



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

TDK dolgozat

Svidrony Bence András

Felületszerelt alkatrészek mechanikai
egyensúlya újraömllesztés forrasztás során

KONZULENS

Bátorfi Réka

BUDAPEST, 2016

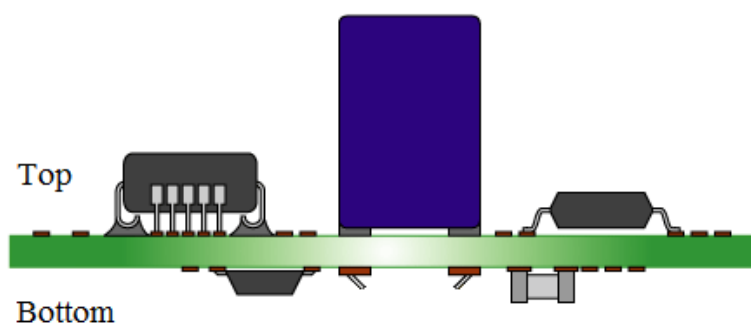
Tartalomjegyzék

Bevezetés	2
1. A kétoldalas felületszerelt áramkörök gyárthatóra tervezése	3
2. A folyamatban szerepet játszó jelenségek elméleti áttekintése	4
2.1 Folyadékok tulajdonságai	4
2.1.1. Nedvesítés és felületi feszültség	4
2.2. Elektronikai gyártástechnológia, felületszereléstechnológia	6
2.2.1. Stencilnyomtatás	7
2.2.2. Alkatrészek beültetése	8
2.2.3. Újraömlasztéses forrasztás	9
2.2.4. Ellenőrzés	11
3. Kísérlet tervezése	11
3.1. Alkatrészek kiválasztása	11
3.2. Tesztpanel tervezése	13
3.3. Alkatrészek paramétereinek megválasztása	13
4. Kísérlet megvalósítása	13
4.1. Első kísérlet 5 db 2,39 mm-es réztömbbel	13
4.2. Második kísérlet 5 db 2,45 mm-es és 5 db 2,5 mm-es réztömbbel	22
4.3. Harmadik kísérlet különböző méretű réztömbökkel	24
4.4. Negyedik kísérlet különböző méretű réztömbökkel	26
5. Összefoglalás	27
6. Köszönetnyilvánítás	27
7. Irodalomjegyzék	28

Bevezetés

Az elektronikus készülékek a felhasználók és a piac igényeinek megfelelően egyre kisebb méretben próbálják ugyanazt a funkciót nyújtani, illetve még azokat bővíteni. Ehhez elengedhetetlen lépés volt az alkatrészek miniatürizálása, azonban a furatszerelt alkatrészek méreteit a kivezetéseik mérete miatt egy bizonyos foknál jobban nem lehetséges zsugorítani. Ennek oka, hogy a kivezetések az alkatrész mechanikai stabilitásáért is felelősek, ez egy minimumot szab a méretcsökkentésnek. Ezt a problémát a felületszerelt gyártástechnológia bevezetésével oldották meg. A felületszerelt alkatrészek jóval kisebb helyet foglalnak el az áramköri hordozón, ezért előszeretettel alkalmazzák őket napjainkban. Az új, felületszerelt alkatrészfajták alkalmazásával lehetőség nyílt a kétoldalas szerelésre is, ami korábban nem volt elterjedt. Ennek lényege, hogy a panel mindkét oldalára kerülhetnek alkatrészek, ezáltal még több komponens lehet közel azonos méretű helyre szerelni. A kétoldalas hordozók oldalait top (felső oldal) és bottom (alsó oldal) néven szokás említeni, újabban a primary és secondary elnevezések örvendenek egyre nagyobb népszerűségnek, jelezve ezzel a gyártástechnológiai sorrendjüket, vagyis azt, hogy melyik oldalt szerelik először és másodsor. A legelterjedtebb alkalmazás során lehetőség szerint a top oldalra kerülnek a furatszerelt, valamint a nagy tömegű és a forrasztás minőségére érzékenyebb felületszerelt (BGA, QFN tokozású) alkatrészek, míg a bottom oldalra csak apró, könnyű felületszerelt alkatrészeket helyeznek el. Erre azért van szükség, mert az újraömlasztéses forrasztás

során az alsó oldal első lépésben beforrasztott alkatrészeit tartó forrasz is megolvad, így a nagy tömegű, nehéz alkatrészek egyszerűen leeshének a panel aljáról. Ez az alkatrész lehullási jelenség (component candidacy) kevésbé kutatott, de a gyárthatóság szempontjából jelentős probléma, ezért bármilyen új információ, eredmény szinte azonnal átültethető a tervezésbe és gyártásba.



0-1. ábra Kétoldalas panel (felső oldalon QFP, SOIC, furatszerelt kondenzátor; alsó oldalon SM alkatrészek)
[15]

1. A kétoldalas felületszerelt áramkörök gyárthatóra tervezése

A funkcionális tervezést minden esetben termikus-, alkatrész-, készülék-, ergonómiai-, stb. tervezésnek kell követnie. Mindezen szempontokat be kell illeszteni a layout tervezésbe (alkatrész- és vezeték elhelyezés). A hagyományos tervezés során a bottom oldalra csak azok az alkatrészek kerülnek, melyek nem férnek el a top oldalon, vagy esetleg a majdan befoglaló készülék kialakítása miatt (pl. csatlakozások, hűtési megfontolások) helyezkednek el ott. Minden esetben kizárólag kis tömegű alkatrészeket helyeztek el itt, és a forrasztásra kritikus alkatrészeket (BGA, DFN, stb.) sem tették ki lehetőség szerint annak, hogy erre az oldalra tervezve őket, kétszeres újraömlésztéses forrasztáson menjenek keresztül. Hullámforrasztás alkalmazásakor az alkatrészek beültetése előtt azok teste alá, a pad-ek közé ragasztót diszpenzálnak, amely a – kikeményítése után - elvégzett forrasztáskor is helyén tartja az alkatrészt.

Újraömlésztéses forrasztás során a forraszpaszta megömlésekor a forraszgolyók halmazállapota megváltozik, szilárból folyékonyá válnak, és egyetlen folyadékcseppben egyesülnek. A folyadékok egyik jellemző tulajdonsága a felületi feszültség és a nedvesítés, mely a forrasztásban igen nagy szerepet játszik, elsőre talán szokatlan jelenségeket is lehetővé téve. Ilyen hatás például, hogy bizonyos mértékig a folyékony forrasz képes megtartani a fejjel lefelé lévő alkatrészeket ahelyett, hogy elengedné az alkatrész kivezetéseit és lecsöppenne a panel alsó oldaláról.

Munkám során azt vizsgáltam, hogy az alsó oldalra felületszerelési technológiával elhelyezett alkatrészekre milyen erők hatnak, azaz egy vizsgált alkatrészt meg tud-e tartani a megolvadt forraszpasztta, vagy leesne a forrasztás során.

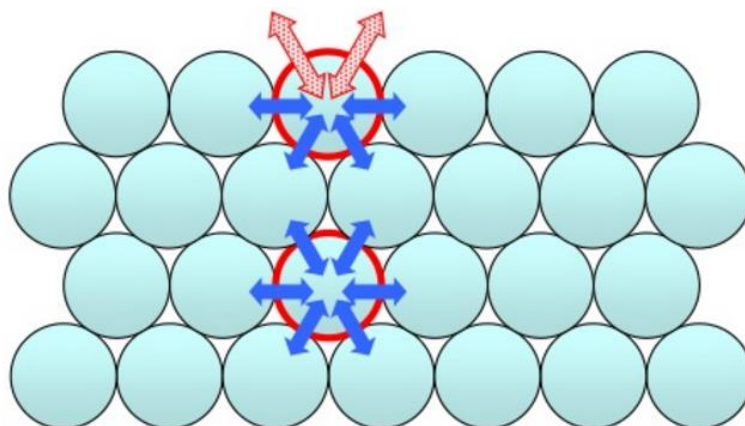
Az eredmények ismeretében meghatározható, hogy milyen tervezési szabályok alkalmazhatók egyes alkatrészeknél, esetleg mivel és mekkora mértékben bővíthetjük a hagyományos tervezési szabályokat.

