11]

A voidok miatti csökkenő keresztmetszet következtében a hővezető illetve az elektromos vezetőképesség is romlik. Az EM folyamatában általában megfigyelhető a polaritás hatása, ugyanis a folyamat fő hajtóereje, az elektronszél, befolyásolja a részecskék útját.

## 3.2 Minőségi és megbízhatósági problémák

Ez a dolgozat chip méretű ellenállások forraszkötésében az elektromigráció által kialakuló problémákkal foglalkozik. Az irodalomban sok cikk található BGA tokozású alkatrészek elektromigráció szempontjából való vizsgálatára, ugyanakkor felületszerelt ellenállások vizsgálatára nem találni példát. A miniatürizálás hatására azonban már 0603 méretkódú alkatrész esetén is érdemes foglalkoznunk a probléma vizsgálatával, hiszen az ennek méretei esetén is már létrejöhethet az alkatrész kivezetéseinél is akkora áramsűrűség, ami elektromigrációhoz vezet.

Kovács András diplomaterve [6] keretében szimulációs vizsgálatokat végzett chip méretű ellenállások forrasztott kötésein kialakuló áramsűrűségekkel kapcsolatban. Dolgozatában korábban irodalmazott cikkek alapján a  $10^7$ - $10^8$  A/m<sup>2</sup> áramsűrűséget határozza meg kritikus értéként, amit elérve számolnunk kell az EM hatásaival. Az általa használt kritikusként kezelt értékről az 5. Korábbi szimulációs eredmények című fejezetben esik szó.

D. C. Whalley több szimulációs vizsgálatot is végzett, köztük hagyományos forrasztás BGA kivezetésre, illetve polimer magos BGA bump esetére is. Ezek esetében a kritikusnak tartott áramsűrűség értékek rendre  $4,8 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup> illetve  $7,45 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup> mértékűek voltak. [12][13]

Az EM hatására kialakuló voidok a csökkenő keresztmetszet révén mind az elektromos, mind a mechanikai tulajdonságait rontják az anyagnak. Voidok miatt a mechanikai feszültség olyan mértékű lehet, ami repedéshez, majd töréshez vezethet, vagy pusztán anyagihiány következtében romolhat az alkatrész tapadása.

A megnövekedett áramsűrűség emelkedett lokális hőmérsékleteket is jelent, ami felgyorsítja a határfelületeken kialakuló diffúziót. Ezzel a kritikus „forró zónákban” (hot-zone) a réz-ólommentes forrasz határfelületeken kialakuló intermetallikus ötvözet rétegek is megvastagodhatnak, amelyek ridegségükből fakadóan további hibajelenségeket, és csökkent mechanikai stabilitást okozhatnak. [14][15]

Az EM miatti MTTF (mean time to failure), azaz a meghibásodásig eltelő átlagos időt a Black törvény írja le:

$$MTTF = \frac{A}{J^n} \cdot e^{\frac{E_a}{kT}} \quad (3)$$

ahol:

A : felület [m<sup>2</sup>]

J : áramsűrűség [A/m<sup>2</sup>]

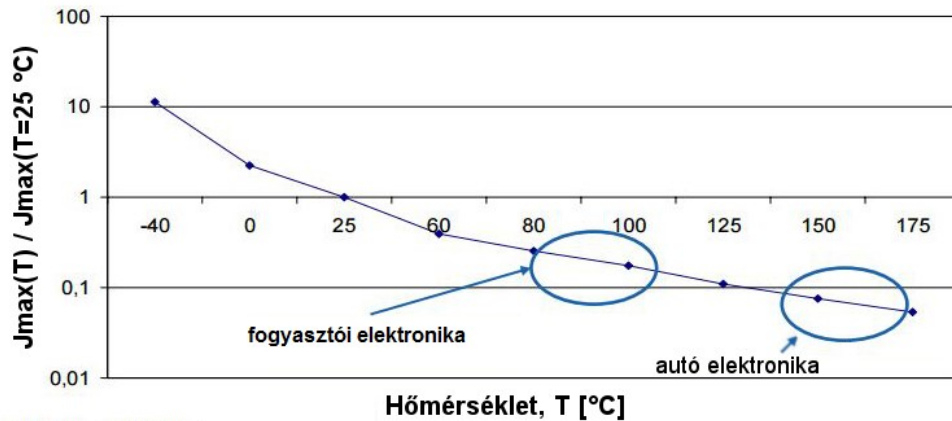
n : skálázási faktor (általában 2)

E<sub>a</sub> : aktivációs energia [J]

k : Boltzmann állandó [J/K]

T : hőmérséklet[K]

A képlet szerint a meghibásodásig eltelő idő csökken az áramsűrűség és hőmérséklet növekedésével. A maximális megengedhető áramsűrűség változását szobahőmérsékleti referencia értékhez képest a 3-4. ábra mutatja a hőmérséklet függésében:



$$MTTF(T) = MTTF(T_{Ref})$$

3-4. ábra – A maximális áramsűrűség összehasonlítva a szobahőmérsékleten megengedett áramsűrűséggel a hőmérséklet függvényében [16]

Látható, hogy a hőmérséklet emelkedésével nagymértékben csökken a megengedhető maximális áramsűrűség. Amennyiben a méretek csökkenése mellett nem javul az eszközök energiahatékonysága, akkor a termékek esetében a maximális áramot korlátozni kell, már csak a kis vezető keresztmetszeteken létrejövő nagy áramsűrűségek miatt is, amik az alkatrészek túlmelegedéséhez, és számos egyéb problémához vezethetnek.

A következő fejezetben ismertetek néhány irodalmi kutatást a megnövekedett áramsűrűséggel, az elektromigrációval és annak következményeivel kapcsolatban.

## 4 Különböző kutatások az EM témakörében

### 4.1 BGA tokozású alkatrészekhez készült szimulációs vizsgálatok

D. Whalley és H. Kristiansen cikkében [12] vizsgálta a polimer magú forrasz bumpokat. Ezek a klasszikus forrasz bumpokkal szemben mechanikai szempontból jobbnak vélt alternatívához készítettek szimulációs vizsgálatokat, ugyanis a pozitív tulajdonságai mellett a polimer mag miatt az egyes bumpok elektromos- és hőellenállása is nagyobb, köszönhetően a csökkenő vezető keresztmetszetnek, ezért mindenképp foglalkozni kell az ilyen típusú összeköttetésekkel is. Vizsgálatuk során véges elem módszerrel szimulálták a maximálisan kialakuló áramsűrűséget.

A szimulációs eredményeket a 4-1. számú táblázat foglalja össze, ahol a negyedik oszlopban szereplő áram terhelhetőségi index az mutatja meg, hogy az egyes modellek áramterhelhetősége hogyan viszonyul a hagyományos forrasz bump modelljéhez (annak indexe 1-es). A szimulációs eredmények között egészen meglepő, hogy a +20%-os pad méretnek köszönhetően akár négyszer kisebb a kialakuló áramsűrűség maximum a polimer magos bump esetében. A 4-1. táblázatban különböző esetek szerepelnek annak függvényében, hogy a forrasztásgátló maszk (solder mask, SM) ablak mekkora átmérőjű a padhez képest.

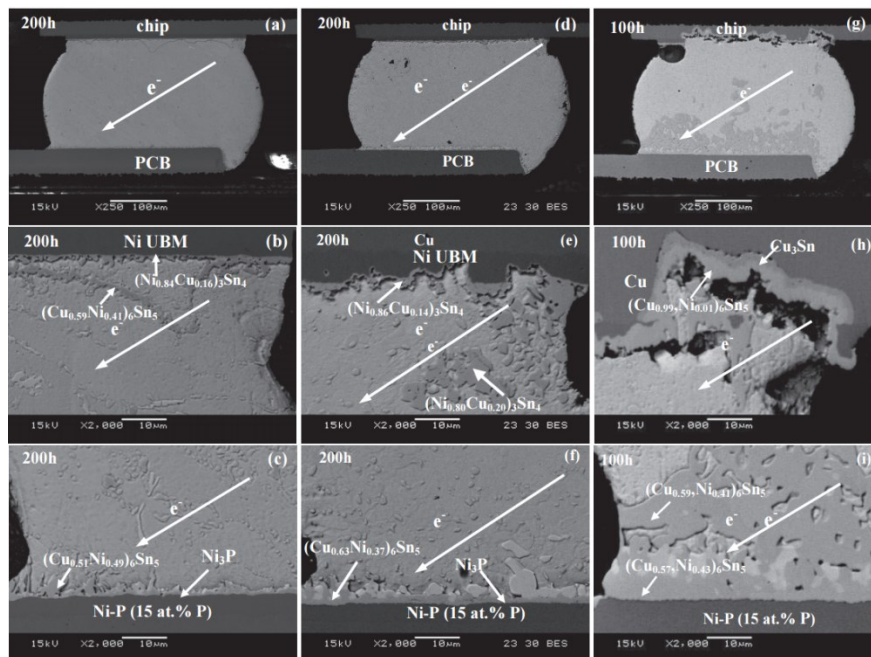
4-1. táblázat – szimulációs eredmények összefoglalása [12]

Modell, bump típus	R [mΩ]	Maximális áramsűrűség [A/m <sup>2</sup> ]	Áram terhelhetőségi index
3D, forrasz	7,87	1,18x10 <sup>8</sup> (9,9x10 <sup>6</sup> VIP esetén)	1
3D, polimer mag	8,46	3,89x10 <sup>7</sup> (1,86x10 <sup>7</sup> VIP esetén)	3
3D, polimer mag, +10%-kal nagyobb átmérőjű pad, mint SM ablak	8,33	3,19x10 <sup>7</sup>	3,7
3D, polimer mag, +20%-kal nagyobb átmérőjű pad, mint SM ablak	8,2	2,9x10 <sup>7</sup>	4

A szimulációjuk alapján különös figyelmet kell szentelni az EM számára VIP (via in pad) konstrukció alkalmazásakor. Továbbfejlesztési lehetőségként példának hozták komplexebb alakzatú pad kivezetéseket, mint például könnyecsepp formájú lekerítést, aminek hatására egyenletesebb az áram, kisebb lehet az áramsűrűség.

## 4.2 Hőmérséklet és elektromigráció hatása forraszkötésekre

L. Chen, Y. Feng, X. Liu, M. Huang 2013-mas cikkükben [17] vizsgálták az EM hatását különböző hőmérsékleti értékeken, különböző ideig. Vizsgálataikat egy flip chip bumpjain végezték, eredményeiket pedig pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) és elektronsugaras mikroanalízissel (EPMA) értékelték ki. Utóbbi segítségével lehetőség van arra, hogy az EM hatását oly módon kövessük, hogy megvizsgáljuk mennyire változik meg a forrasztott kötés után kialakult UBM (under bump metallization, bump alatti fémezés) és IMC (intermetallic compound, intermetallikus vegyület) anyagösszetétele változását, illetve követhetjük az anyagok vándorlását. Vizsgálati eredményeik a 4-1. ábrán láthatóak, szintén alátámasztják, hogy a magasabb hőmérséklet és áramsűrűség érték növeli az EM hatását.



4-1. ábra – A Ni/Sn-3.0Ag-0.5Cu/ENEPIG forraszkötésének mikrostruktúra változása: (a) 200 óra, 85 °C,  $0,9 \times 10^3$  A/cm<sup>2</sup> áramsűrűséggel; (d) 200 óra, 150 °C,  $1 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup> áramsűrűséggel, (g) 100 óra, 180 °C,  $1 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup> áramsűrűséggel. (b), (e), (h) a chip oldalról készült nagyított képek, (c), (f), (i) pedig a PCB oldalról készült nagyított képek, rendre az (a), (d), (g) képekhez. Az áram a chip felől folyt a PCB felé. [17]

A 4-1. ábra (a)-n 200 óra elteltével,  $0,9 \times 10^3$  A/cm<sup>2</sup> ( $9 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup>) áramsűrűséggel, 85 °C hőmérséklettel nem látszik egyértelmű hibajelenség. A 4-1. ábra

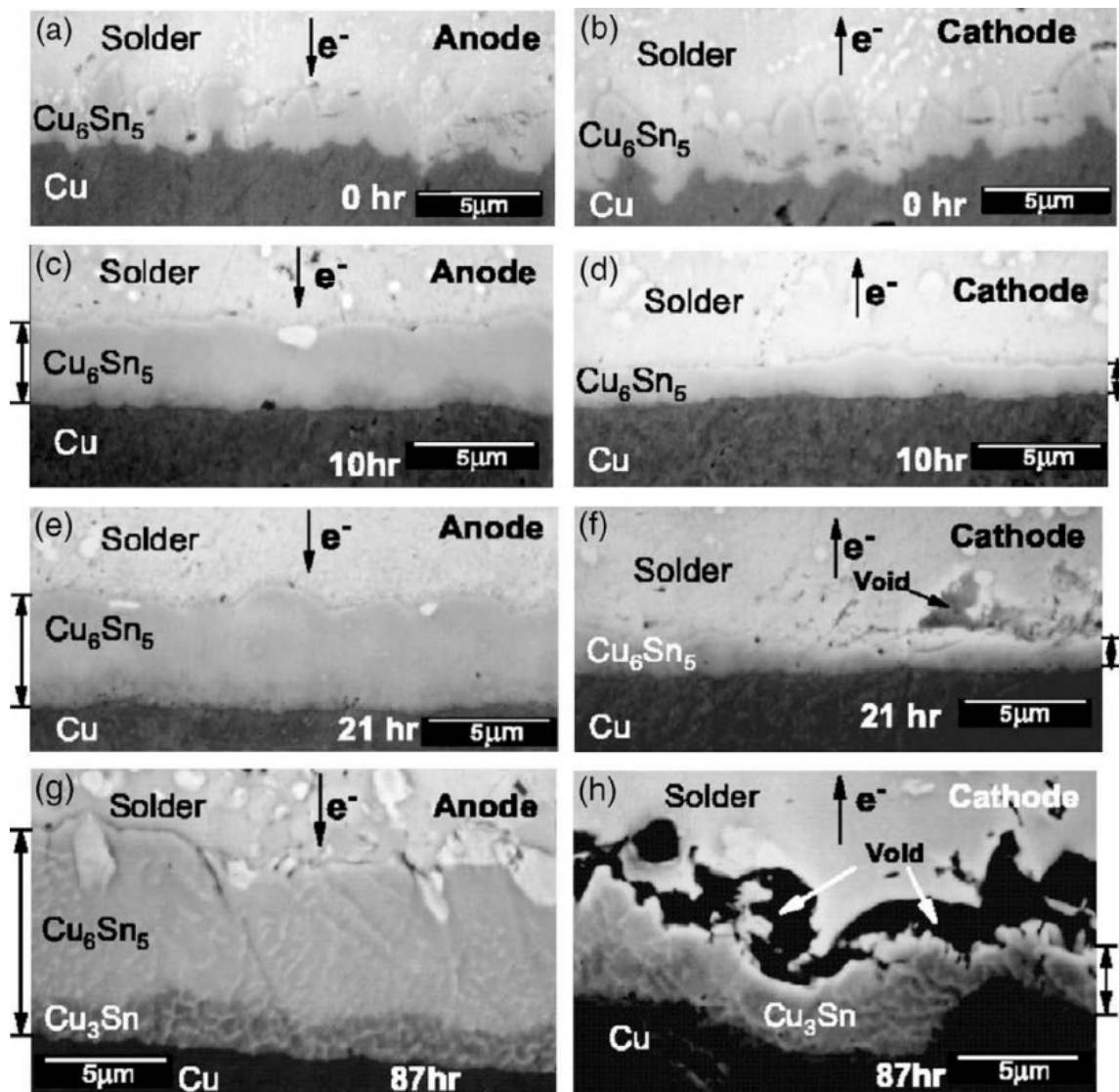


(d)-n szintén 200 óra után, azonban 150 °C,  $1 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup> ( $1 \times 10^8$  A/m<sup>2</sup>) áramsűrűséggel már jól megfigyelhető a katód oldalon az UBM réteg elfogyása. A kötés sérülése még súlyosabb lett a 4-1. ábra (g)-n, ahol már 180 °C volt a hőmérséklet, az idő pedig 100 óra. Chip oldalon az anyag elszivacsosodott, majdnem meghibásodáshoz vezetett, valamint nagy mennyiségű IMC szemcse figyelhető meg az anód oldalon. A Ni UBM réteg a hőmérséklet növekedésével egyre inkább eltűnt a katód oldalról, és bekerült a forrasztóvözetbe. A polaritás hatása is jól megfigyelhető az elektromigrációban: az atomok átrendeződése és mozgási iránya a megegyezik az elektronok irányával, az intermetallikus réteg vastagabb lett a katód oldalon.