2. A folyamatban szerepet játszó jelenségek elméleti áttekintése

2.1 Folyadékok tulajdonságai

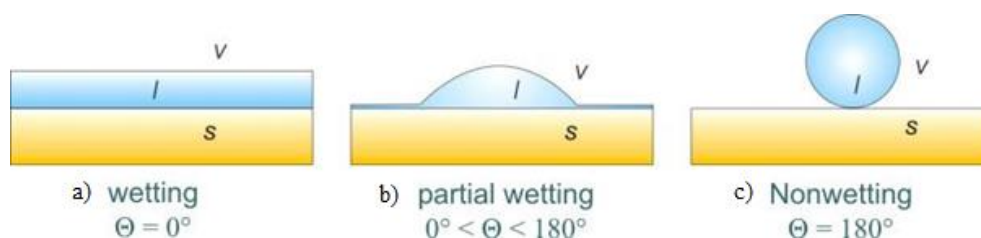
2.1.1. Nedvesítés és felületi feszültség

A nedvesítés definíció szerint folyadékoknak azon tulajdonsága, amely szerint egy szilárd test felszínével fizikai kapcsolatot létesít. A kapcsolat kialakításában a két anyag belső molekuláris kölcsönhatásai játszanak döntő szerepet. A nedvesítés mértéke meghatározható a kohéziós (egyazon anyag azonos atomjai vagy molekulái közötti) és adhéziós (egymástól különböző molekulák közötti) erők közötti egyensúly alapján.



2-1. ábra Részecskék közötti erőhatások [14]

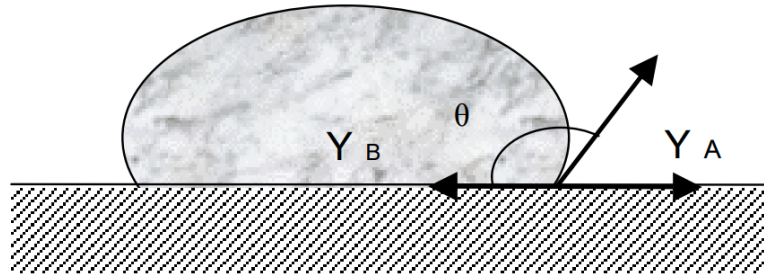
A nedvesítés mértékének alakításában a folyékony (a 2-1. ábrán *l*, vagyis liquid) és szilárd (*s*, solid) anyagokon kívül fontos szerepe van az ezeket körülvevő gáz ill. gőz halmazállapotú anyagnak is (*v*, vapour). [1]



2-2. ábra a) ideális nedvesítés b) részleges nedvesítés c) nincs nedvesítés [2]

Ideális nedvesítésnek nevezzük azt, amikor a folyadék teljes térfogata egyenletesen elterül a szilárd test felszínén. Előfordulhat, hogy a folyadék egyáltalán nem nedvesíti az

adott felszínt, ilyenkor cseppekbe rendeződve kis erők hatására is könnyen elmozdulnak a folyadék részecskéi (jó példa erre a higany üvegfelületen). Az elektronikai szereléstechológiában nagyon fontos paraméter a nedvesítési szög vagy peremszög (Θ). Ez mutatja meg számokkal kifejezhetően a nedvesítés mértékét. A nedvesítési szög a szilárd felület síkja és a folyadék görbületi felületére illesztett érintő által bezárt szög:



2-3. ábra Θ nedvesítési peremszög, Y_A felületi feszültség szilárd és gáz anyagrész között, Y_B felületi feszültség szilárd és folyékony anyagrész között [5]

El kell különítenünk két esetet, amikor nedvesítésről beszélünk. Kiindulásként elhanyagolva a rendszer közeget alkotó gáz/gőz hatását, az elektronikai szerelés során egyik esetben kizárólag két anyag: a forrasz és a fémezett felület határozza meg a nedvesítés mértékét. Ekkor nedvesítési szög mérhető a folyadék és a szilárd halmazállapotú anyagok között. Ilyen, a fenti ábrához hasonló elrendezés gyakorlatilag csak nedvesítést vizsgáló tesztlemezeken található, valós alkatrészek beforrasztásakor nem jellemző.

Ennél sokkal gyakrabban fordulnak elő olyan esetek, amikor a szilárd felületen többszörös anyaghatárok találhatóak. Erre tipikus példa, amikor egy nyomtatott huzalozású lemezen lévő fémezett kontaktusfelületeket forrasztásgátló lakk vesz körül. Ilyenkor nem csak a forrasz és a fémezés anyagi összetétele határozza meg a kontaktusfelület nedvesítését, hanem annak a geometriai méretei és a forrasz térfogata is. Ebben az esetben a forrasz és a fémezés között peremszögről beszélhetünk. Technológiai szempontból célszerűbb a nedvesítési szög alakulását megfigyelni, a kevesebb változó miatt. A nedvesítés jónak mondható, ha a nedvesítési szög kisebb 30° -nál. Ennek fontosságát a gyakorlati alkalmazás során lehet jól megfigyelni: a forrasztás minősége annál jobb, minél inkább felkúszik a forrasz az alkatrész kivezetéseire, azaz minél nagyobb felületen alakulhat ki intermetallikus réteg.

Természetesen a gáz/gőz közeg minősége is lényeges a nedvesítés szempontjából; tipikusan ilyen a nitrogén atmoszférás újraömléses forrasztás. A nem-oxidáló közeg előnyei mellett a N_2 csökkenti a felületi feszültséget és javítja a nedvesítést. Kísérleteim egyik célja az újra elterjedő félben lévő gőzfázisú újraömléses forrasztás hőközlő gőz közegében történő forrasztások felületi feszültségeinek és nedvesítésének jellemzése is. A sűrű, igen jellegzetes folyadék gőze várakozásaim szerint más hatású kell legyen, mint a szabad levegős vagy nitrogénes konvekciós-infravörös kemencék tere.

Általános esetben a nedvesítés statikus egyensúlyát a Young egyenlet írja le:

$$\gamma_{LG} * \cos \varphi + \gamma_{SL} = \gamma_{SG} \quad (1)[3]$$

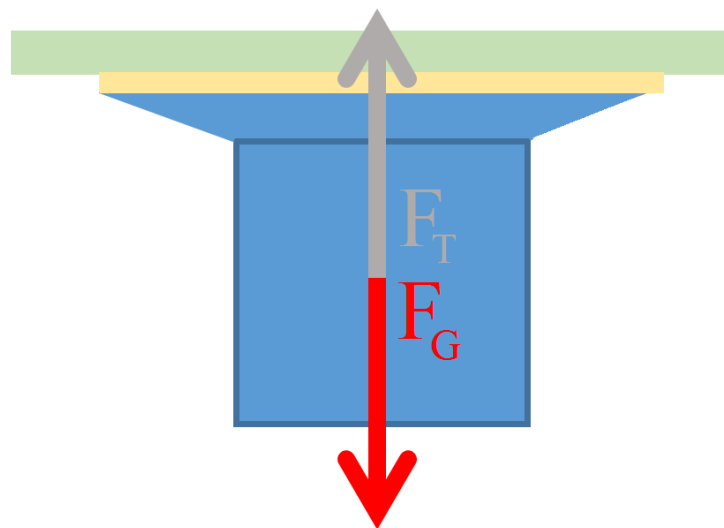
γ_{LG} a felületi feszültség a folyadék és gáz határfelületen (Liquid/Gas), γ_{SL} a felületi feszültség a folyadék és szilárd anyag határfelületén (Liquid/Solid), γ_{SG} a felületi feszültség a szilárd és gáznemű határfelületen (Solid/Gas), φ a nedvesítési szög (ebben az esetben tehát a nedvesítés mértékét kizárólag az anyagok tulajdonságai határozzák meg, geometriai elrendezésük nem).

A Young egyenlet fontossága abban rejlik, hogy a különböző anyagokkal történő kísérletezés közben kialakult nedvesítés minősége azonnal elárulja, mennyire jól használható az adott forrasztás a felületszerelt alkatrészek rögzítésére.

A Young egyenletből látszik, hogy a felületi feszültségek mértékét a határfelület két oldalán található anyag határozza meg. Ahhoz, hogy ki tudjuk számolni, mekkora erővel képes megtartani egy alkatrészt a forrasztás, a felületi feszültségek ismeretén kívül szükségünk van a nedvesített anyaghatárok kerületeire.

$$F_t = \gamma_{LG} * \cos \varphi * K \quad (2)[4]$$

A tartóerő kiszámítható az alkatrész nedvesített kontaktusfelületének kerületét megszorozva a nedvesítési szöggel és a forrasztás és a levegő közötti felületi feszültséggel.



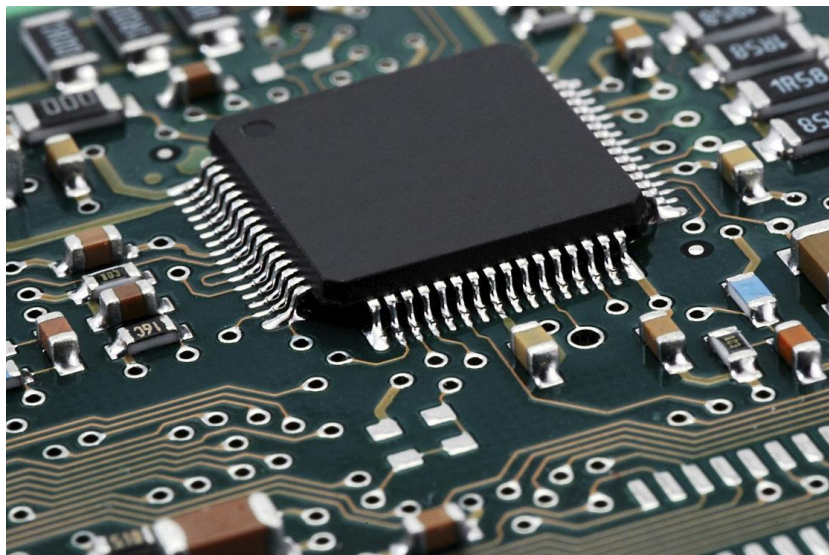
2-4. ábra Alkatrésze ható erők (F_T tartóerő, F_G gravitációs erő)

Amennyiben ez az erő nagyobb, mint az alsó oldalra szerelt alkatrészt lehúzó gravitációs erő, az alkatrész nem fog leesni a forrasztás újbóli megömlése során.

2.2. Elektronikai gyártástechnológia, felületszereléstechológia

Az elektronikai felületszereléstechológia egy olyan eljárás sorozat, amely segítségével elektronikus alkatrészeket ültetnek a nyomtatott áramköri hordozó felszínére. Angol elnevezése a Surface Mount Technology, röviden SMT. létjogosultságát az alkatrészek miniaturizálásával nyerte el, mert a furatszerelt technológiával ellentétben nincs szükség huzalkivezetésekre, amelyek sok helyet foglalnak. Napjainkban a legtöbb áramkör szinte

kizárólag felületszerelt alkatrészeket (Surface Mount Devices, SMD) tartalmaz, csak a nagy mechanikai stabilitást, rögzítést igénylő és egyes nagyáramú alkatrészek használatosak még furatszerelt példányokkal (csatlakozók, transzformátorok, induktivitások). A felületszerelt alkatrészek elhelyezése, elektromos bekötése és mechanikai rögzítése újraömllesztéses technológiával az alábbi technológiai folyamatok összességével történik. [5]



2-5. ábra Felületszerelt moduláramkör: hordozóra beforrasztott SM alkatrészek [8]

2.2.1. Stencilnyomtatás

Az SMT gyártósorra érkező nyomtatott huzalozású lemezek (továbbiakban NYHL-ek) esetleges tisztítás után a stencilnyomtató berendezésbe kerülnek. Ennek feladata, hogy az NYHL kontaktusfelületeire megfelelő mennyiségű forraszpasztát juttasson. A forraszpaszta apró (5-150 μm átmérőjű) forraszgolyók és folyasztószer (flux) szuszpenziója. A forraszpasztában lévő flux feladata a forrasztás előtt a kontaktusfelületek oxidmentesítése és a megömlő forrasz nedvesítésének elősegítése. A stencilnyomtatás tömeggyártási eljárás, ennek során stencilfóliát használva egy kés segítségével történik a forraszpaszta eljuttatása a kontaktusfelületre a stencilfólia apertúráin keresztül.



2-6. ábra Stencilnyomtató berendezés [9]

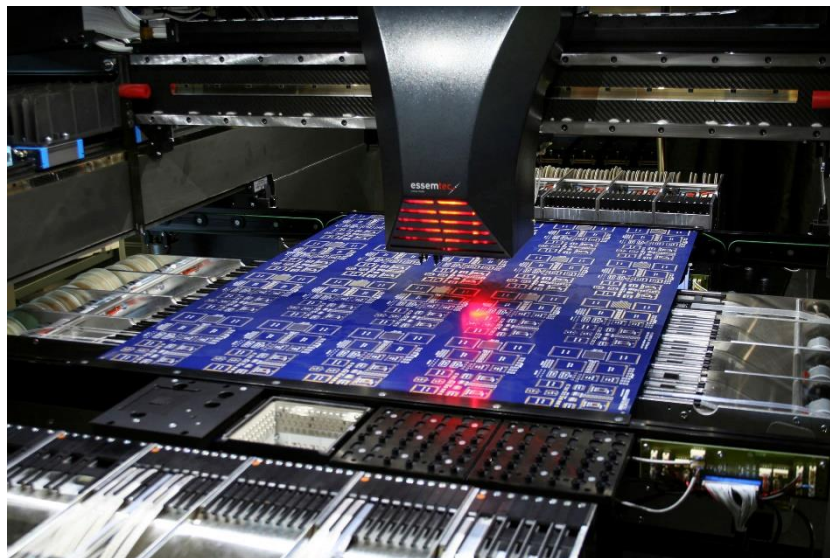
Stencilnyomtató berendezés működési elve

A stencilnyomtató berendezés precíziós pozicionálási lehetőséggel ellátott belső szállítóappal rendelkezik. Ennek feladata, hogy a szerelendő panelt pontosan igazítani lehessen a stencilfóliához a nyomtatás megkezdése előtt. A pontos elhelyezést követően a stencilfólia és a panel között nem lehet rés. A stencilfólia általában egy 100-200 μm vastagságú acéllemez, amelyen például lézerrel készített ablakok, apertúrák találhatók. A kontaktusfelületek apertúrákhoz igazítása után forraszpasztát juttatunk a stencilre, amelyet egy kés végiggörget a stencilen. Fontos paraméter a kés nyomóereje, a gördüléshez elegendő pasztamennyiség, a kés haladási sebessége. A paszta gördülése szükséges ahhoz, hogy az apertúrákba pontosan akkora térfogatú forraszpaszta kerüljön, amekkora maga az apertúra térfogata. Ha a paszta csúszna a stencilen, az apertúrákba nem kerülne elegendő forraszpaszta, vagy a stencil és a panel közé is juthat. Lényeges folyamatparaméter még nyomtatás után az NYHL elválasztási sebessége a stenciltől.

Megjegyzés: a forraszpaszta NYHL-re juttatása történhet diszpenzálassal is. Ennek során a pasztát egy tubusból, tús adagolón keresztül minden kontaktusfelületre egyesével lehet felvinni.