### **4.3 Meghibásodási mechanizmusok forraszkötésekben áram terhelés alatt elektronikai eszközökben**

Y.C. Chan és D. Yang 2008-as cikkükben [18] részletesen vizsgálják az áram terhelés alatt levő forraszkötések meghibásodásának okait. Foglalkoznak az elektromigráció több lehetséges hatásával, köztük az intermetallikus réteg változásaival. Cikkükből ezt a témát emelném ki, dolgozatom 8. fejezetében tárgyalt megfigyelés miatt. Kutatásukhoz nagy áramsűrűség értékekkel ( $2 \times 10^8$  A/m<sup>2</sup>-től  $4 \times 10^8$  A/m<sup>2</sup>-ig) terhelt áramkörök intermetallikus vegyületeinek változásait is vizsgálták.

Megfigyelték, hogy az intermetallikus rétegképződés szempontjából jelentős szerepet tölt be az áram iránya. A 4-2. ábrán Sn<sub>3,8</sub>Ag<sub>0,7</sub>Cu forraszkötés árammal való terhelése látható különböző időközönként. A bal oldali és a jobb oldali ábrákon az áramirány egymáshoz képest pont fordított.

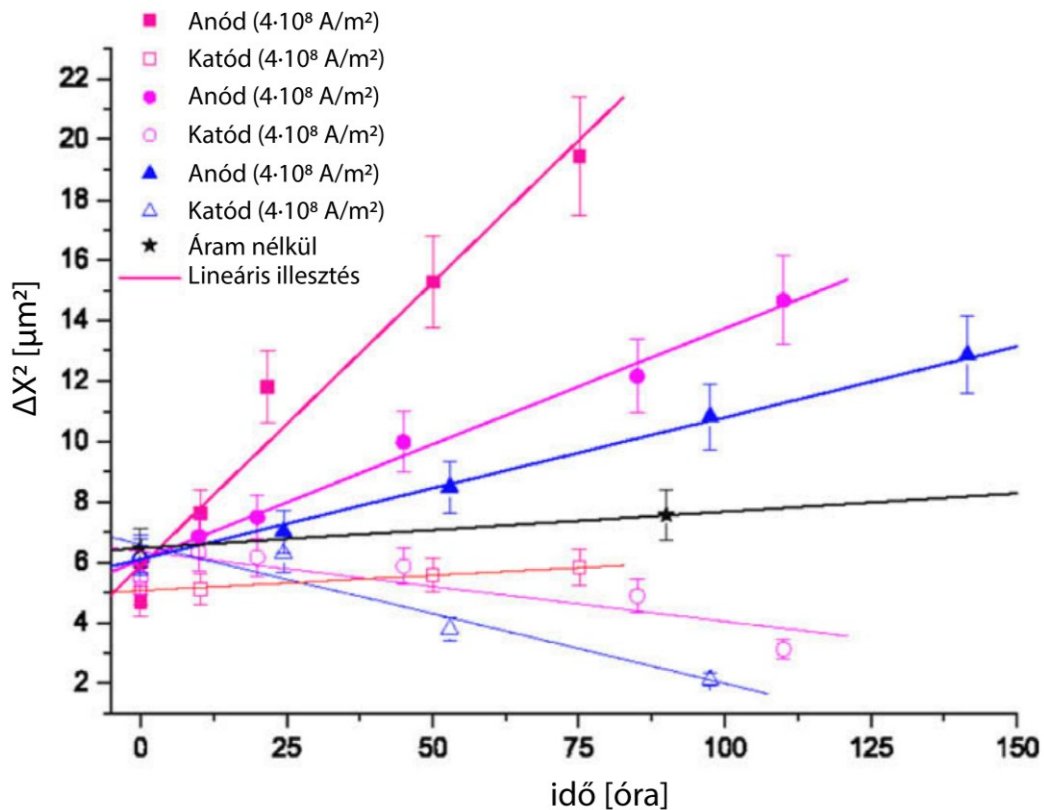


4-2. ábra – SEM kép  $\text{Sn}_{3,8}\text{Ag}_{0,7}\text{Cu}$  forraszkötésről,  $3,2 \times 10^8 \text{ A/m}^2$  [18]

Megfigyelhető az ábrákon, hogy ahol az áram a réz pad irányába folyt, ott jóval vastagabb intermetallikus réteg növekedett. Az ábrák mellett levő nyilak a rétegvastagságot ábrázolják az azonos idő elteltével. Ahol a réz pad a katód oldal volt, ott megfigyelhető voidosodás illetve az intermetallikus réteg roncsolódása.

Mindkét jelenség hatással lehet a forraszkötés megbízhatóságára, akár az egész áramkör meghibásodásához vezethet.

A 4-3. ábrán láthatóak különböző mérési pontok, ahol az egyes minták intermetallikus rétegeinek felületét vizsgálták az idő függvényében  $120^\circ\text{C}$  hőmérsékleten.



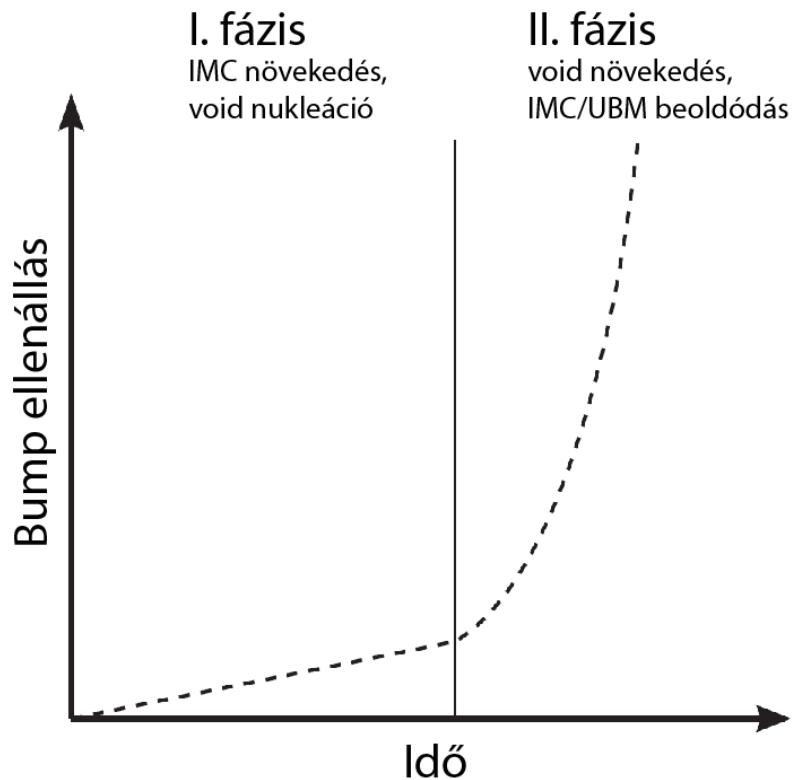
4-3. ábra - Intermetallikus felület változása az idő függvényében különböző áramsűrűségek esetén, 120 °C-os hőmérsékleten [18]

Jól látszik az anód és katód oldal közötti intermetallikus réteg felületek közötti különbség azonos áramerősség esetén, valamint az is, hogy a nagyobb áramerősség vastagabb réteggel is együtt jár.

A kísérletükben az áramsűrűség értékek a dolgozatomban vizsgált, az elektromigrációhoz irodalmi adatok alapján várhatóan szükséges áramsűrűség értékéhez képest körülbelül egy nagyságrenddel nagyobbak.

#### 4.4 Elektromigráció kialakulásának fázisai

H. Ceric és S. Selberherr 2014-es cikkében [15] ón alapú forrásokban vizsgálta az elektromigráció jelenségét. Cikkükben Sn forraszbump esetére, áramterhelés hatására 4.4 ábrán látható modellt állították fel.



4-4. ábra - EM okozta ellenállásváltozás Sn forrasz bumpokban [15]

Ón forrasz bump esetében keletkező hiba időben két különböző fázisra bontható: az első fázisban az intermetallikus réteg növekszik és a voidok nukleálódnak, míg a második fázisban a voidok növekednek és az intermetallikus réteg, valamint a bump alatti fémezés sérül/beoldódik a kötésbe.

Az ábrán megfigyelhető, hogy a bump ellenállása folyamatosan kis mértékben nő az első fázisban is a terhelés hatására (a disszipálódó teljesítmény gyorsítja a diffúziós folyamatokat, az IML növekszik), azonban a második fázisban az ellenállásnövekedés jóval nagyobb (exponenciális) mértékű, az EM itt már jelentős károsodást okoz a kötésben. Egy korábbi munkájukban réz csatlakozásokat vizsgálva más eredményre jutottak az anyag más jellegű viselkedéséből fakadóan: ott a terhelést követően nem volt mérhető az első fázis.

## 4.5 Ólommentes forraszkötések nyírási szilárdsága

A nyírási letolási erő mérésével a kötési szilárdságról kaphatunk információt. Számos irodalmi példa foglalkozik a nyírási szilárdsággal. J. Webster, J. Pan és B. J. Toleno cikkében [19] különböző SMD ellenállásokon végzett nyírási tesztek, SAC305-ös ötvözetet méretenként 28 darab ellenállás esetében használtak. A különlegessége a vizsgálatuknak az volt, hogy elvégezték közvetlenül beforrasztás után, valamint termikus

sokkok után is.  $-40\text{ °C}$ -ról  $125\text{ °C}$ -ra hevítették az ellenállásokat, mindezt 500 alkalommal (ciklusonként 1 óra alatt). Ez a gyorsított élettartam vizsgálat vélhetően jobban megterheli az ellenállásokat, mint akár 3000 óra konstans emelt hőmérséklet (a kötések jobban sérülnek a többszörös tágulás miatt). Az kísérlet eredményét a 4-2. táblázat foglalja össze.

4-2. táblázat - Nyírási szilárdság termikus sokk előtt és után [19]

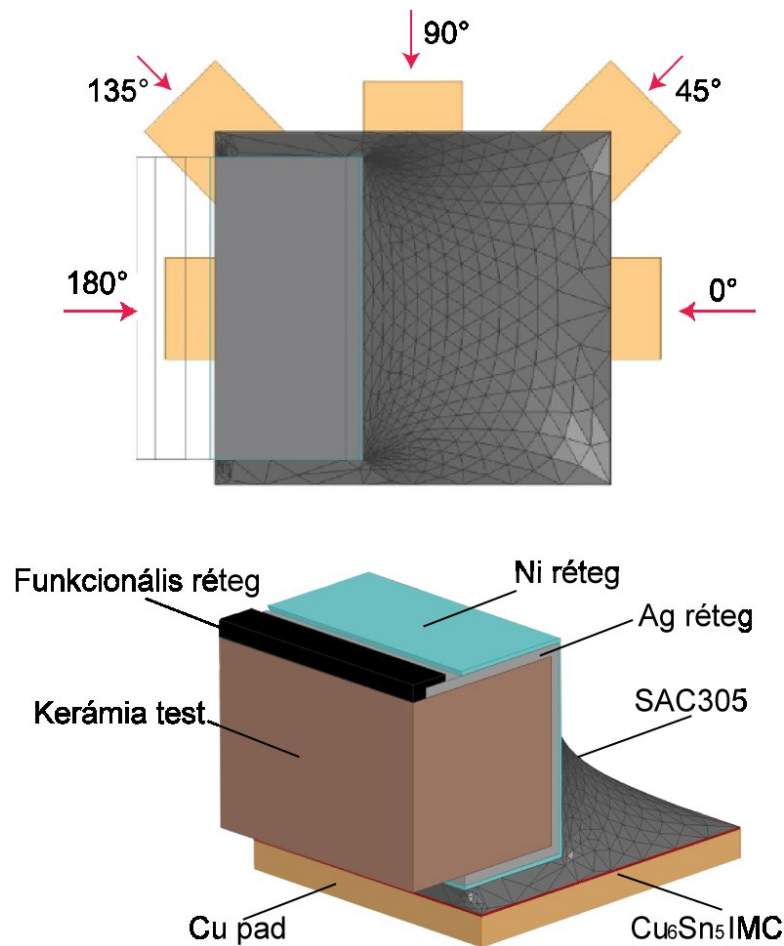
Forrasztóvíz	Alkatrész méret	Termikus sokk előtt [N]	Termikus sokk után [N]	Szilárdság veszteség
SAC305	0402	15,2	11,54	0,759
SAC305	0603	32,61	18,09	0,555

A fenti értékeken látható, hogy a termikus ciklusok után jelentősen, 0402-es méret esetén közel 25%-kal, 0603-as esetben közel 45%-kal csökkent a kötések nyírási szilárdsága.

## 5 Korábbi szimulációs eredmények

Kovács András egy korábbi, a tanszéken végzett munkájában [6] Surface Evolver segítségével létrehozott 3D-s geometrián, véges elem módszerrel szimulációkat végzett, kisméretű (0603, 0402, 0201) SMD alkatrészek ólommentes SAC305 ( $\text{Sn}_{96.6}\text{Ag}_{3.0}\text{Cu}_{0.5}$ ) forrasszal történő forrasztásának esetére. Ilyen kisméretű alkatrészek esetében már maga az alkatrész kivezetésének felülete olyan kicsi, hogy az áramsűrűség kritikus értékeket érhet el még a vezeték számára szabványos áramterhelés esetén is.

Dolgozatában az 5-1. ábrán szereplő, különböző padról való vezeték kivezetési elrendezéseket vizsgálta. Az ábrán alul levő geometriával illetve rétegstruktúrával készült a szimuláció.



5-1. ábra – A különböző vezeték becsatlakozások (felül) valamint a komplett szimulációs struktúra (alul) [6]

Munkája során kimutatta, hogy a legnagyobb áramsűrűség azokban az esetekben jöhet létre, ahol a pad-ról a vezeték kivezetés derékszöget (3) vagy pedig 135°-os szöget

(4) zár be, a szimuláció eredményei alapján ebben a két elrendezésben alakulnak ki leginkább kritikus értékű áramsűrűségek a forraszkötés térfogatának azon részeiben, ahol sarokhatás érvényesül az áram útjában. A 5-1. táblázat tartalmazza a 0201-es alkatrész esetén felhasznált vizsgálati áram nagyságát és a vezető szélességét.

5-1. táblázat - DC vizsgálati paraméterek 0201 méretkódhoz az IPC-2221 szabványnak megfelelően [6]

gerjesztés	200 mA	380 mA	500 mA	1000 mA
vezető szélesség	0,1mm	0,1mm	0,134mm	0,32mm
fellépő áramsűrűség	nem kritikus	nem egyértelműen kritikus	3-mas és 4-es elrendezésnél kritikus	kritikus

A táblázatban szereplő kritikus érték legalább  $5 \times 10^7$  A/m<sup>2</sup> áramsűrűség értéket jelent.