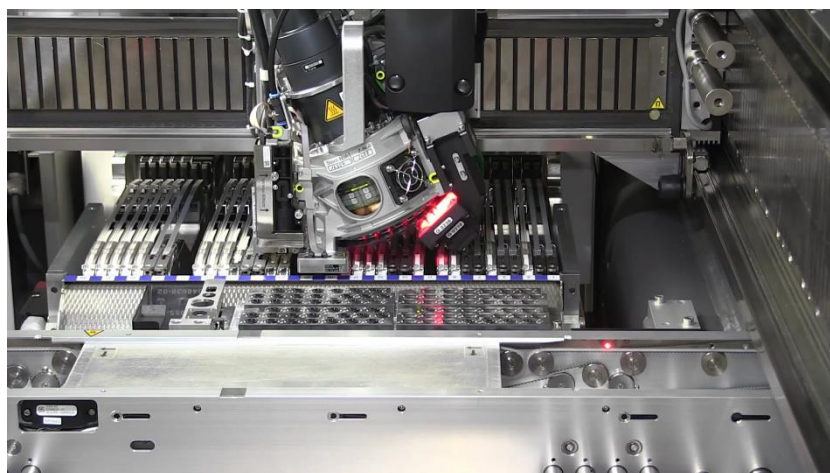
2.2.2. Alkatrészek beültetése

A folyamat e szakaszában a panel kontaktusfelületein megfelelő mennyiségű forraszpaszta található. Következő lépésként beültetőgéppel vagy kézzel (csipesszel) elhelyezhetőek az alkatrészek az NYHL kontaktusfelületein. A beültetőgépeket két kategóriába sorolhatjuk: pick&place és collect&place. A pick&place eljárást alkalmazó beültetőgép egy beültetőfejvel és egy vagy két vákuumpipettával egyesével felveszi az alkatrészeket az alkatrésztárolókból (feeder), majd a panel megfelelő pontja fölé mozdítás után elhelyezi a panelon.



2-7. ábra Pick & Place Beültetőgép [10]

Ezzel szemben a collect&place eljárást használó gépeken több vákuumpipettával rendelkező, különböző elvű (például revolverfejes) beültetőfej található, amelyre egyszerre számos alkatrészt fel tud venni a tárolókból, majd ezeket egymás után beülteti a panelre a tárolókhöz való visszatérés nélkül. Utóbbi eljárás kisebb pontosságú, de jóval gyorsabb (40-80ezer beültetett alkatrész óránként), ezért általában chipméretű ellenállások és kondenzátorok elhelyezésére használják (többnyire sok ilyen alkatrész szükséges egy panelre és csak két kivezetésük van).



2-8. ábra Collect & Place beültetőgép [11]

Pick&place eljárást a nagyobb pontosságot igénylő, több kivezetéssel rendelkező alkatrészek beültetése során alkalmaznak, például integrált áramkörök esetén SOIC, QFP, BGA, QFN tokozásban.

2.2.3. Újraömllesztéses forrasztás

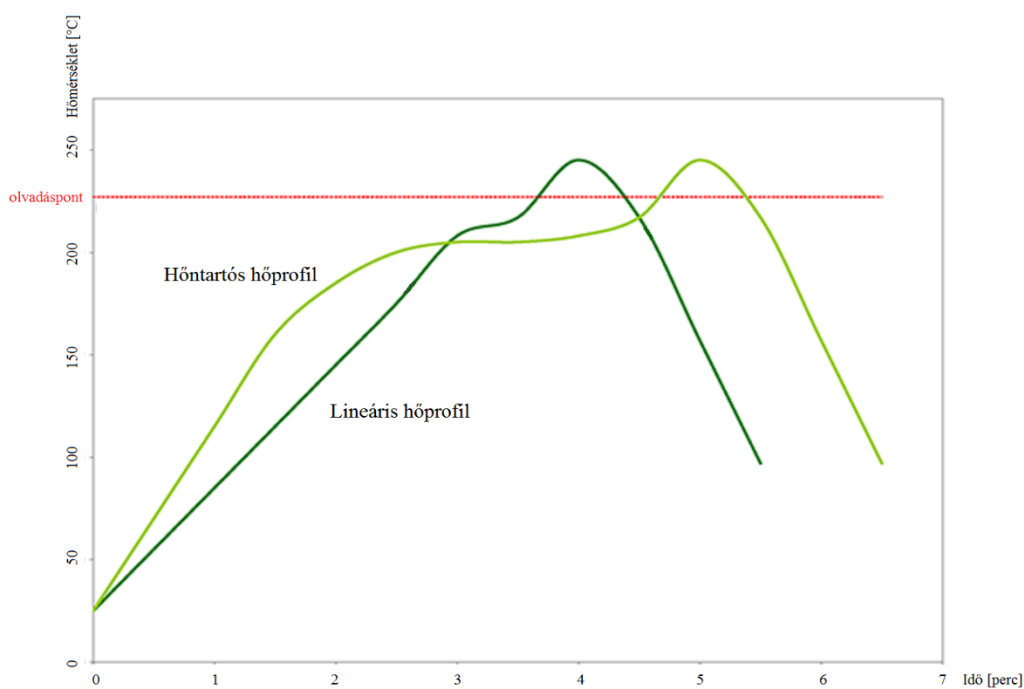
A forraszpasztába ültetett alkatrészek újraömllesztéses beforgasztása több módszerrel is történhet. Tömeggyártásra alkalmas gyártáson legtöbbször többzónás konvekciós-infrasugaras kombinált (levegő- vagy nitrogén atmoszférájú) kemencéket alkalmaznak, amelynek zónái különböző hőmérsékletűek és adott ideig teszik ki megfelelő

hőmérsékletnek a szerelt panelokat. Ismét elterjedőben levő eljárás még a gőzfázisú forrasztókemence, aminek belsejében egy jó hőátadási tényezőjű folyadék található, ami üzemi hőmérsékleten gőzzé alakul, így kondenzációs elven történik a hő átadása, a panelok felmelegítése.



2-9. ábra Gőzfázisú forrasztókemence [12]

Mindkét eljárásnál fontos, hogy a forrasztott kötések minősége és megbízhatósága érdekében megfelelő hőprofilal történjen a forrasztás.



2-10. ábra Hőprofilok ólommentes forrasztáshoz

A hőprofil első része az alkatrészek és panel felmelegítése, a folyasztószer aktiválása 100-125°C-on. További melegítés (konvekciós-infra kemencében ez hőntartást jelent) során szükséges elérni, hogy a nagyobb hőkapacitású alkatrészek is közel azonos hőmérsékletűre melegedjenek a kisebb alkatrészekkel. Ezt követően még tovább melegítik a panelt, hogy minden kontaktusfelületen a forrasz átlépje az olvadáspontját, majd kellő sebességgel lehűtik a rendszert. 2006. július 1. óta az Európai Unióban készült elektronikai termékek gyártása során csak ólommentes forrasztóanyag használható. Ilyen ötvözet például a SAC305 (96,5%Sn 3%Ag 0,5%Cu), amelynek olvadáspontja 217°C. Forrasztás során a forrasztó közeg csúcshőmérséklete infravörös-konvekciós kemencében 260°C feletti; gőzfázisú kemencében az alkalmazott gőz forráspontja által meghatározott értékű (ez SAC305 esetén 230-235 °C) lehet. A megfelelő gyorsaságú hűtés (2-4°C/sec) a forrasz és az intermetallikus réteg szövet- és kristályszerkezetét határozzák meg; valamint különböző forrasztási hibák ellen biztosít védelmet. Kísérleteim során a gőzfázisú kemencében lejátszódó hatásokat vizsgáltam.

2.2.4. Ellenőrzés

Célszerű minden lépés után ellenőrizni az adott technológiai lépés minőségét. Minél hamarabb kiderül egy adott probléma, az annál kisebb bevételkiesést jelent a gyártónak. Az ellenőrzés több módon lehetséges: emberi, AOI (Automatic Optical Inspection), AXI (Automatic X-ray Inspection). Emberi erőforrással mikroszkópon keresztül lehet vizsgálni a stencilnyomtatás pontosságát, a beültetés pontosságát és a forrasztott kötések minőségét. Ugyanezt számítógépes automatizált berendezéssel, AOI-al is lehetséges megvalósítani. BGA, QFN alkatrészek esetén, amikor a közvetlen rálátás nem biztosított az alkatrész minden kötésére, röntgenes ellenőrzés szükséges. Ennek automatizált változata az AXI.



2-11. ábra AOI berendezés [13]

3. Kísérlet tervezése

3.1. Alkatrészek kiválasztása

A kísérletben az áramköri hordozó alsó oldalára szerelt alkatrészeket vizsgáltam. Először olyan két kivezetéssel rendelkező induktivitásokat kerestem, amelyek között előzetes számítások alapján biztosan volt olyan,

- ami leesik majd a hordozóról,
- ami biztosan fennmarad,
- valamint aminél nem dönthető el biztosan előre a végkimenetele.

Az alkatrészre döntően két erő hat: az olvadt forraszpasztta felületi feszültségéből származó tartóerő (2), valamint az alkatrészre ható gravitációs erő (3).

$$F_g = m * g \quad (3)$$

A két erő egyensúlya alapján határoztam meg, hogy az adott alkatrész leesik-e majd a panelről. Amennyiben a gravitációs erő nagyobbak adódott számítások szerint a tartóerőnél, az az alkatrész leesését jelentette.

A tartóerőben szereplő tényezők közül kettő anyagjellemző: az olvadt forrasz és a közegetáron fellépő felületi feszültség, amely irodalmi adatok szerint SAC305-ös forraszpasztta és levegő esetén 0,567N/m [4], valamint a kialakult nedvesítési szög, amely SAC305-ös forraszpasztta alkalmazásakor 22° [4].

A tartóerőben szereplő harmadik tényező hosszabb kifejtést igényel. Az általam használt képletben a harmadik tényező a kerület. Ezzel a témával először foglalkozva furcsának tűnhet, hogy kerülettel kell számolni, nem pedig területtel. Az ólomtartalmú forraszok korában Phil Zarrow egy nagyon hasznos, ugyanakkor csupán empirikus összefüggését használták:

$$\text{alkatrész tömege [gramm]} / \text{forraszkötések összfelülete [négyzethüvelyk]} < 30 \quad (4)[6]$$

A (4) egyenlőtlenségben nem egységes mértékegységeket használtak, és tapasztalati kialakulása miatt sem szerették. A (4) egyenlőtlenség eltérései a tartóerő (2) és a gravitációs erő (3) egyensúlyát alkalmazva leginkább a sok kivezetéssel rendelkező BGA alkatrészeknél érhető nyomon. Ebben az esetben ugyanis a kivezetések számának növelésével a kivezetések kerülete és forrasztási felülete nem lineárisan növekszik.

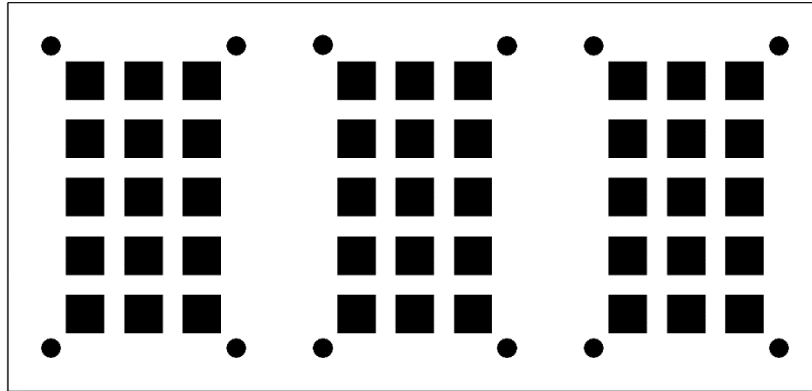
Az alkatrészek kiválasztásakor az adatlapok hiányossága miatt csak az alkatrészekhez ajánlott forrasztási felületek kerületével tudtam számolni, azonban pontosabb eredményeket az alkatrészek forrasztási felületének kerületéből kaphattam volna, mivel ez az érték kisebb, azaz ez meghatározóbb a folyamat vizsgálata során.

Az alkatrészek kiválasztása közben úgy gondoltam, hogy célszerűbb igazi alkatrészek helyett modellekkel dolgozni. Ennek több oka is van: a valós alkatrészek (ebben az esetben nagy tekercsek jöhetnek szóba) súlyeloszlása befolyásolhatja a kísérlet végkimenetelét; kísérletezéshez gazdaságosabb modellel dolgozni; reprodukálhatóság szempontjából is jobb ez a megközelítés.

Az előbbi megfontolásokat figyelembe véve valódi alkatrészek helyett négyzet alapú 10 mm-es oldalhosszúságú vörösréz-hasábokat használtam fel a kísérletezéshez. A hasábok keresztmetszete és sűrűsége adott volt, így a magasságukkal beállítható volt a tömegük. A kívánt tömegeket úgy választottam meg, hogy a tartóerő nagyságával összemérhető legyen a hasábra ható gravitációs erő.

3.2. Tesztpanel tervezése

A panel tervezésénél azt vettem figyelembe, hogy egyszerre minél több réztömb kerülhessen majd tesztelésre a statisztikai adatok miatt. Az alapgondolat az volt, hogy három csoportot alkotva a tömegük szerint elkülönítve kerülnek majd beültetésre a réztömbök, csoportonként egyszerre 15-15 db.



3-1. ábra NYÁK layout terve

A panelt a tanszéken elérhető PADS szoftverrel terveztem meg, és a későbbiekben esetleges automatizált beültetés lehetőségét megadva fiduciális jelekkel láttam el. A panelre az alkatrészekhez pontosan illeszkedő kerülettel 10 x 10 mm-es pad-eket terveztem.

3.3. Alkatrészek paramétereinek megválasztása

A réztömbök alaplapjának területe 100 mm^2 , sűrűsége $8,9 \text{ g/cm}^3$ [7], a forrasz és a levegő közti felületi feszültség értéke 567 mN/m , a SAC305 forraszpasztta nedvesítési szöge pedig 22° . Ezek alapján a tartóerő már kiszámítható. Az egyensúlyi állapot másik egyenletében még ismeretlen a tömeg, ez viszont a két egyenlet egyensúlyi állapotából a magasság meghatározását követően könnyen kiszámolható.

Számításaim szerint a tartóerő nagysága: $F_t=21 \text{ mN}$

Az ehhez tartozó maximális tömeg: $m_{\max}=2,144 \text{ g}$

Az ehhez tartozó maximális magasság: $h_{\max}=2,39 \text{ mm}$

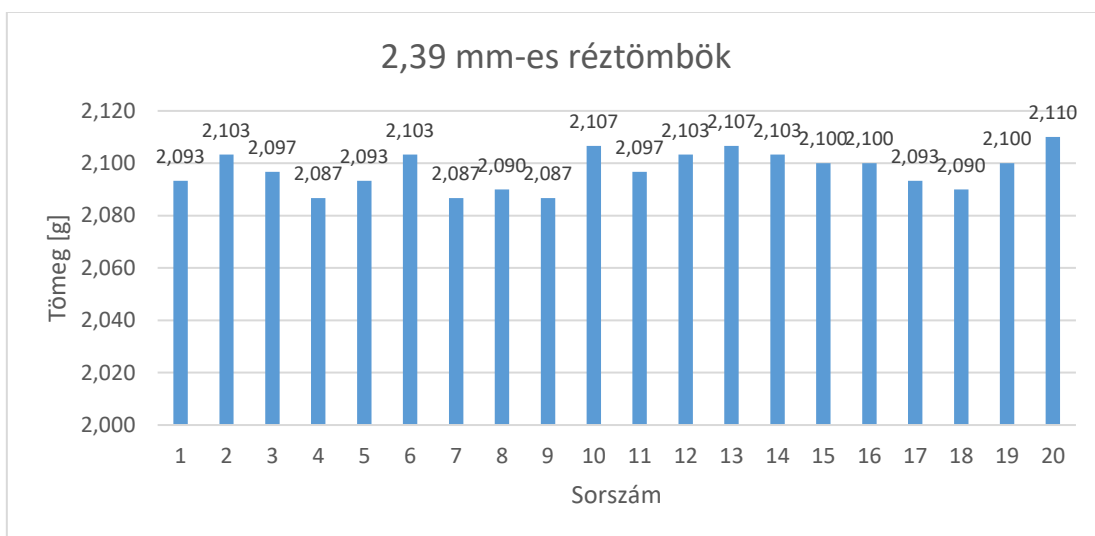
A fenti eredmények alapján az első kísérlethez készítettem 20 db 2,39 mm magas réztömböt, 15 db 2,45 mm magasat illetve 15 db 2,5 mm magasat.