A 0201-es méretkódú alkatrész mintájára a szimulációkat mind a 0402, mind a 0603-mas alkatrészre a 90°-os és 135°-os elrendezésre végezte el. Az alábbi 5-2-es és 5-3-as számú táblázatok értékei szerint:

5-2. táblázat – DC vizsgálati paraméterek 0402 méretkódhoz az IPC-2221 szabványnak megfelelően [6]

gerjesztés	380 mA	1200 mA	1630 mA
vezető szélesség	0,1 mm	0,4 mm	0,6 mm
fellépő áramsűrűség	kritikus	kritikus	kritikus

5-3. táblázat – DC vizsgálati paraméterek 0603 méretkódhoz az IPC-2221 szabványnak megfelelően [6]

gerjesztés	380 mA	1500 mA	1960 mA
vezető szélesség	0,1 mm	0,54 mm	0,75 mm
fellépő áramsűrűség	nem kritikus	nem egyértelműen kritikus	kritikus

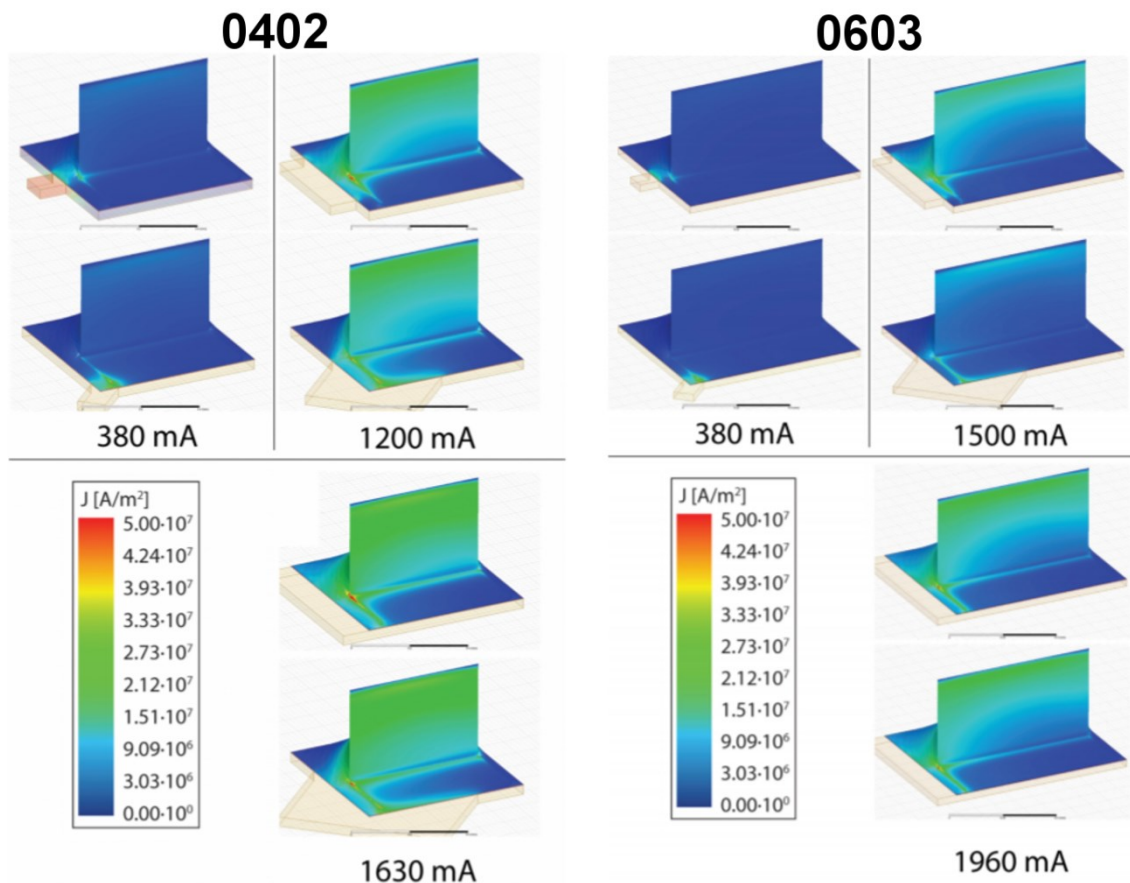
Mindhárom alkatrész esetében egyező volt, hogy mely elrendezés esetén jelent meg a legnagyobb áramsűrűség. Az alkatrész és forraszpad méretének növekedésével

azonban a 0603-mas alkatrésznél az elektromigráció hatása kevésbé volt jelentős a szimuláció során.

Munkám során egy olyan tesztáramkört fogok megalkotni, amivel vizsgálhatjuk majd különböző alkatrészek esetében is, hogy a valóságban is jelentkezik-e az EM.

Az áramköri tervhez a táblázatok (0603-mas és 0402-es alkatrészekhez) középső oszlopainak értékeit választottam, így a vezeték szélessége is ezek alapján került megválasztásra. Az 5-2. ábrán láthatóak a munkában szereplő szimulációs vizsgálatok eredményei a későbbiekben tesztelendő alkatrészekre.

Az ábrán látható kritikus sávok a becsatlakozó vezetékből érkező áram (forrás) és az alkatrész funkcionális ellenállás rétege (nyelő) közötti sarokhatás miatt jön létre. Ezt kell vizsgálnom tényleges, terhelt alkatrészek forraszkötésein.



5-2. ábra - a 0402-es alkatrészhez (bal oldalt) illetve a 0603-mas alkatrészhez készült szimulációs eredmények, áramsűrűsödési pontok, 90°-os illetve 135°-os vezeték csatlakozással [6]

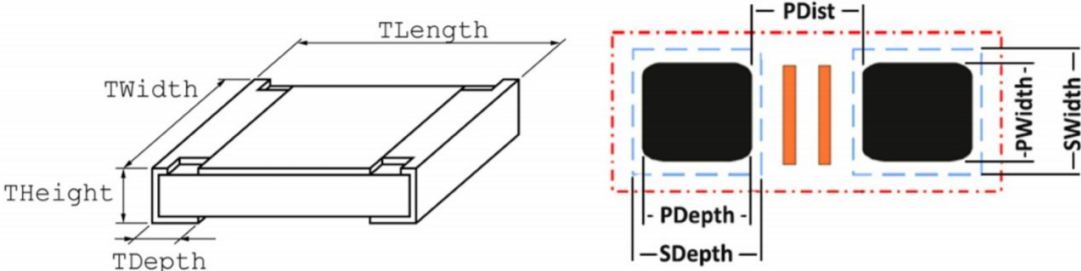


## 6 Verifikációs kísérletterv

### 6.1 Kiindulási paraméterek

Az áramkör tervezéséhez használt paraméterek nagyrészt egyeznek Kovács András diplomatervében szimulált vizsgálatokkal. Ezeket a 6-1. táblázat foglalja össze:

6-1. táblázat – A vizsgálat során használt nyomtatott huzalozású lemez paraméterei [6]

Tulajdonságok	0603 SMD forrasz	0402 SMD forrasz	0201 SMD forrasz
Cu pad vastagsága	35 $\mu\text{m}$ (0,035 mm)	35 $\mu\text{m}$ (0,035 mm)	35 $\mu\text{m}$ (0,035 mm)
Cu pad méretei PWidth $\times$ PDepth	0,9 $\times$ 0,75 [mm]	0,6 $\times$ 0,6 [mm]	0,35 $\times$ 0,4 [mm]
Kontaktusfelület méretei: TWidth $\times$ THeight $\times$ TDepth	0,8 $\times$ 0,45 $\times$ 0,3 [mm]	0,5 $\times$ 0,35 $\times$ 0,25 [mm]	0,3 $\times$ 0,25 $\times$ 0,15 [mm]
Stencil apertúra méretei SWidth $\times$ SHeight $\times$ SDepth	1,28 $\times$ 0,125 $\times$ 1,11 [mm]	0,767 $\times$ 0,125 $\times$ 0,767 [mm]	0,6 $\times$ 0,09 $\times$ 0,55 [mm]
			
$PDepth = TDepth + THeight$ $PWidth = TWidth + 100 \mu\text{m} \text{ (0201 esetében } 50 \mu\text{m)}$ $PDist = TLength - 2 \times TDepth$			

Az egyetlen különbség a stencilfólia vastagságában van, mivel a költséghatékonyság érdekében több projekt került megvalósításra egy stencilfóliával, aminek vastagsága 125  $\mu\text{m}$ .

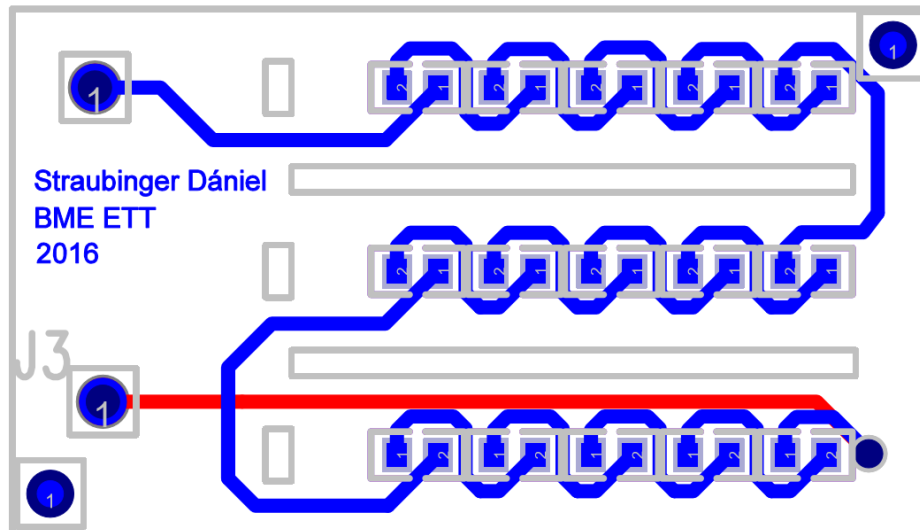
A táblázatban kiszámolt értékek az utolsó két sor ábrái alapján kerültek meghatározásra korábbi munkák során [6]. A vékonyabb stencil miatt a pad felületét az

oldalak méretarányának megtartásával növeltem úgy, hogy a felvitt forraszpaszta térfogata az eredetihez képest változatlan maradjon.

## 6.2 Áramköri terv

A verifikációhoz készült áramköri tervet a Mentor Graphics PADS szoftverében készítettem el, ami tanszéki keretek között is rendelkezésre áll. A panel fizikai méreteinek és az alkatrészek számának meghatározásában illetve elhelyezésükben szerepet játszott, hogy a keresztmetszeti csiszolat elkészítéséhez automata polírozó géppel kezelhető legnagyobb kiöntőforma 40 mm átmérőjű.

A paramétereket a nagyobb méretű (0603-mas méretkódú) nulla ohmos jumper ellenállások és a vezető szélesség (0,54 mm) alapján egy áramkörre 15 darab ellenállást helyeztem el három sorba. A kivezetéseket az ellenállások mentén két oldalról ugyanúgy alakítottam ki, így egyik oldalon öt darab 90°-os becsatlakozású, a másikon pedig szintén öt darab 135°-os becsatlakozás. Az ellenállások a sorok közötti kivágásoktól (ezeknek funkciója, hogy az áramkör egyszerűen darabolható legyen a későbbi csiszolatok készítéséhez) és a lemez szélétől is egyforma távolságra kerültek elhelyezésre, így egyszerre kereszt-csiszolhatóak a különböző kivezetésű oldalak optikai vizsgálatok előkészítésére. A csiszolatokat úgy lehet egyszerre öt alkatrésze elkészíteni, hogy a 6-1. ábrán látható kritikus sávokon csiszoljuk a panelt. Az áramkörök két típusú (0402, 0603) alkatrészhez készültek, azonos elvek mentén. A 0201 alkatrészekkel rendelkező panel megtervezésére és elkészítésére azért nem került sor, mert nem volt olyan precizitású berendezés, amivel ismételhetően, kis pozícióhibával lehetett volna az alkatrészeket beültetni. A munka menete a következő volt: először a PADS Logic programjában megszerkesztettem a sematikus tervet, ami tartalmazta az ellenállásokat és a közöttük levő huzalozást, valamint a két csatlakozó tuskét, aminek segítségével áramforrást kapcsolhatunk majd az áramkörökre. Ezután elhelyeztem a footprinteket, végül a huzalozással zárult a munka. A 0603-mas alkatrész elkészült layout-ja a 6-1. ábrán látható.



6-1. ábra - a 0603-mas méretkódú alkatrészekhez készült layout (kék: TOP; piros: BOTTOM rétegek)

A minimális távolságot a footprintek és vezetékek között a tanszéki keretek között rendelkezésre álló 8 mil-es rajzolatfinomsághoz alkalmazkodva, ennél kicsivel nagyobbra választottam. A technológia szórása miatt a forrasztásgátló maszkot a 200  $\mu\text{m}$ -rel túlméreteztem, hogy biztosan ne lógjon rá a padre. A minél pontosabb elhelyezés és a szimulációnak való maximális megfelelés érdekében az ellenállások automata beültetőgéppel kerülnek beültetésre a későbbiekben. Az áramkör bal alsó és jobb felső sarkába egy-egy fiduciális jelet helyeztem el.

Az általam elkészített nyomtatott huzalozású lemez alkalmas lehet egyéb projektek megvalósításához is, mivel készült hozzá stencil, így sokkal jobb minőségű forrasztás lehetséges, mint néhány korábbi teszthez használt papír stencil esetében. Ilyen különböző felhasználások lehetnek például forrasztott kötések ellenállásának mérése, áramterhelhetőség vizsgálata, a forrasztás után kialakuló intermetallikus réteg paramétereinek vizsgálata vagy nyírási szilárdság mérése a már beforgasztott ellenállások esetében.

Nulla Ohm értékű jumper-ellenállások esetében a panel daisy-chain ellenállásmérésekre is alkalmas lehet.

### 6.2.1 Alkatrészek kiválasztása

Az áramkörhöz rendelt alkatrészek méretre megegyeznek a szimulációban használt mérettel (katalógus adatlapok alapján, kicsi méretkülönbségek vannak az azonos méretkódú alkatrészek között is azonos méretkódon belül), 0  $\Omega$  névértékűek. Mivel a

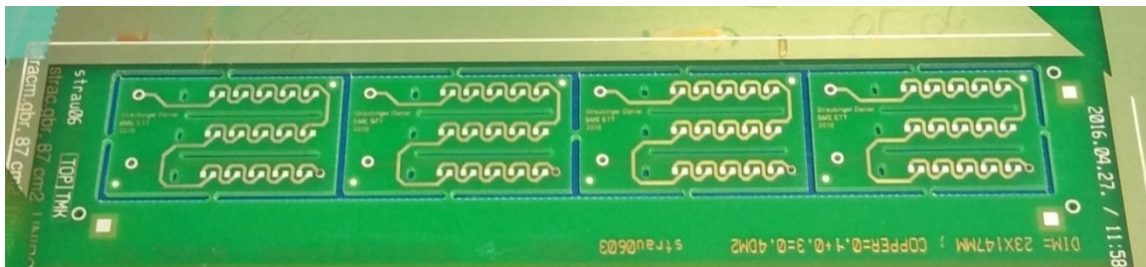
vizsgálat során a forrasztott kötéseket vizsgáljuk, illetve a hőmérséklet, mint paraméter nagyon meghatározó a folyamat szempontjából, ezért fontos, hogy az alkatrészen a lehető legkevesebb hő disszipálódjon (a lehető legkevésbé emelje a lokális hőmérsékletet). Az emelt környezeti hőmérséklet kemencével biztosítható. Mind a 0603 és a 0402-es méretkódú ellenállás Yageo típusú vastagréteg ellenállások, a 0402-es 62.5 mW, a 0603-as pedig 100 mW terhelhetőségű, ugyanolyan termékcsaládból származnak. Az ellenállásokat feltekercselt szalagtár formájában szállították le, így beültetőgéppel való kezelése egyszerűen zajlott.

## 7 Kísérleti elrendezés előkészítése

### 7.1 Tesztáramkörök legyártása

#### 7.1.1 Nyomtatott huzalozású lemez

A kísérletben használt nyomtatott huzalozású lemezeket a BME Elektronikai Technológia Tanszéken gyártották. Kétféle áramkör készült: mindkettő 4x1-es montírban tartalmazta az áramköröket, az egyikre 0402-es, a másikra 0603-as ellenállások kerültek beültetésre a későbbiekben. A 7-1. ábrán látható egy elkészült nyomtatott huzalozású lemezekből álló montír.



7-1. ábra – A 0603-as ellenállásokhoz készült nyomtatott huzalozású lemezek

Maga a hordozó FR4-es alapanyagból készült (1,5 mm vastag lemezre), ennek előállítására olcsó és gyors. A padok immerziós ezüst bevonatot kaptak, ami a szimulációs vizsgálatokban is szerepelt. Az áramköröket optikai mikroszkóppal ellenőriztem, és nem találtam a meghatározottól kiugró értéket a padok fizikai méreteiben.

#### 7.1.2 Stencilnyomtatás

A nyomtatáshoz használt rozsdamentes acél, lézerrel vágott stencilt az ASM Assembly Systems Magyarország Kft. készítette el. A stencilfólia vastagsága 130  $\mu\text{m}$ . A stencilnyomtatáshoz használt apertúra a forrasztási pad méretéhez képest redukált méretű volt (0402-es esetben: 0,54x0,54 mm; 0603-as esetében: 0.675x0.81 mm). Ez az elektronikai technológiában széles körben alkalmazott irányelv felületszerelt alkatrészekhez.



7-2. ábra – Stencilfólia egy VectorGuard feszítő keretben

A stencilfóliát a 7-2. ábrán látható speciális VectorGuard feszítő kerettel használtam. A nyomtatást az 7-3. ábrán látható DEK 248 típusú stencilnyomtató berendezés segítségével végeztem, ólommentes SAC305 forraszpasztát használva.



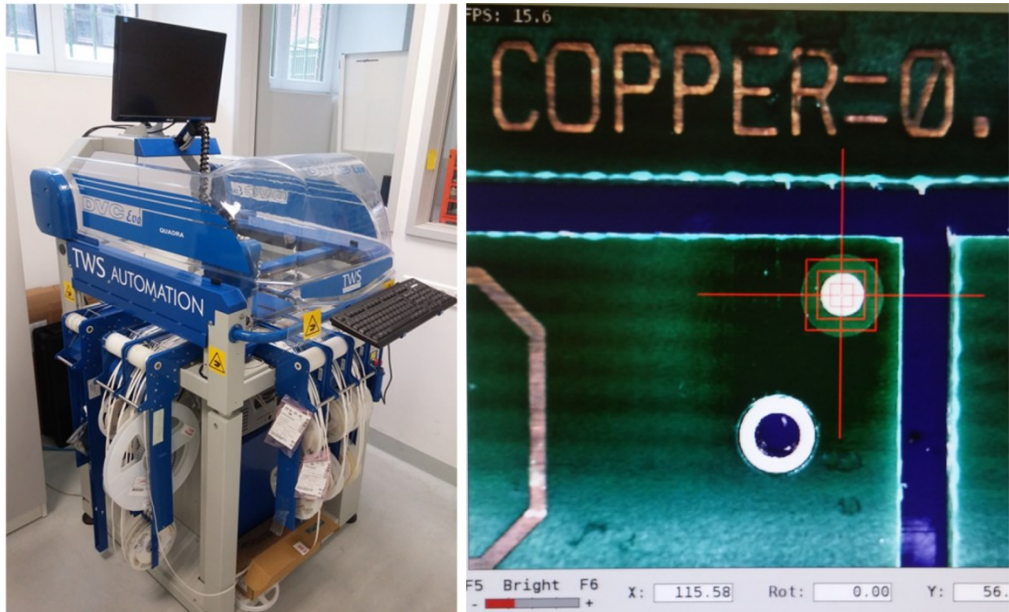
7-3. ábra – DEK 248 típusú stencilnyomtató berendezés [20]

A nyomtatás után optikai mikroszkóppal ellenőriztem a nyomtatás minőségét. A nyomtatás során nem adódtak problémák, a nyomtatás megfelelő minőségű lett, nem lett sehol sem hiányos a pasztalenyomat.

### 7.1.3 Alkatrészek beültetése

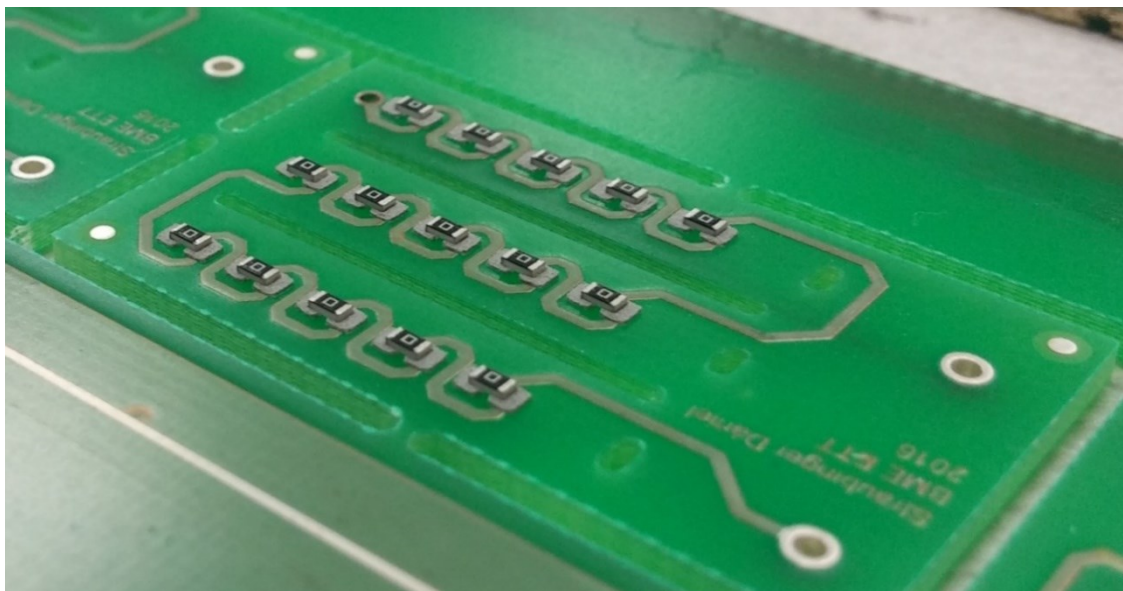
A jobb beültetési pontosság miatt az áramkörökre egy DVC Quadra Evo automata beültetőgéppel végeztem az alkatrészek beültetését. A gép számára szükséges volt

betanítani manuálisan a két különböző panelen levő alkatrészek, illetve a tervezéskor elhelyezett fiduciális jelek pozícióját. A 7-4. ábrán látható maga a beültetőgép bal oldalon, jobb oldalon pedig egy fiduciális jel betanítása.



7-4. ábra – DVC Quadra Evo beültetőgép és felhasználói felülete

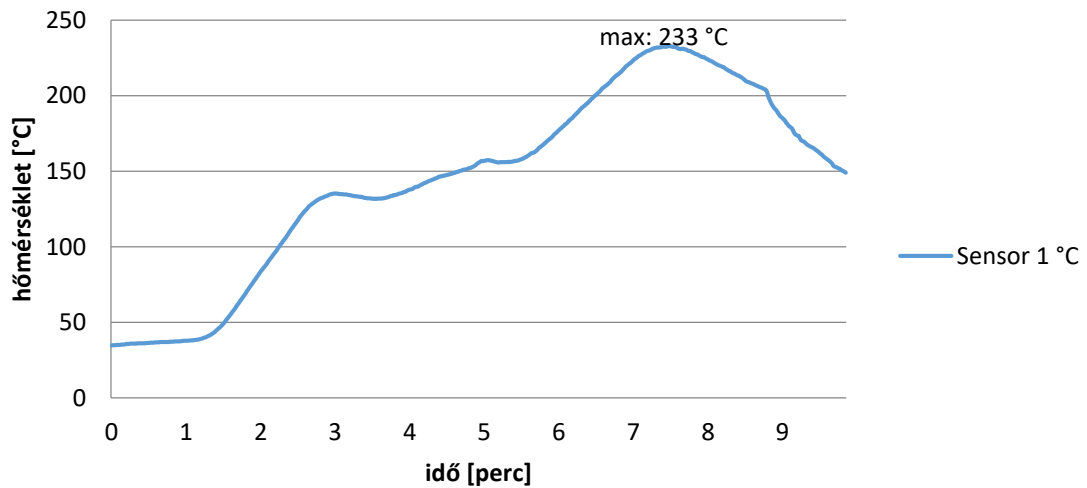
A kísérlethez használt Yageo ellenállásokat tekercsen vásároltuk (1000 db-ot), így felfűzve a beültetőgépre azonnal használható volt. A 7-5. ábrán látható egy már beültetett (még nem beforrasztott) 0603-as panel látható.



7-5. ábra – A forrasztásra váró, már beültetett 0603-as panel

### 7.1.4 Újraömllesztéses forrasztás

Az áramkörök tálcás, infra fűtéses újraömlesztő kemencében kerültek beforrasztásra. Az előre beállított hőprofil V-MOLE hőprofilozó segítségével rögzítettem (a K típusú hőelemet a nyomtatott poliimid-kapton szalag segítségével az áramkörre helyezve). A csúcshőmérséklet a NYÁK-on a mérés szerint körülbelül 233 °C volt. A reflow forrasztáshoz alkalmazott hőprofil a 7-6. ábrán látható.



7-6. ábra – Az áramkörök beforrasztásához használt hőprofil



## 8 Terheléssel vizsgálat - kísérletterv

### 8.1 Mérési összeállítás, paraméterek

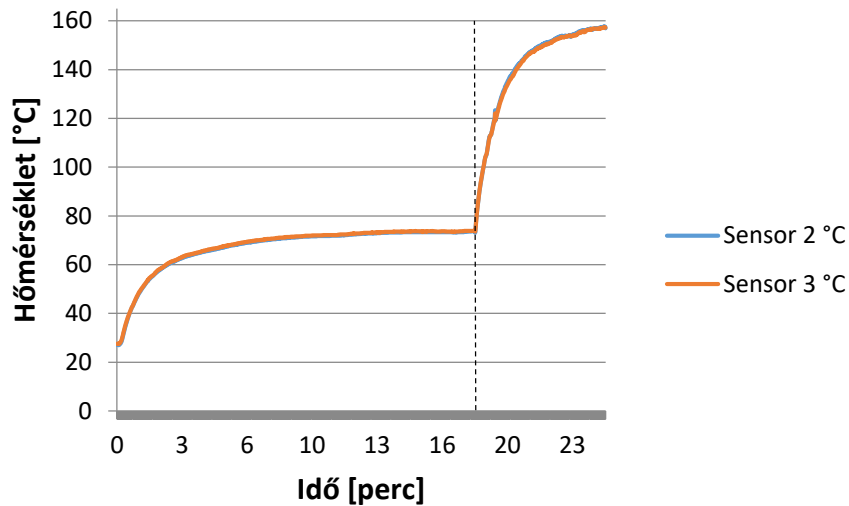
A különböző típusú alkatrészek terhelhetőségét a 8-1. táblázat foglalja össze. A CA eset az általánosan használt érték 8 mil-es, 35  $\mu\text{m}$  vastagságú réz vezeték esetére, a CB eset pedig a maximális terhelhetőség a 2221-es IPC szabvány szerint. A CC eset mindegyik alkatrész esetében túlterhelést jelent.

8-1. táblázat – A különböző minták áramterhelhetősége

Áram	0201	0402	0603
CA [mA]	380	380	380
CB [mA]	500	1000	1500
CC [mA]	1000	1500	2000

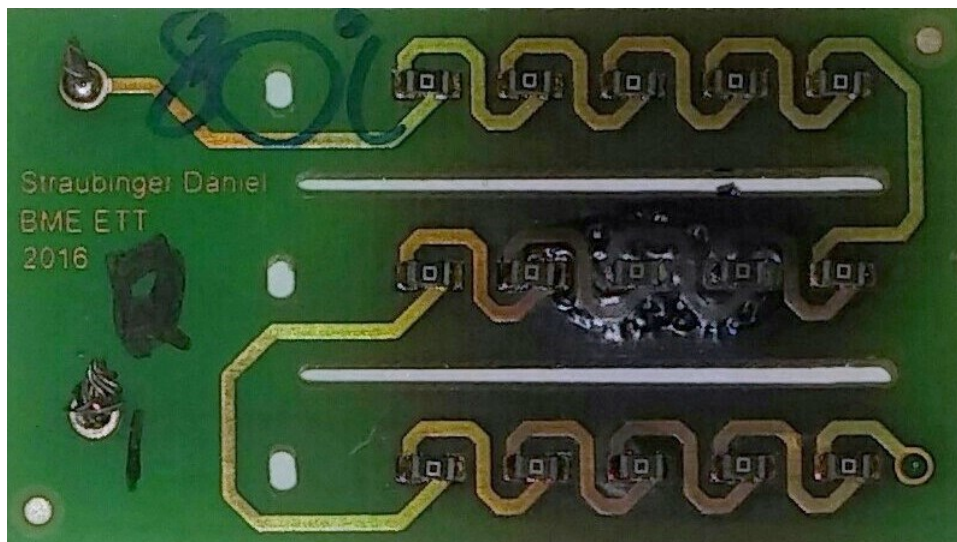
A kísérletben vizsgált áramköröket a CB esetben szereplő értékekkel, azaz a maximálisan megengedett áramerősséggel terheltem (azaz a 0402-es alkatrészeket  $\sim 1$  A-rel, 0603-asokat  $\sim 1,5$  A-rel). Az egy montírkeretben levő áramköröket (keretenként 4 darab) hőálló vezetékkel összeforrasztottam, majd a daisy chain láncot így helyeztem terhelés alá.

A folyamat gyorsítása érdekében emelt hőmérsékletű kemencébe helyeztem a mintákat, ahogy korábban az összes vonatkozó irodalomban is láttam. A mintákat  $80\text{ }^\circ\text{C}$ -os kemencébe helyeztem, azonban az ellenállásokon disszipálódó teljesítmény olyan lokális hőmérséklet megemelkedéshez vezetett, ami tönkretett bizonyos áramköröket. A terhelés felkapcsolása előtt hőelemeket helyeztem el a paneleken. Az alkalmazott K-típusú hőelemek ( $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$  hiba) V-MOLE adatgyűjtő eszközzel monitorozott értékeket egy panel közepén és a közvetlenül mellette levő ellenálláson mértem.



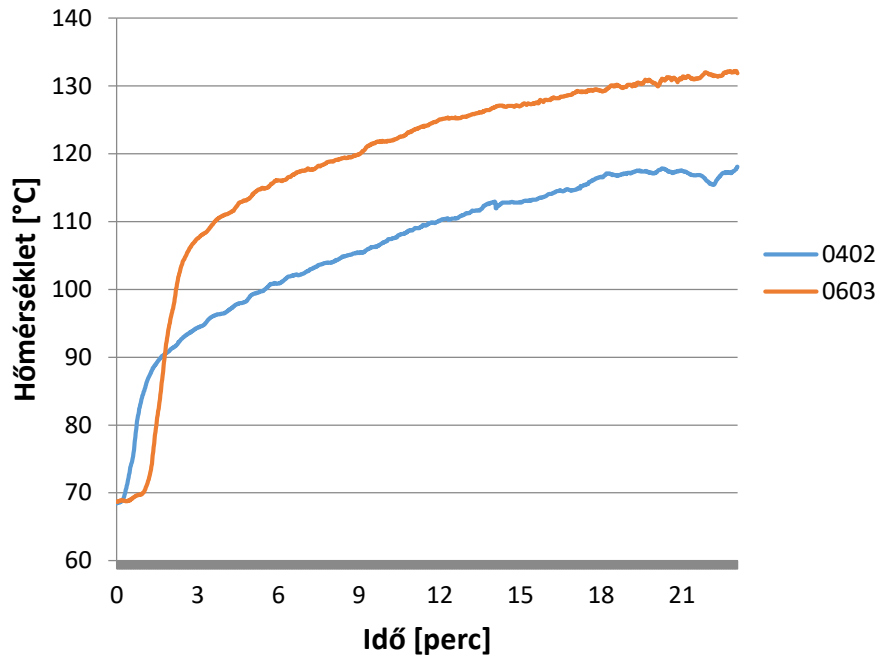
**8-1. ábra – 0603-as alkatrész ~80 °C hőmérsékletű kemencében**

A 8-1. ábrán látható, hogy az áramterhelés hatására (szaggatott vonallal jelölt időpillanat) az alkatrészek hőmérséklete körülbelül 80 °C hőmérsékletemelkedést szenvedett (így állandósult állapotban körülbelül 160 °C-os hőmérséklet alakult ki), ami elég volt ahhoz, hogy rövid időn belül károsodjanak áramkörök. Egy ilyen megrongálódott áramkör képe látható a 8-2. ábrán.



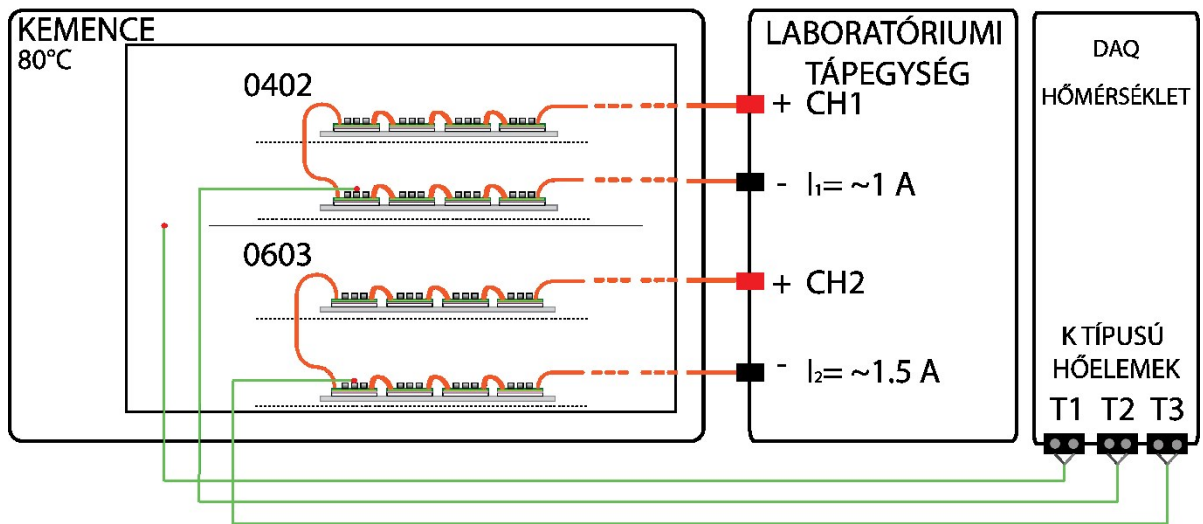
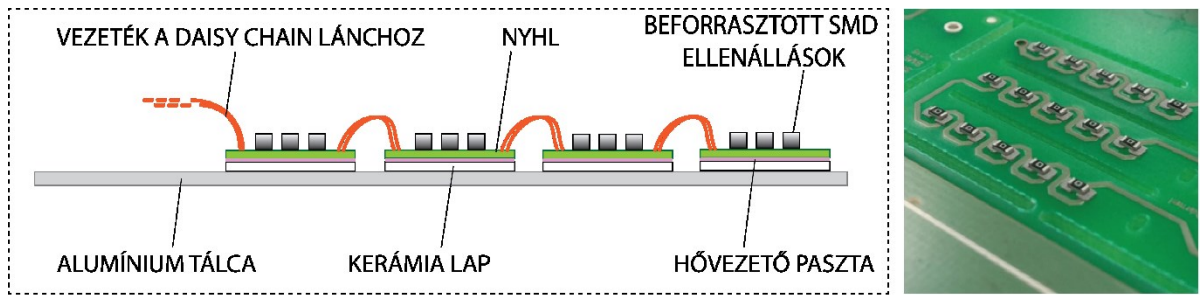
**8-2. ábra – Egy az egyik legelső áramkörökből, ami végleges károsodást szenvedett**

Ennek kiküszöbölésére a mérési összeállítást úgy módosítottam, hogy az áramkörök alá hővezető paszta felhasználásával kerámia (szigetelő) lapokat helyeztem, majd az egészet egy nagy alumínium tálcára helyeztem. Ezt a módosítást alkalmazva a 8-3. ábrán levő hőmérsékleteket mértem.