4. Kísérlet megvalósítása

4.1. Első kísérlet 5 db 2,39 mm-es réztömbbel

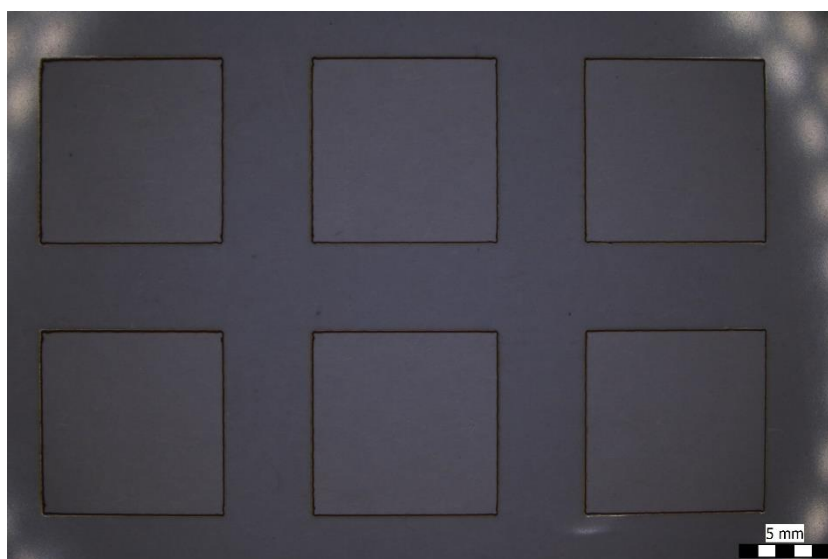
A réztömbök méreteit tolómérővel is megmértem, hogy képet kapjak a méretbeli pontosságukról. A kísérlet megkezdése előtt megmértem az elkészített tömbök tömegét

0,01 g pontosságú mérleggel, minden tömbnél három-három különálló mérés eredményét átlagoltam, majd az egyes modell-alkatrészeket számokkal megjelöltem.

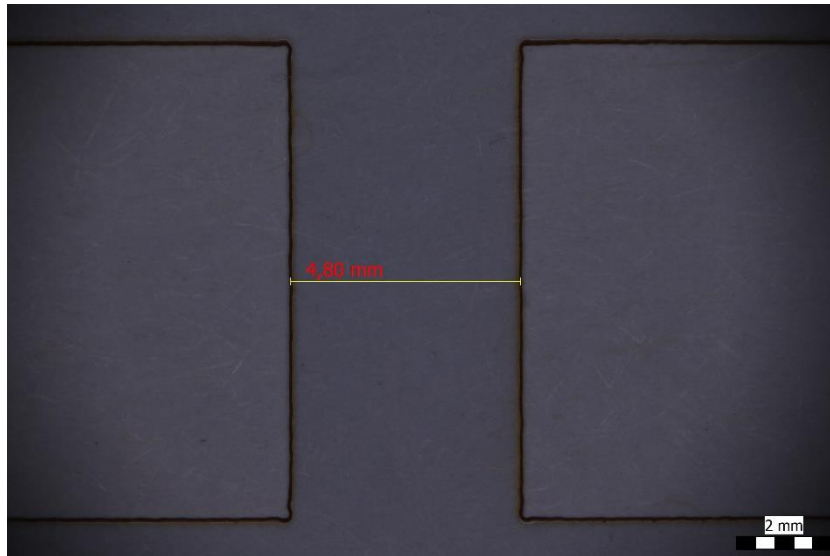


4-1. ábra 2,39 mm magas réztömbök tömege

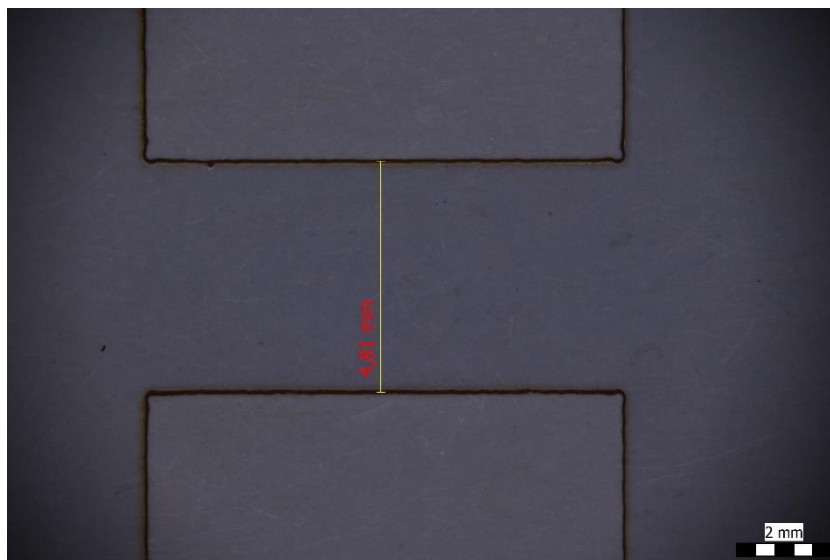
Ezt követően stencilt készítettem. Erre a célra 125 μm vastag műanyag fóliát használtam, amelyre az apertúrákat lézerrel vágattam. Az apertúrák méretét itt is 10 x 10 mm-re választottam meg, majd elkészítésük után optikai mikroszkóppal és kalibrált mérőszoftverrel ellenőriztem a méreteiket.



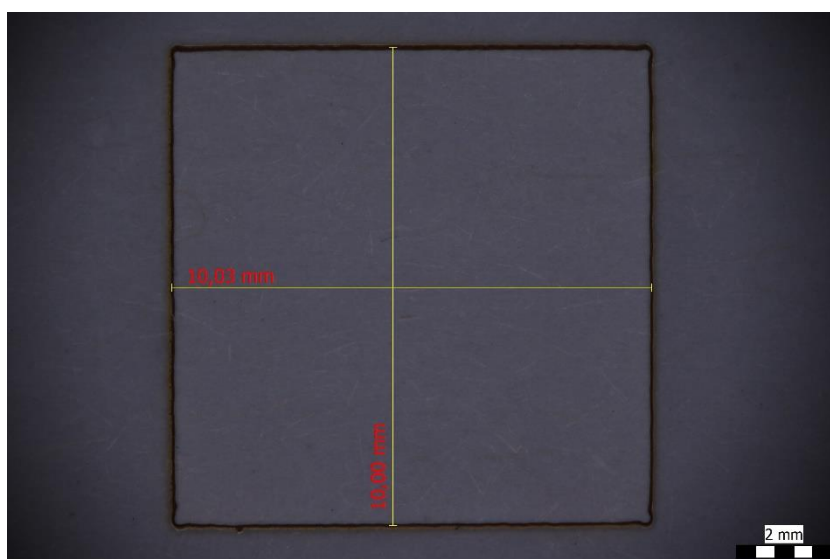
4-2. ábra Stencilapertúrák (részlet)



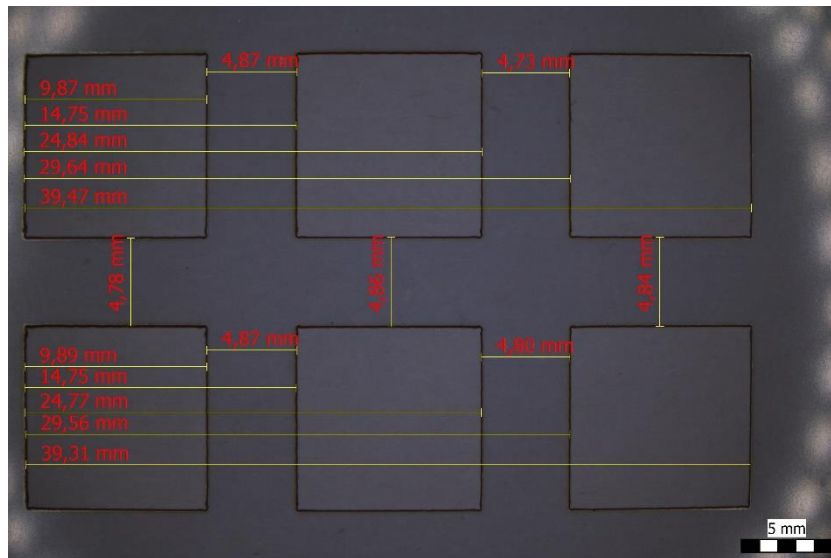
4-3. ábra Apertúrák közötti vízszintes távolság



4-4. ábra Apertúrák közötti függőleges távolság



4-5. ábra Egy átlagos apertúra



4-6. ábra Összefoglaló a stencil paramétereiről

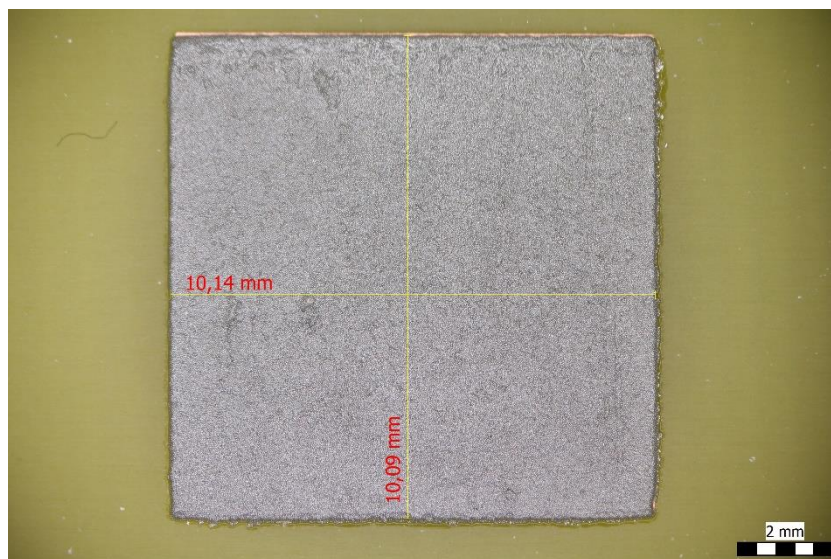
A stencil méreteit azért ellenőriztem, hogy a felvitt paszta mennyiség minden panel esetén közel azonosnak tekinthető-e. A fenti ábrán is látható, hogy a méreteket jól tartja, és a pad méretéhez képest a kisebb pontatlanságokból adódó paszta térfogat-különbség elhanyagolható mértékű. A stencilt készíthettem volna papírból is, de abban az esetben minden nyomtatáshoz újat kellett volna használnom. A papírstencil egy nyomtatás után elhasználódik, nedvszívó képessége és a forraszpasztában található folyasztószer miatt. Az általam választott műanyag fólia nem tud olyan könnyen elszakadni, mint a hagyományos papír és az előző problémára is megoldást nyújt, valamint a méretét is jobban tartja.

A kísérletezéshez először csak a tesztlemez egyik frissen polírozott paneljét használtam. Erre a tanszéken található NYÁK-üzemben közvetlenül a nyomtatás előtt lehetőség van. Ez fontos a nedvesítés minőségének maximalizálása érdekében. Ezzel már minden rendelkezésemre állt a kísérlet megkezdéséhez. Izopropil-alkoholos tisztítás után kézi nyomtatóként használva SAC305-ös forraszpasztát vittem fel a tesztpanelre.



4-7. ábra Forraszpasztta (PCB0 első két sor pad)

A nyomtatás minősége megfelelőre sikerült, apró illesztési hibával.



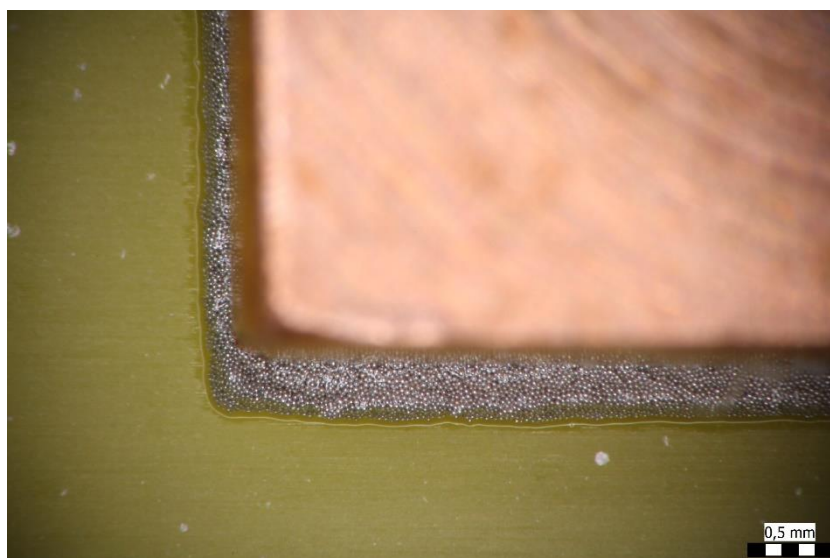
4-8. ábra Stencilnyomtatás minősítése (PCB0 pad03)

A beültetésre kiválasztott modell-alkatrészeket A stencilnyomtatás vizsgálata után beültettem az előkészített réztömböket:



4-9. ábra Beültetett réztömbök (PCB0 pad01 és pad02)

Az alábbi ábrán egy közeli kép látható a beültetést követően. Látszik, hogy a paszta jó állapotban van, nem nyomódott ki túlságosan az alkatrész alól.

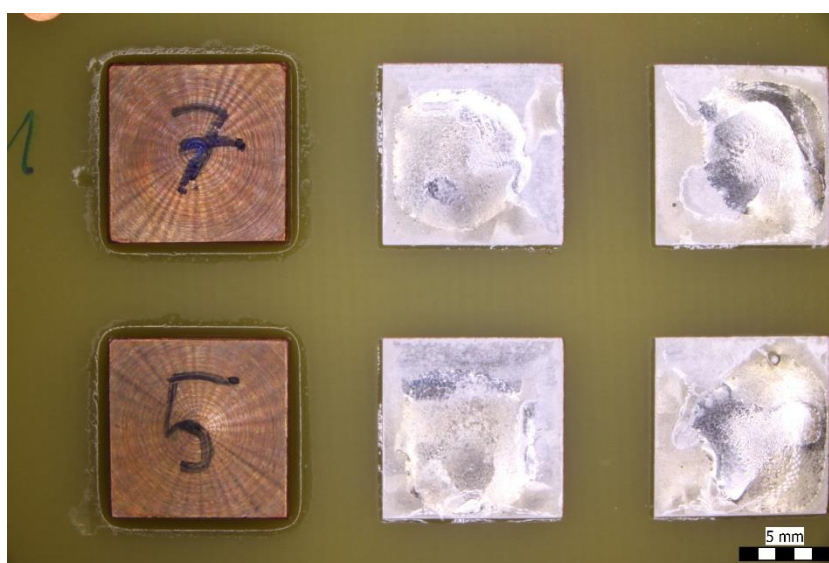


4-10. ábra Közeli kép beültetés után (réztömb 7)

A beültetett panelt behelyeztem az Asscon Quicky 450-es gőzfázisú forrasztókemencébe. A kemence lineáris hőprofilal dolgozik, beállításai a kísérletek során a következők voltak:

- forrasztóközeg forráspontja: 235 °C
- heat output: 60% (ez a paraméter a felfűtési meredekséggel van hatással)
- heat delay: 10 s (késleltetés, mely a panel szintje fölött mért 235 °C elérése után ennyi időt vár – ez a time above liquidus, azaz a megömlesztési szakasznak megfelelő érték)

Az első forrasztásnál a panelt a kemence mintatartó rácsára helyeztem, majd a második forrasztáskor a kétoldalas paneleknél szokásos hosszanti alátámasztásokat helyeztem a hordozó két szélé alá, hogy az alkatrészek szabadon lóghanak.