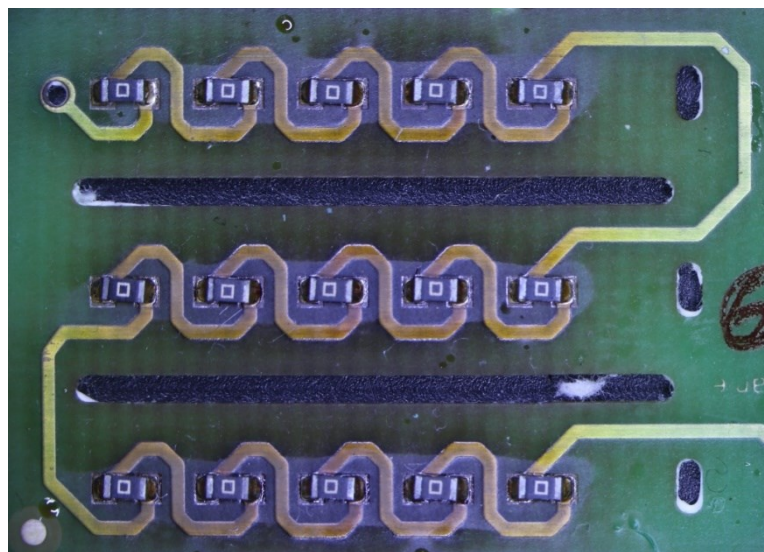
**8-3. ábra – A hőelvezetési megoldást is tartalmazó, végleges mérési összeállítás hőmérsékletének változása terhelés hatására**

A görbék alapján látható, hogy a 0603-as áramkörök esetén körülbelül 135 °C az állandósult állapot, ami a korábbi értékhez képest körülbelül 25-30 °C-os csökkenést jelent. A 0402-es áramkörök esetében az állandósult hőmérséklet körülbelül 120 °C. Ezzel az összeállítással sikerült visszaszorítani a disszipációból és a kemence hőmérsékletéből fakadó károsodást a hordozón. Az így módosított mérési összeállítás látható a 8-4. ábrán.



8-4. ábra – A végleges mérési összeállítás

Ennek az összeállításnak a használatával is megfigyelhető volt azonban bizonyos panelek színének megváltozása, illetve elfeketedése – ám szakadást nem produkált egyik áramkör sem, így az eredeti tervnek megfelelő teljes időskálán végig tudtam vizsgálni a terhelés hatását. Egy ~1500 óráig terhelt 0603-mas ellenállásokat tartalmazó panelről látható kép a 8-5. ábrán, ahol ez jól megfigyelhető.



8-5. ábra - Optikai mikroszkópos kép, 1500 óráig terhelt áramkorról

A teljes időskálát 3000 órára terveztem, majd lehetőségeimhez mért időpillanatokban kivettem paneleket a megfelelő minősítő vizsgálatokra.

### **8.1.1 Vizsgálati módszerek**

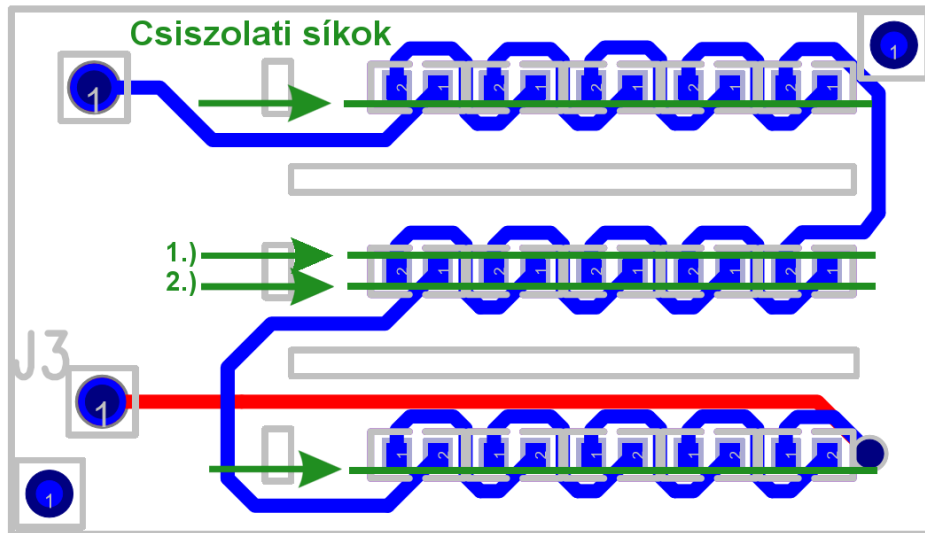
A különböző mintákat röntgen készülékkel vizsgáltam, keresztmetszeti csiszolatokat készítettem, amelyeket optikai mikroszkópiával és pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltam, valamint letolási vizsgálatokat is végeztem a nyírási szilárdság meghatározására. Áramköröket több időpontban vettem ki: körülbelül 150, 450, 600, 1500, 2000, 2750, ~3000 óra után is.

A minták optikai mikroszkópos vizsgálatához az Elektronikai Technológia Tanszéken levő Olympus BX51 típusú optikai mikroszkópot használtam. Ennél a mikroszkópnál a megvilágítás az objektíven keresztül történik, lehetőség van világos látóterű (brightfield, BF) és sötétlátóterű (darkfield, DF) (illetve köztes) üzemmódra is. A különböző módokban eltérő információtartalmú képek készíthetők. A tanszéken elérhető pásztázó elektronmikroszkóppal lehetőség van EDX (Energy Dispersive X-Ray Analysis, Energiadisziperzív spektroszkópia) vizsgálatokat végezni. Ennek lényege, hogy nagy energiájú elektronokkal történő gerjesztés hatására az anyag karakterisztikus röntgensugárzásának spektruma alapján meghatározható annak összetétele.

Ezután kellene alfejezet a keresztcsiszolás menetéről, és ide kell az irodalom alapján várt eredmények is.

### **8.1.2 Csiszolás menete, megfontolások**

A csiszolás megkezdése előtt meghatároztam, hogy milyen csiszolati síkot szeretnék vizsgálni. Az 8-6. ábrán láthatóak zöld színnel az általam meghatározott csiszolati síkok.



8-6. ábra – A vizsgált keresztmetszeti síkok

Az alábbiak szerint választottam: a felső és alsó sor esetén a 135°-os kivezetésű oldalról csiszoltam, az áram ebben az esetben folyott az alkatrész irányába. A 2.) számmal jelölt sík esetén az áramirány itt pont ellentétes, a 135°-os becsatlakozás esetén folyik kifelé. Azért ezeken a síkokat választottam, mert az 5. fejezetben ismertetett szimulációs eredmények alapján ezek az áramsűrűség szempontjából legkritikusabb zónák, így ezeken a helyeken nagyobb eséllyel lehetnek megfigyelhetők az EM okozta változások.

A minták csiszoláshoz való előkészítéséhez Technovit 4006, kétkomponensű akril kiöntőanyagot használtam. Ennek a szilárdulási ideje körülbelül 25 perc, 2 bar nyomáson. Ahogy a 6. fejezetben szerepel, már a tervezési megfontolásokkor figyelembe vettem a maximálisan polírozható méretet, ezek alapján lehetőségem volt egy panel 15 darab alkatrészét egy mintaként csiszolni. Ezen felül készítettem olyan, kisebb csiszolatokat is, ahol csak egy-egy sort öntöttem ki, és így a csiszolati síkot 5 darab alkatrészenként tudtam meghatározni.

A csiszolást a 8-7. ábrán is látható Knuth Rotor 3 típusú csiszológéppel, valamint az ATA Sapphire 520 automata polírozó berendezéssel végeztem.



**8-7. ábra – Struers Knuth Rotor 3 csiszológép (balra), ATA Saphir 520 polírozó (jobbra) [21]**

A keresztmetszeti csiszolatokat rendre 80, 240, 600, majd 1200-as csiszolópapírral való nedves csiszolással kezdtem (az előbb felsorolt számok jelentése, hogy 1 inch<sup>2</sup>-re hány szemcse esik). Az egyre finomabb papírok használata azért indokolt, hogy a durvább papírral okozott karcok a következő fázisban eltűnjenek. Az 1200-ast papírokat követően a mintákat befejezőképp, három lépcsőben (9 μm, 3 μm, 1 μm szuszpenzióval) ATA Saphir 520 automata polírozógép segítségével políroztam. A legelőször elkészült kiöntött minták közül látható egy darab a 8-8. ábrán.



**8-8. ábra – Akrillal kiöntött keresztmetszeti csiszolat**

A csiszolati síkot, illetve annak pozícióját az ellenálláshoz képest röntgen segítségével utólag ellenőrizni tudtam, valamint a csiszolás közben az aktuális felület és állapotot optikai mikroszkóp segítségével követtem.

A kísérletek során különböző időközönként kiszedett mintákról is készítettem keresztcsiszolatot. Az ezek alapján kapott eredményeket a későbbiekben ismertetem.

### 8.1.3 Irodalom alapján várható eredmények

Ahogy korábbi fejezetekben részletezésre került, az elektromigrációt azokon a helyeken figyelhetjük meg legnagyobb valószínűséggel, ahol az áramsűrűség (lokálisan) nagy. Az elektronok ütközése a folyamat hajtóereje, és ezek irányát az alkalmazott laboratóriumi tápegység bekötése biztosítja. Az anyagvándorlás (egyik oldalon voidosodás, másik oldalon a lerakódott anyag többlet) egyértelműen megfigyelhető volt különböző  $\mu$ BGA struktúrák tesztelésénél korábban [17]. Ezért a csiszolatok vizsgálatakor mindenképp érdemes figyelembe venni az anód és katód oldal elhelyezkedését. Erre egy jól látható példa a 4. fejezetben ismertetett, 4-1. ábrán keresztül bemutatott kísérlet. Az anyagtranszport folyamaton felül a 4.3 fejezetben ismertetett kísérlet alapján az áramterhelés hatására az anód oldalon nagymértékben növekedhet az intermetallikus réteg vastagsága. Továbbá a 4.4-es fejezetben ismertetett cikk alapján a EM folyamata két fázisra bontható, amelyekből az első fázisban az IML vastagodik, így ennek vizsgálatával mindenképp érdemes foglalkozni

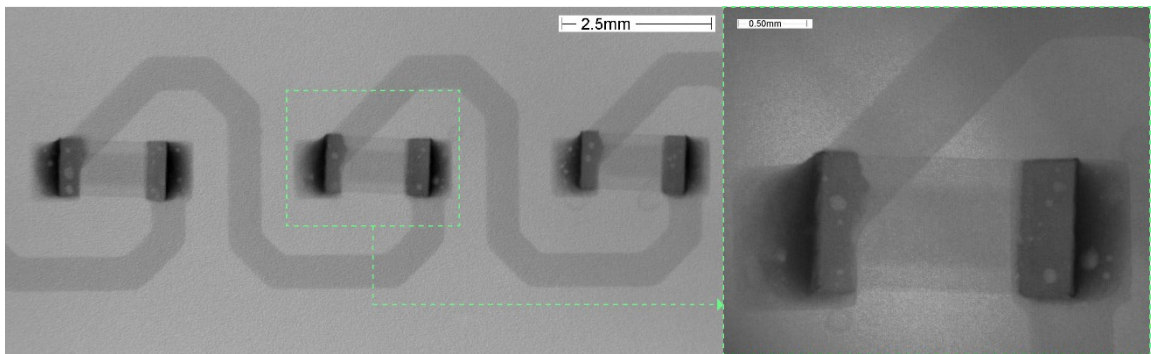
Az irodalmi források alapján várhatóan kialakuló void-méretnek kellően nagyok ahhoz, hogy optikai mikroszkóppal is vizsgálhatók legyenek.



## 9 Eredmények

### 9.1 Röntgen vizsgálat

A mintákról közvetlenül a beforrasztás után röntgenképeket készítettem, ezáltal roncsolásmentesen lehetőségem nyílt az esetleges elváltozások megfigyelésére. A terhelés lekapcsolása után újabb felvételeket készítettem, majd ezeken összehasonlítottam az eredeti, terhelésmentes állapotban készült képekkel. Az egyik leghosszabb terhelésen átesett 0603-as alkatrészeket tartalmazó mintáról készült röntgenfelvétel látható a 9-1. ábrán.



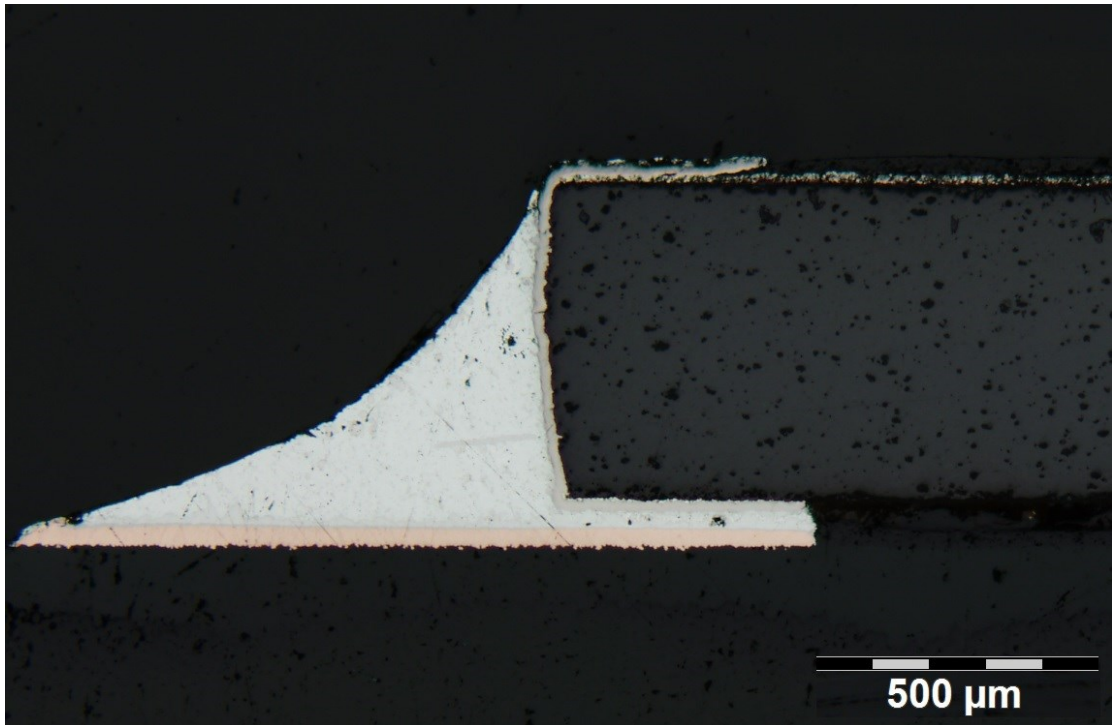
9-1. ábra – 0603-mas alkatrészek, ~3000 óra terhelés után

Az ezekről a mintákról készült felvételeken sem látható számottevő voidosodás. A képen látható voidok jellemzően forrasztáskor jönnek létre, és a terhelés előtti képeken is megtalálhatóak. Az áramkörökön röntgenfelvételek segítségével nem volt megállapítható egyértelmű változás. Később a voidokat a letolási vizsgálat után pásztázó elektronmikroszkópban is megvizsgáltam.

### 9.2 Keresztmetszeti csiszolatok

#### 9.2.1 A keresztmetszeti csiszolatok optikai mikroszkópos vizsgálata

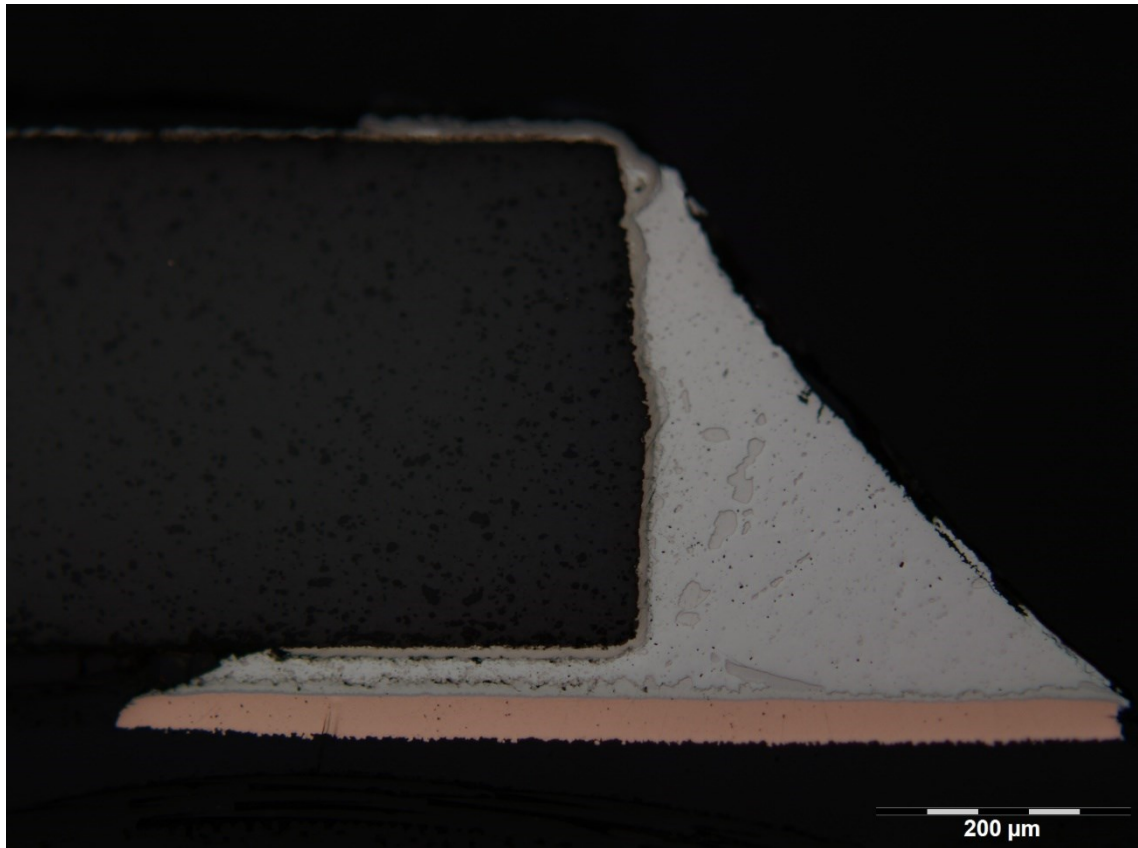
A jobb ábrázolhatóság miatt a 9-2. ábrán csak az egyik forraszkötés szerepel. Az ábrán akár voidnak is tűnhetnek a fekete pontok, azonban a mikroszkópon a brightfield (BF) helyett darkfield (DF) megvilágítási módot alkalmazva látszott, hogy ezek valójában a csiszolat felületi hibái, szennyeződés maradványok.



**9-2. ábra – 0402-es ellenállás keresztcsiszolata, körülbelül 600 óra terhelés után, 80°C-on, BF megvilágítással**

A minták közül néhányat tovább csiszoltam, így egy másik, belsőbb síkot is vizsgálhattam, de új eredményre nem vezetett.

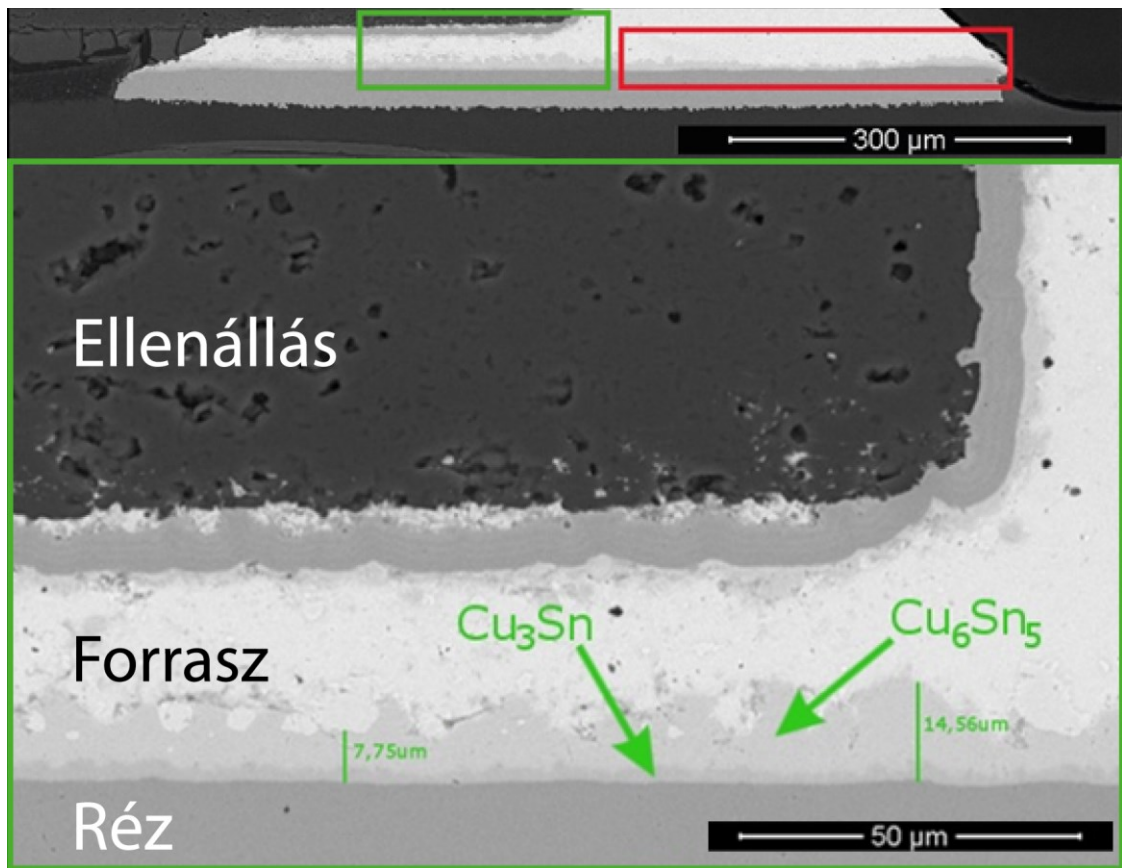
A minták keresztmetszeti csiszolat során nem találtam elektromigráció okozta void kialakulására. Egy érdekes jelenségre azonban felfigyeltem az egyik alkatrész vizsgálata közben. A 9-3. ábrán látható 0603-as ellenállásról készült kép esetében a vezetékcsatlakozás 135°-os. A képen jól megfigyelhető a nem elhanyagolható vastagságú intermetallikus réteg, aminek kialakulásában nagy szerepet játszhat a 660 órányi magas hőmérséklet.



9-3. ábra - Keresztmetszeti csiszolat 0603-as ellenállásról (~660 óra áramterhelés után), 135°-os vezeték becsatlakozással

A 9-3. ábrán látható intermetallikus rétegben az a különleges, hogy láthatóan a kép bal oldalán, ahol a vezeték csatlakozik, és nagyobb az áramsűrűség, a rétegvastagság sokkal nagyobb. Ez további vizsgálatokat érdemel, lehetséges ok lehet akár az is, hogy azon a lokális helyen a hőmérséklet magasabb a nagyobb áramsűrűség miatt. Ahhoz, hogy biztosan állítani lehessen, hogy az intermetallikus réteg, és nem pedig csiszolásból származó kenődés a mintát pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) is megvizsgáltam.

Az így készült kép látható a 9-4. ábrán. A készült felvételen jól elkülöníthetően megfigyelhetők a különböző intermetallikus vegyületek: közvetlenül a réz mellett  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ , felette a vastagabb  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  réteg.



9-4. ábra – Keresztmetszeti csiszolat 0603-as alkatrészről (~660 óra áramterhelés után), kiemelve az intermetallikus réteg megvastagodását. A zöld téglalapon belül levő régióban (kritikus pontban) 7-15  $\mu\text{m}$  között, míg a pirossal jelöltben 6-10  $\mu\text{m}$  között változik.

Az ábrán látható, hogy az ellenállás kritikus részén 7-15  $\mu\text{m}$  Ezzel szemben pirossal bekeretezett részen az vastagság körülbelül 6-10  $\mu\text{m}$  között változik.

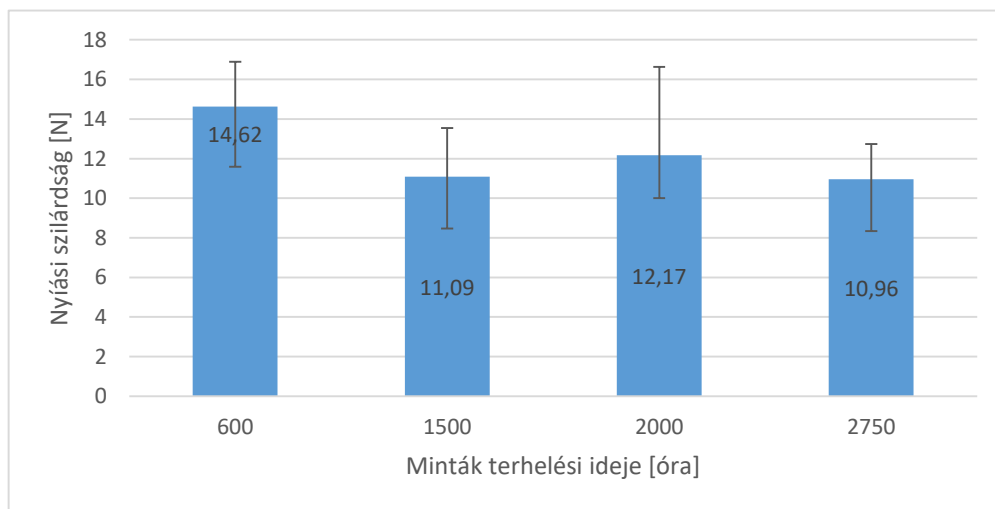
Az intermetallikus réteg minden forrasztott kötés esetében jelen van, ez a kötés legtörekenyebb része. Ideális vastagsága 1-5  $\mu\text{m}$  közötti. A megnövekedett rétegvastagság a kötési szilárdság csökkenésével jár együtt. A fenti képeken látható eltérő vastagságú intermetallikus réteg kialakulásának oka hasonló lehet, mint Y.C. Chan, D. Yang 4.5. pontban tárgyalt cikkében [18], azonban az ő módszerükhöz képest a vizsgálataim során kialakult áramsűrűség érték körülbelül egy nagyságrenddel kisebb. Az általam alkalmazott hosszú terhelési idők viszont ezeket a paramétereket ellenpontozhatják. A talált jelenség modelljének pontos felállítására természetesen további vizsgálatok szükségesek.

## 9.3 Letolási vizsgálatok, nyírási szilárdság

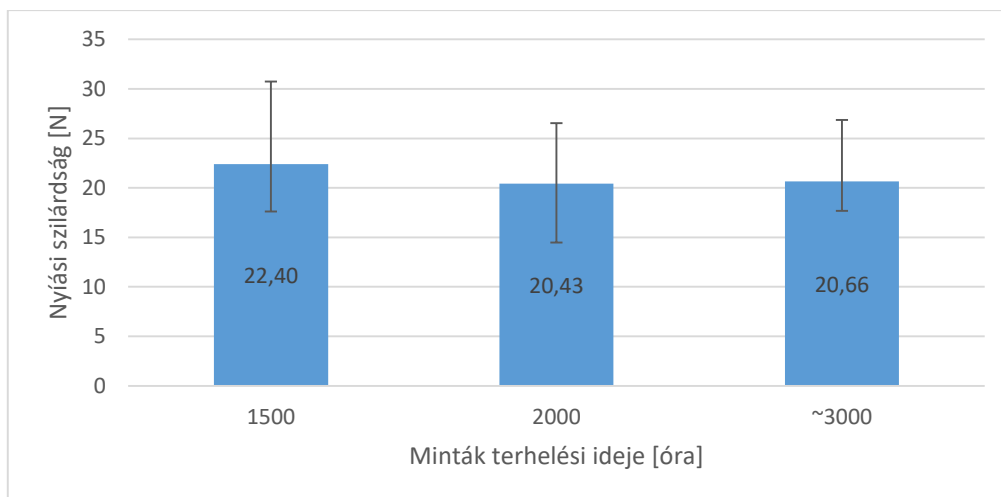
### 9.3.1 Nyírási szilárdság értékek

Összesen 92 darab ellenálláson végeztem letolási vizsgálatokat, Dage BT2400 eszközzel. A minták eltérő terhelési idővel rendelkeztek. A mintákat a méretkódok, valamint a terhelési idők szerint csoportosított. Több esetben, különösképpen a 0603-as és hosszú idejű mintáknál az FR4 lemez már annyira károsodott, hogy a rézfelület vált fel, és nem a forraszkötés törött el. Ez is bizonyítja azt, hogy a kísérleti paraméterek, még a kerámialapos hőelvezetési megoldás ellenére is szélsőséges terhelési tartományban mozognak. A következőkben látható grafikonokon szereplő átlagos adatokba csak azokkal az ellenállásokkal kalkuláltam, ahol nem vált el a rézfelület az FR4-es lemezről, ugyanis csak ezek szolgáltatnak valós információt a forraszkötések nyírási szilárdságáról. A 0603-as mérések esetében a 600 órás vizsgálatok során sajnos a sok felválás miatt nem tudtam releváns átlagértéket és terjedelmet kimutatni. Az, hogy ez a vizsgálati probléma a legrövidebb időnél jelentkezett, valószínű a szerelőlemez minőségi szórásából fakad.

Az alábbi két 9-5. és 9-6. ábrán levő grafikonok foglalják össze a 0603-mas és 0402-es alkatrészek letolásával mért nyírási szilárdság értékeket. A grafikonokon feltüntetett számértékek az átlagos nyírási szilárdság értékek, valamint oszloponként a mért értékek min-max terjedelme látható.



9-5. ábra – 0402-es minták nyírási szilárdságának átlaga, terjedelemmel



9-6. ábra – 0603-as áramkörök nyírási szilárdságának átlaga, terjedelemmel

Az általam kapott átlagos nyírási szilárdság értékeket összehasonlítottam a 4.5-ös fejezetben ismertetett kutatásban szereplő értékekkel (0402: 15,2 N, 0603: 32,61 N), ezeket az alábbi, 9-1. táblázatban látható.

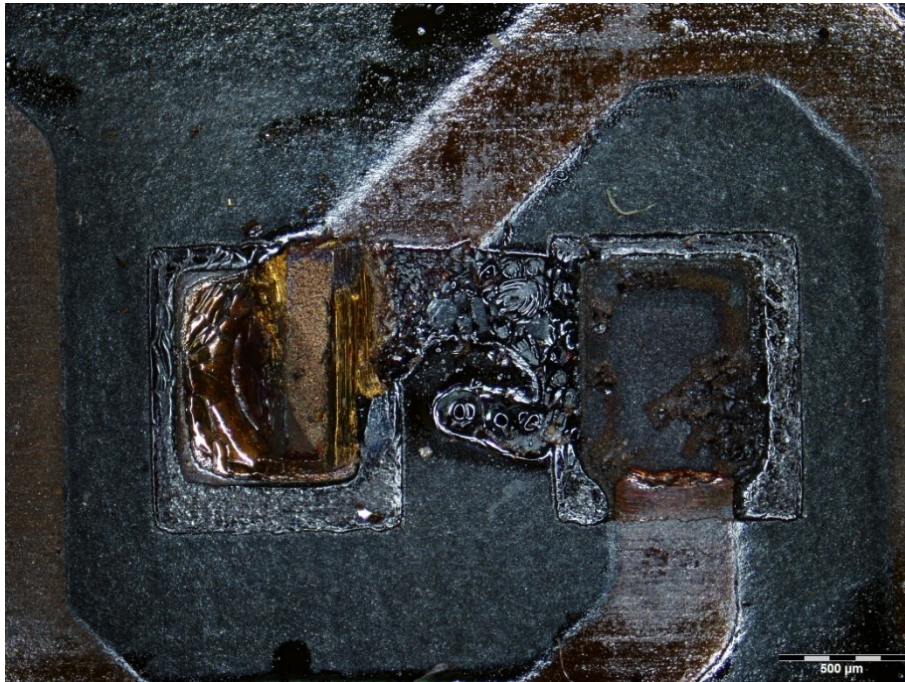
9-1. táblázat - Forraszkötések nyírási szilárdságainak relatív vesztesége

0402	Terhelési idő:	600 óra	1500 óra	2000 óra	2750 óra	ReferenciaHiba ! A hivatkozási forrás nem található.
	Szilárdság veszteség:	0,962	0,73	0,801	0,721	0,759
0603	Terhelési idő		1500 óra	2000 óra	~3000 óra	
	Szilárdság veszteség:		0,687	0,626	0,6335	0,555

Látható, hogy a 600 órás minta esetében a szilárdság veszteség még nem egyértelmű. 1500 óra terhelés felett szintén nem csökkent a nyírási szilárdság egyértelmű mértékben, azonban a kiindulási értékhez képest így is jelentősen: tehát valamikor a 600 és 1500 óra közötti időszámban szenvedték el ezt a minták. A 0402-es mintákon a csökkenés kisebb mértékű, ez valószínűsíthetően leginkább a kisebb lokális hőmérsékletnek tudható be. A hosszabb tesztelési idejű áramkörök esetében az általam mért értékek hasonlóak a termikus sokk után mért eredményekhez, azonban közvetlen összehasonlítás nem lehetséges a vizsgálatok között.

### 9.3.2 Optikai mikroszkópia a letolt mintákon

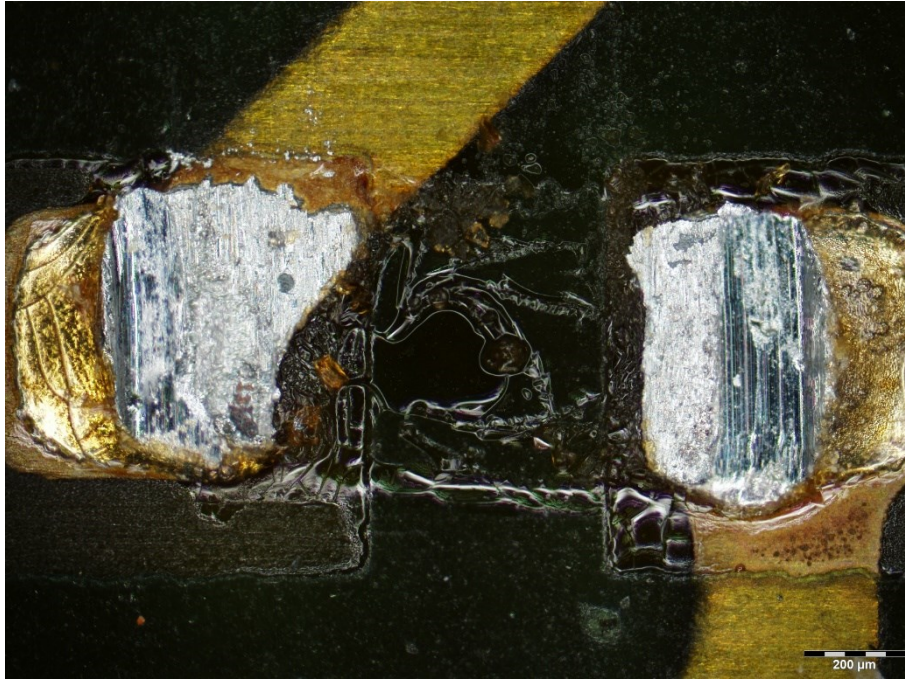
Néhány áramkört közvetlenül a letolás után optikai mikroszkóp segítségével is megvizsgáltam. A 9-7. ábrán látható képen egy 0603-as ellenállás volt beültetve. Az alkatrész körülbelül ~3000 órás terhelésen esett át. A képen megfigyelhető mind az FR4 sérülése, illetve az ebből fakadó réz pad felszakadása.



9-7. ábra - 0603-as ellenállás footprintje, ~3000 óra terhelés, nyírési teszt után

A rendkívül hosszú tesztidő ellenére a letolt ellenállások közül viszonylag kevés esetben volt a az FR4 degradációja az ok a nyírásnál bekövetkező elválásoknál. Legtöbb esetben a forraszkötés törött el, illetve az alkatrész kerámia tömbjéről vált le a fémezés. Ennek megállapítására SEM-mel történő vizsgálat bizonyult a legjobb módszernek, nikkkel jelenlétét keresve.

A 9-8. ábrán látható egy több mint 2000 órás terhelésen átesett 0402-es ellenállás. Itt a forrasanyag törött el.



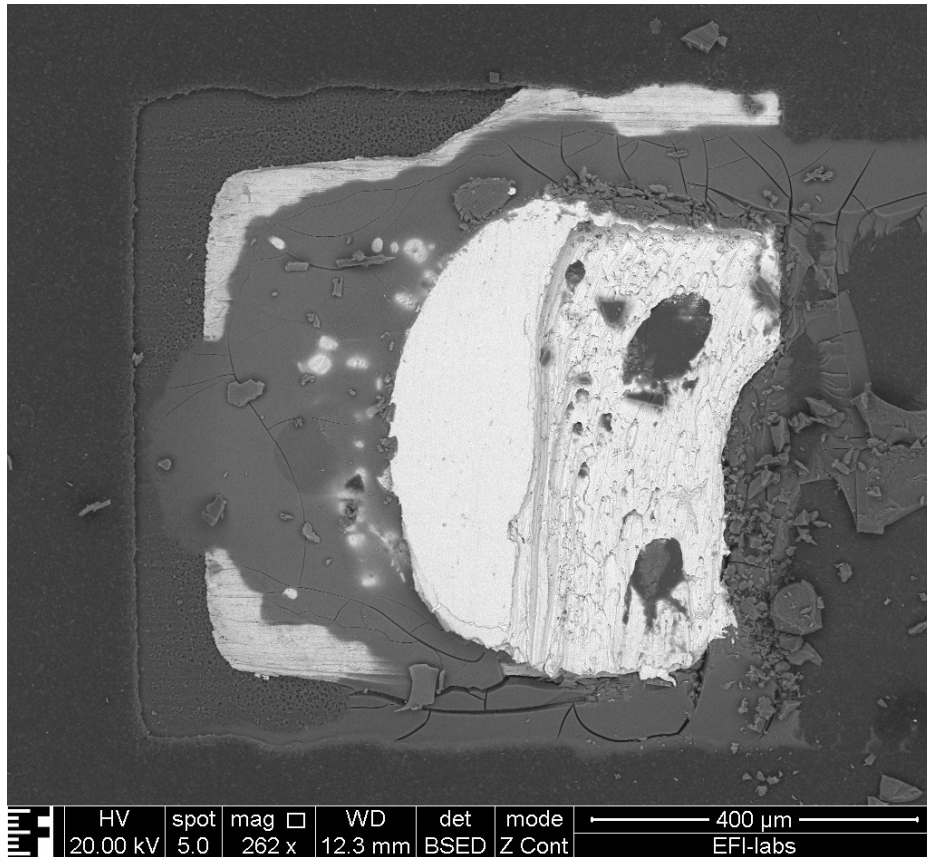
9-8. ábra - 0402-es ellenállás footprintje, 2000 óra terhelés, nyírási teszt után

### 9.3.3 Pásztázó elektronmikroszkóp

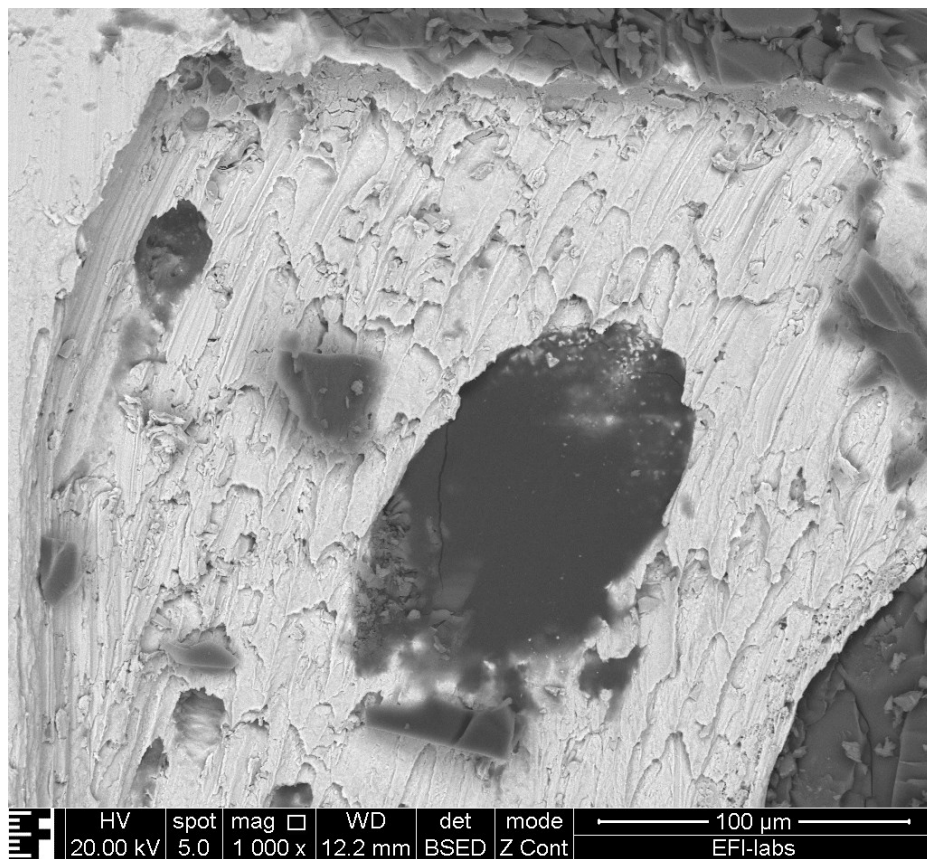
Az SEM-es vizsgálat egyik nagy előnye mélységéllesége, így a felszínről információgazdag képeket szolgáltat. Segítségével az anyagösszetétel is megállapítható: ellenőrizhető például a nikkeltartalom alapján, hogy levált-e az alkatrész fémezése.

A töretfelületekről készítettem néhány felvételt pásztázó elektronmikroszkóppal. A 9-9. ábrán egy 600 óráig terhelt minta SEM-mel készült képe látható. A képen megfigyelhető egy körülbelül 125  $\mu\text{m}$  átmérőjű void, azonban nagyobb nagyításon megállapítható, hogy ez a zárvány forrasztáskor keletkezett. A 9-10. ábrán ugyanerről az alkatrészről készült, nagyobb nagyítású kép látható. Megfigyelhető, ahogy a tömbi forraszkötés töretfelülete nem egy rideg törésre jellemző, hanem egy sokkal simább, elhúzottabb felület.



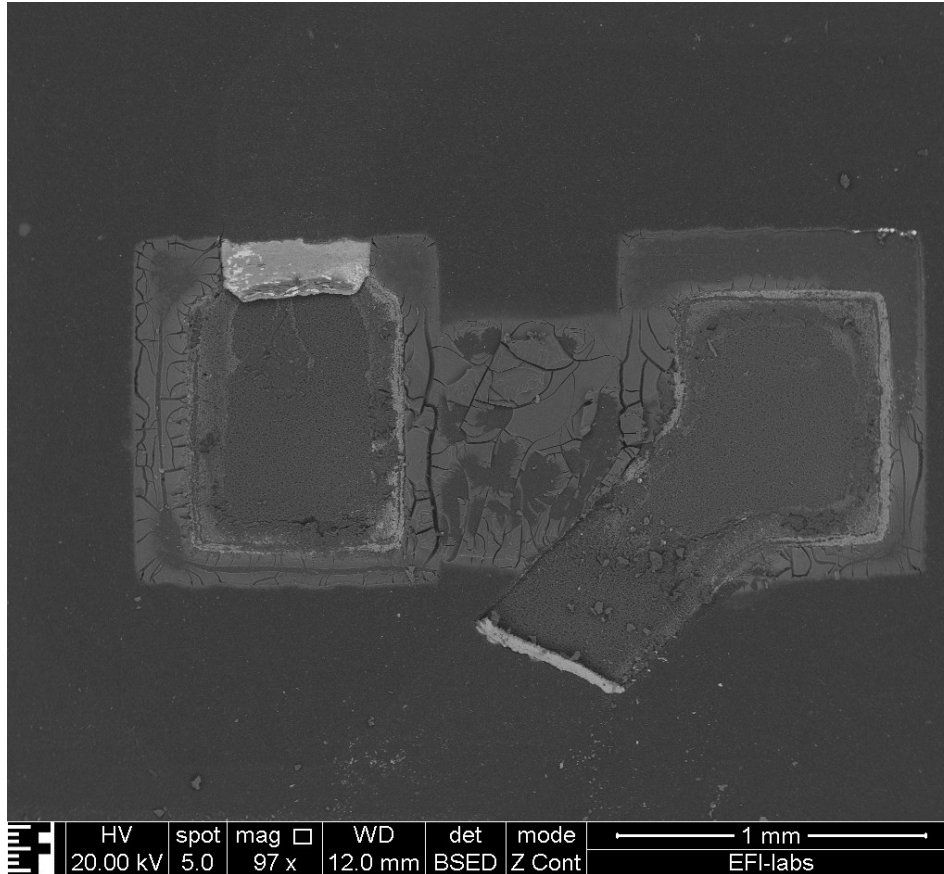


9-9. ábra – SEM felvétel 600 óráig terhelt 0402-es ellenállás footprintje



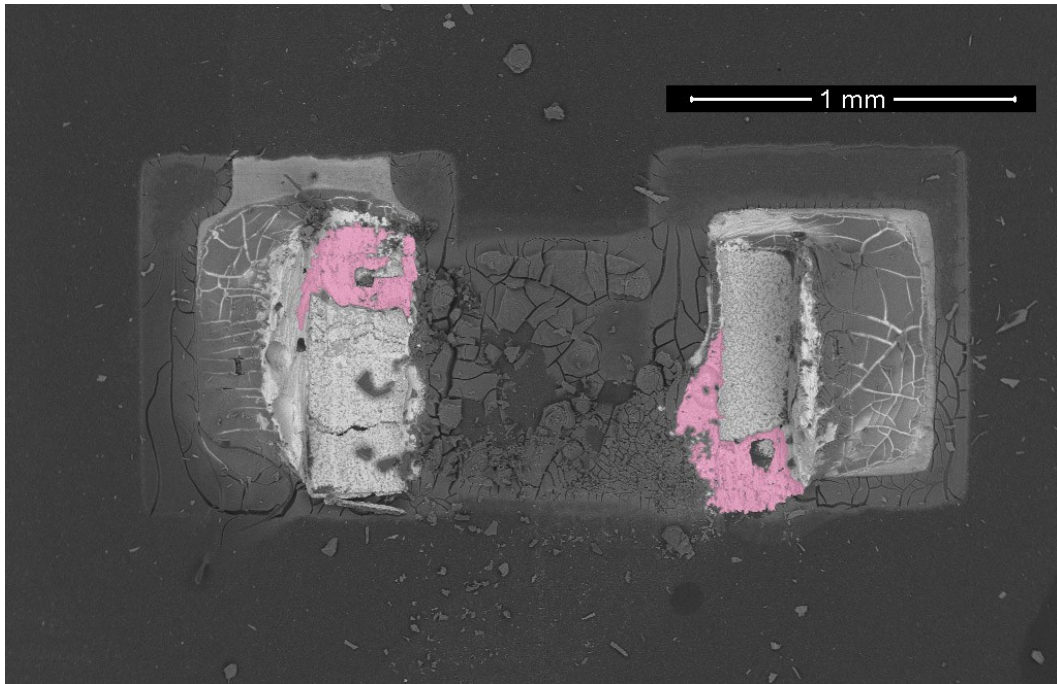
9-10. ábra - 600 óráig terhelt 0402-es ellenállás forraszkötésének töretfelszíne

A fentieket kiegészítendő, volt olyan áramkör, ahol nem csak a pad, de még a rézvezeték is elvált a nyákról, egy ilyen, közel 3000 óráig terhelt 0603-as ellenállás footprintje látható a 9-11. ábrán.



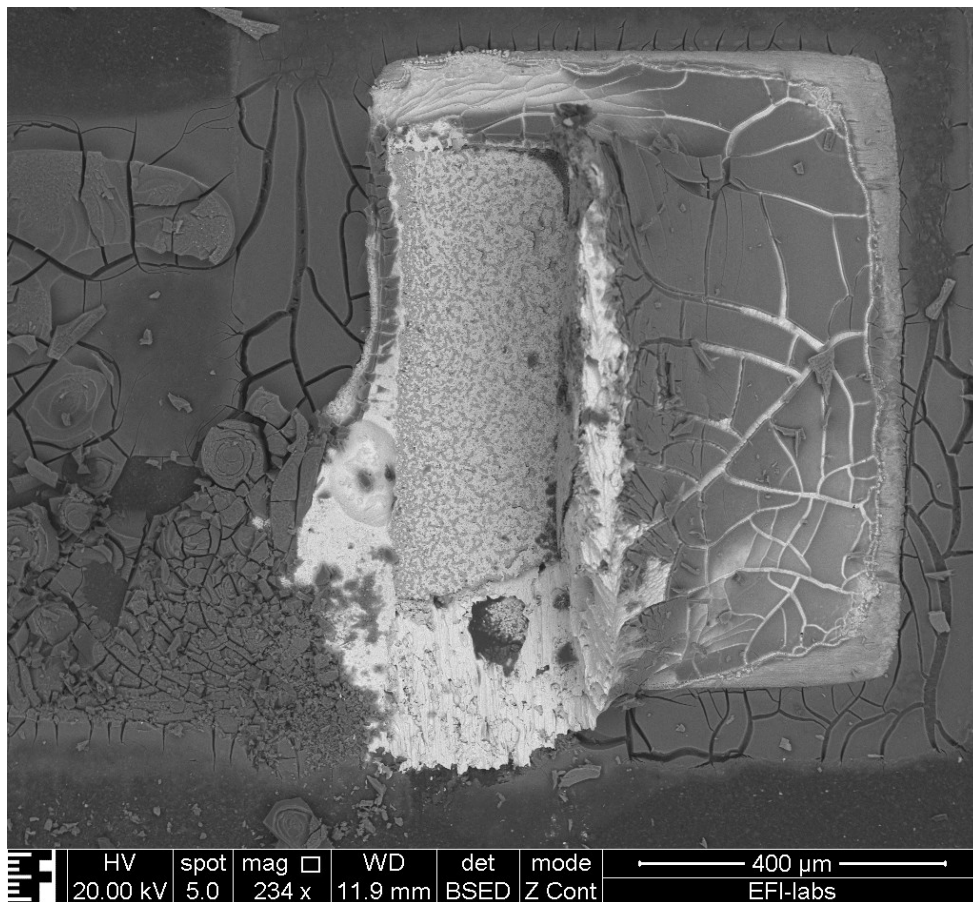
9-11. ábra - ~3000 óráig terhelt 0603-as ellenállás footprintje

A következő 9-12. ábrán szintén ugyanerről az áramkorról származó ellenállás képe látható. Egy érdekes jelenség figyelhető meg rajta: a töretfelszínen az alkatrészfémezés maradványai láthatók, amire az EDX analízis során megállapított nikkeltartalom utal. Másrészt jól látszik a magas Sn tartalmú forraszkötés a kritikus pontoknál, mind a befolyó- és kifolyó áramiránynál (ezek a beszínezett területek a 8-20. ábrán, fontos megjegyezni, hogy ezek azok a sarokpontok, ahol a vezeték is a padhez kapcsolódik). Ez tehát azt is jelenti, hogy az emelt hőmérséklet hatására károsodott az alkatrészfémezés is, azonban várható volt, a kritikus zónákban a mechanikai legszűkebb keresztmetszet a forraszkötés volt.



9-12. ábra - ~3000 óra terhelés, SEM felvétel, a színezett részek magas Sn tartalmúak (forraszkötés), míg közvetlenül mellettük alkatrészfémzés maradványai láthatóak

Egy nagyobb felbontású kép látható erről a 9-13. ábrán.



9-13. ábra - ~3000 óráig terhelt 0603-as ellenállás footprintje

## 10 Továbbfejlesztési lehetőségek

### 10.1 Jelenlegi összeállítás korlátai

A kísérlet során a legnagyobb problémát az FR4 hordozó nagy hőmérséklet miatti degradációja okozta. Helyi hőelvonás nélkül a kialakuló hőmérséklet a hordozó szempontjából kritikus. A mérési összeállítás optimalizálásával sikerült a hő roncsoló hatását lecsökkenteni a lemezen, azonban az ambiens hőmérséklet így is relatíve alacsony volt (kemence által beállítható minimum). A 80 °C érték nem tér el lényegesen az általános irodalmi vizsgálatok hőmérsékletértékeitől. Az alkatrészek nem sérültek a lokális magas hőmérséklettől. Az elektromigráció folyamata gyorsítható lenne a hőmérséklet növelésével.

A mérési eredmények egyben arra is rávilágítanak, hogy a szerelvények működésének ésszerű keretei között a szimulációban felmerült probléma nem jelent fenyegetést, legalábbis FR4-es hordozó alkalmazásánál nem. Mind az áramerősség növelése, mind a környezeti hőmérséklet növelése irreális tervezési és környezeti feltételek teremtését követelné.

### 10.2 Lehetséges továbbfejlesztés

Az FR4 hordozó kiváltására kiváló lehetőséget kínál a kerámiahordozó alkalmazása. Sajnos erre tanszéki gyártási keretek között nincs lehetőség, ezért döntöttem kiinduláskor a helyben legyártható FR4 mellett, de folyamatban van a hordozók előkészítése egy külföldi kutatóhely segítségével.

Kerámiahordozó alkalmazása esetén az alkatrészek hőmérséklet tűrése jelentheti a szűk keresztmetszetet. Azonban a hordozó hővezetése is sokkal jobb (LTCC kerámia esetében is 1,5-2,5 W/mK, HTCC kerámia esetében 16-30 W/mK), szemben az FR4-gyel (az áramkörökhöz felhasznált hordozó katalógusa alapján: 0,36 W/mK), így sokkal egyenletesebb hőmérséklet eloszlás érhető vele el. Ennek következtében várhatóan jóval magasabb ambiens hőmérsékleten lenne elvégezhető a kísérlet, mivel sokkal kevésbé alakulnak ki lokális nagy hőmérsékletű gócpontok.

# 11 Összegzés

Munkám során megismerkedtem az elektromigrációval, mint jelenséggel, elmélyültem elméleti háttérében, megterveztem (Mentor Graphics PADS szoftverrel) és elkészítettem a teszteléshez használt nyomtatott huzalozású lemezeket a segítségével, a vizsgálati lehetőségeket szem előtt tartva. Az értékek meghatározásakor korábbi tanszéki eredményekhez igazodtam, mind az alkatrész, mind a geometriai méretek kiválasztásánál. Módosítani kellett az apertúra méreteket a vékonyabb stencil miatt.

A tanszéken legyártott FR4 alapú nyomtatott huzalozású lemezekre az alkatrészeket beültetőgép segítségével ültettem be. Újraömllesztéses forrasztást követően magas hőmérsékletű kemencébe helyeztem az áramköröket, a terheléses vizsgálatra. A disszipációs hő miatt több áramkör károsodott. Ezért egy módosított hőelvezetési megoldást is tartalmazó mérési elrendezéssel sikerült ezen probléma hatását lecsökkenteni, és a vizsgálat időtartamát közel 3000 órára kiterjeszteni.

A terheléses vizsgálat során bizonyos időközönként kiforrasztottam egy-egy áramkört, információt nyerve a folyamat lefolyásáról. A vizsgálandó mintákat feldaraboltam, és számos keresztcsiszolatot készítettem belőlük, hogy megvizsgáljam az elektromigráció esetleges hatását a forraszkötésekben. A csiszolatokon felül mintákról a terhelés előtt és után röntgenfelvételt is készítettem, amiket összehasonlítottam, valamint bizonyos mintákat elektronmikroszkóppal is vizsgáltam.

Letolási vizsgálatokat végeztem az áramkörökön, aminek eredményeképpen egyértelmű csökkenés következett be az alkatrészek nyírási szilárdságában, de szilárdság csökkenést okoz a nagy hőmérsékletű terhelés önmagában is. A töretfelszíneket megvizsgáltam (SEM, optikai mikroszkóp). Vizsgálataim során még ~3000 óra terhelést követően sem volt észrevehető EM okozta, jelentős voidosodás. Jelen vizsgálat eredményei alapján klasszikus NYHL-re szerelt alkatrészek esetén az EM jelensége nem hordoz magában kritikus kockázatot. Ennek ellenére ajánlott elkerülni a 90° illetve 135°-os vezetékcsatlakozásokat nagyobb áramerősségek esetén, ezzel is csökkentve a nagy áramsűrűség okozta megbízhatósági problémák valószínűségét, mint például a kísérletekben is feltárt intermetallikus ötvözet megvastagodást

Egyéb, az elektronikában alkalmazott, például kerámia hordozón a vizsgálat magasabb hőmérsékleten és/vagy áramerősséggel is vizsgálható lenne. Az FR4-es

hordozókon végzett tesztek paramétereinek fokozása szabványos és reális működési kereteken kívül történne, így ezen hordozón a további vizsgálatok értelme megkérdőjelezhető.

Fontos megjegyezni, hogy az intermetallikus réteg lokális megvastagodására vonatkozó eredményeket további kísérletekben lehetne vizsgálni. Hipotézisem alapján a sarokhatás miatt kialakuló lokális áramsűrűség növekmény miatt kialakulhat lokális IMC vastagodás, ami a kötés megbízhatóságát csökkenti. Emellett a törési mechanizmusok vizsgálatánál ugyanezen kritikus zónák esetében, még amikor az alkatrészfémmezés is levált, akkor is a forraszkötés mechanikai szilárdsága volt kisebb, egyben a legszűkebb keresztmetszet. Ezek a felvetések további kísérleteket érdemelnek, mivel olyan eredményekhez vezethetnek, amelyek új tudományos eredményként is megállhatják a helyüket.

# Irodalomjegyzék

- [1] Panasonic: [Thick Film Chip Resistors](#) adatlap, 2006, megtekintve: 2017.10.09.
- [2] Földművelésügyi Minisztérium, Vegyi anyagok szabályozása, [RoHS](#), megtekintve: 2017.10.09.
- [3] Dr. Harsányi Gábor, Elektronika technológia, BME Vikin Zrt., VI202-010, Budapest, 2011
- [4] IBL Technologies, [High quality vapor phase reflow soldering](#), 2012, megtekintve: 2017.10.09.
- [5] Helmut Leicht; Andreas Thumm: [Today's Vapor Phase Soldering An Optimized Reflow Technology for Lead Free Soldering](#), megtekintve: 2017.10.09
- [6] Kovács András: [Chip-méretű felületszerelt ellenállások forrasztott kötéseinek szimulációs vizsgálata](#), BME, Diplomaterv, 2015
- [7] Jens Lienig: [Electromigration and Its Impact on Physical Design in Future Technologies](#), 2013, megtekintve: 2017.10.09.
- [8] H.B. Huntington and A.R. Grone, J. Phys. Chem. Solids 20, 76 (1961)
- [9] H.X. Xie, D. Friedman, K. Mirpuri, N. Chawla: Electromigration Damage Characterization in Sn-3.9Ag-0.7Cu and Sn-3.9Ag-0.7Cu-0.5Ce Solder Joints by Three-Dimensional X-ray Tomography and Scanning Electron Microscopy, 2013
- [10] D.K. Schroder, [Semiconductor Characterization](#), megtekintve: 2017.10.09.
- [11] Bradley Geden: [Understand and Avoid Electromigration \(EM\) & IR-drop Effects in Custom IP Blocks](#), 2011, megtekintve: 2017.10.09.
- [12] David Whalley and Helge Kristiansen: [Current Density Simulations for Polymer Cored CSP Interconnects](#), IEEE, 2010
- [13] D. C. Whalley, H. Kristiansen, F. Guillen Marin: Thermal and Electrical Modelling of Polymer Cored BGA Interconnects, 2008, IEEE
- [14] Chen, H.-Y. Ku, M.-F. Chen, C. "Effect of Under-Bump-Metallization Structure on Electromigration of Sn-Ag Solder Joints," Advances in Materials Research, 2012
- [15] Ceric, H., Selberherr, S. "Electromigration Reliability of Solder Bumps", Proceedings of the 21th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA) DOI: 10.1109/IPFA.2014.6898145, 2014
- [16] J. Lienig: [An Introduction to Electromigration-Aware Physical Design](#), ISPD 2006, megtekintve: 2017.10.09.

- [17] Leida Chen, Yi Feng, Xiaoyan Liu, Mingliang Huang: Effects of Temperature and Current Density on (Au,Pd,Ni)Sn<sub>4</sub> Redistribution and Ni-P Consumption in Ni/Sn<sub>3.0</sub>Ag<sub>0.5</sub>Cu/ENEPIG Flip Chip Solder Joints, 2013
- [18] Y.C. Chan, D. Yang: [Failure mechanisms of solder interconnects under current stressing in advanced electronic packages](#), Progress in Materials Science 55, 2010
- [19] J. Webster, J. Pan és B. J. Toleno: Investigation of the Lead-free Solder Joint Shear Performance, 2006
- [20] DEK 248 típusú stencilnyomtató berendezés (kép),  
<http://www.smtnet.com/media/images/DEK%20248%20screen%20printer.jpg>, megtekintve: 2017.10.09.
- [21] Struers Knoth Rotor 3 csiszológép (kép),  
[http://www.wotol.com/images/thumbs/800x800/1228573\\_d7211553fd98eae9d15c4cba510f9f07.jpg](http://www.wotol.com/images/thumbs/800x800/1228573_d7211553fd98eae9d15c4cba510f9f07.jpg), megtekintve: 2017.10.09.





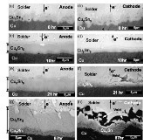
Attila Géczy, Straubinger Dániel, Kovács András, Krammer Olivér, David Busek, Harsányi Gábor

## EFFECTS OF HIGH CURRENT DENSITY ON LEAD-FREE SOLDER JOINTS OF CHIP-SIZE PASSIVE SMD COMPONENTS

**Abstract:** In our work, high current density was investigated in the lead-free solder joints of different surface mounted chip-size resistors by modeling and experiments. It was shown with finite element modeling, that corner effects at given configurations may induce high local current densities in the joints. For the verification experiments 0402 and 0603 zero ohm jumper resistors were used in a daisy-chain setup on standard FR4 printed circuit boards. Based on the 3D modeling results, the experiments were configured to find effects at hot zones in the meniscus. Failure analysis methods (X-ray, cross-section analysis, shear force tests and structural observations) were used to analyze the joints, which were exposed to 3000 hours of current load at elevated (80 °C) temperatures. The findings reveal alterations in the joints, but critical electro-migration caused failures were not observed.

### Experimental

#### MOTIVATION:



- Local current crowding;
- Leading to electromigration;
- Small SM jumper resistors (joint);
- Fresh aspect of investigation;

Fig. 1: Effect of electromigration

#### STARTING POINT:

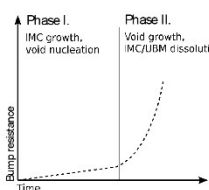


Fig. 2: Resistance changes induced by EM in lead free solder bumps according to Chen et al.

Table 1: Geometry data of chip size resistors

	0201	0402	0603
Length	800	1000	1600
Width	300	200	800
Height	250	350	450
Depth	150	200	300
Pad_x	400	400	750
Pad_y	400	400	950
Solder height	150	150	250
Solder thickness	100	175	150
Solder volume	88.167	2.22197	3.29197

Calculated 0603 fillet

#### FEM experiment:

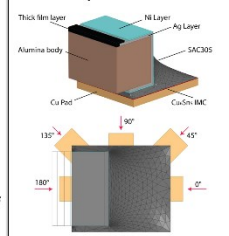


Fig. 3: Investigated structure (top) track-to-pad angles (bottom)

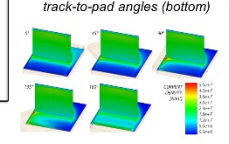
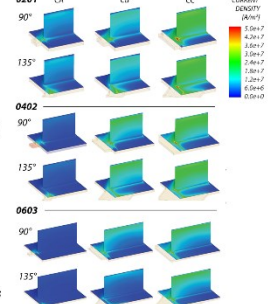


Fig. 4: Finding critical joining angles

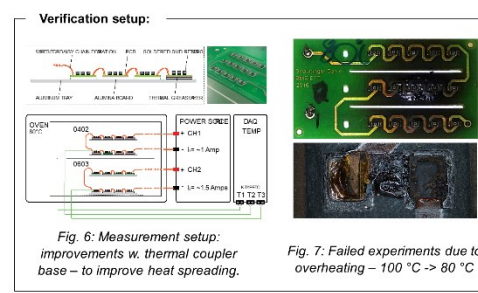
Tab. 2: Excitation setup

Size	$I_1$ , mA	$I_2$ , mA	$I_3$ , mA
0201	380	500	1000
0402	380	1200	1630
0603	380	1500	2000

Fig 5: Simulation results (under)



### Results



### Conclusions

The failures revealed no significant EM induced damage in the solder joint, the system stays in Phase I. of Figure 2. Further increase of the current is not sensible from the aspect of the FR4 substrate, however with ceramic substrates, the load and the possible local current density can be elevated. Also further fracture analysis and wider scale resistance and shear force tests would be required.