4-11. ábra Forrasztás után (PCB0 réztömb 5, 7)



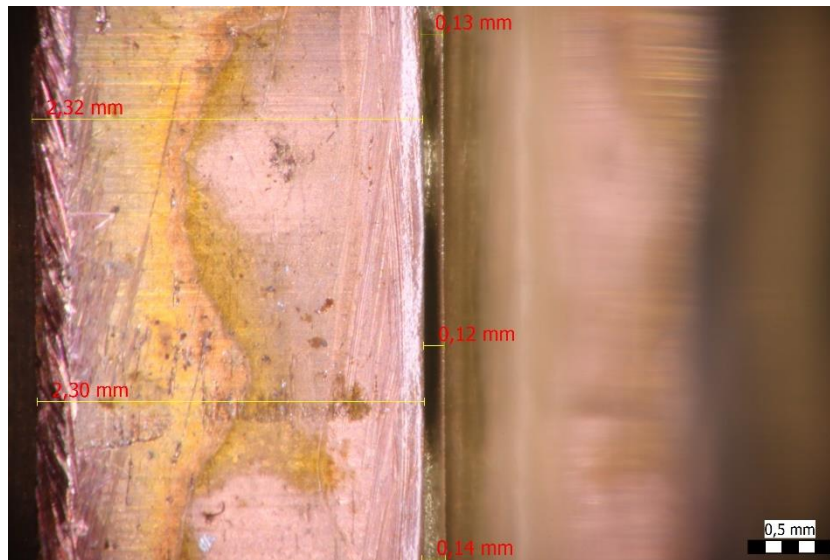
4-12. ábra Forrasztás után oldalról ferde nézetben (PCB0 réztömb 5, 7)

Az alábbi ábrán jól látható a kialakult kötés, valamint a folyasztószer tisztító hatása a réztömb alsó részén.



4-13. ábra Forraszprofil (PCB0 réztömb 5)

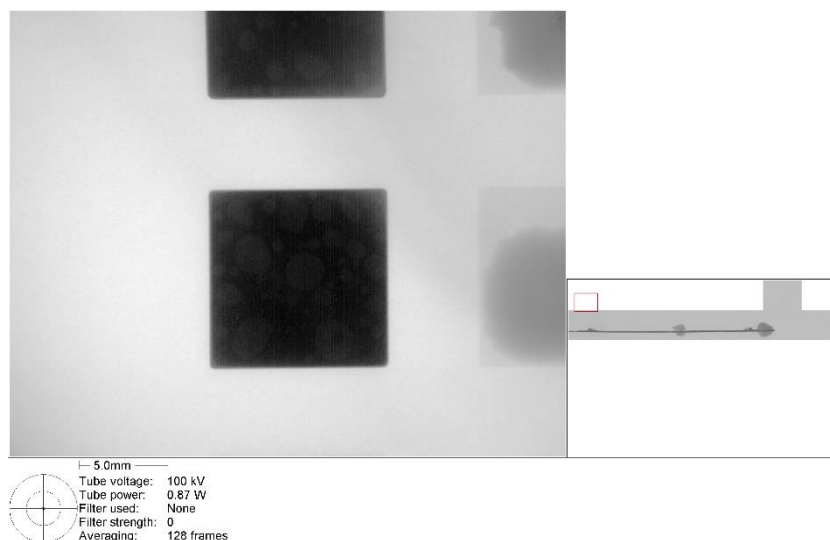
A kötések vizsgálata során észrevettem, hogy nem mindenhol folytonos a forrasz a réztömb széleinél. Az optikai mérés alapján látható, hogy a réztömbök magassága nem minden esetben egyezik az előzetesen tervezett és tolómérővel ellenőrzött értékkel. Ez végső soron nem lényeges, ugyanis a tömeg az elsődleges változó a felhasznált képletekben, azt pedig precíziós digitális mérleggel megmértem korábban.



4-14. ábra Hiányos forrasz (PCB0 réztömb 14)

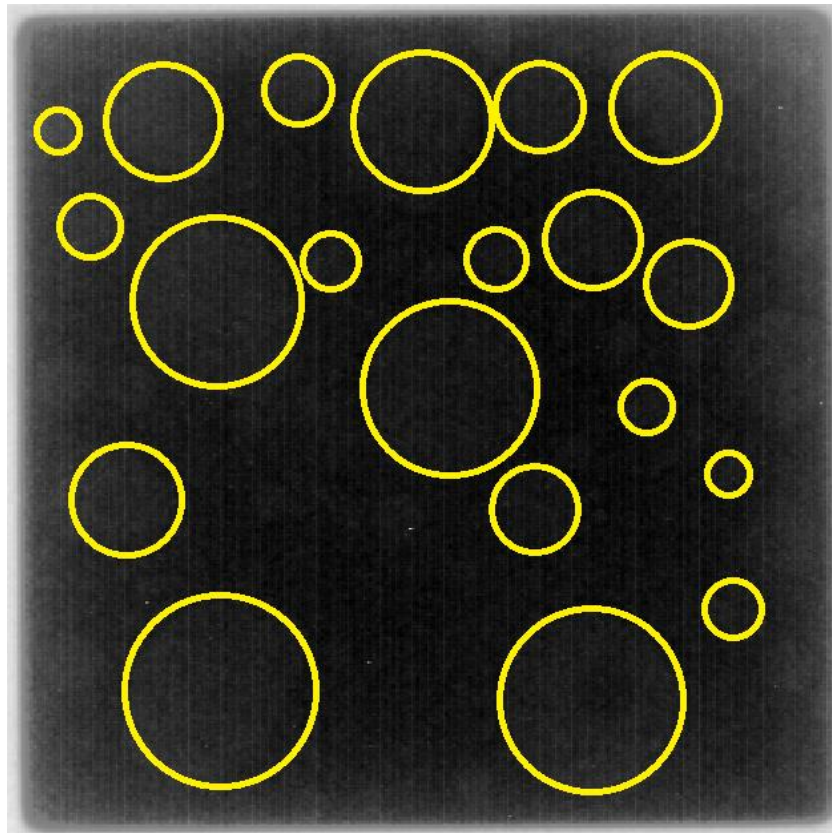
Az előző képen látható jelenség magyarázható rossz nedvesítéssel. Ennek következményében módosult az előzetesen számolt terület, amely mentén érvényesül a felületi feszültségből származó tartóerő. Az előbbi felfedezés hatására megvizsgáltam röntgen segítségével, hogy találhatóak-e zárványok a réztömbök alatt. Az alkatrész alatti zárványok azért nagyon lényegesek, mert ezek kerületei is hozzájárulhatnak a tartóerő növeléséhez. Ennek megállapítása azonban nem lehetséges csupán röntgen segítségével, ugyanis a lehetséges három zárványtípus közül csak az a kettő számít, amelyek esetén a zárvány az alkatrész alsó oldala felé egyaránt nyitott. Azt, hogy az alkatrész aljához csatlakozik-e a zárvány, vagy a forrasz belsejében található, nem tudtam biztosan meghatározni.

Korábbi tanszéki prototípusgyártási tapasztalatok alapján ekkora egybefüggő méretű forrasztási felület esetén mindig gyakoriak a zárványok, hiszen a folyasztószer-buborékoknak nagy távolságot kell megtenniük horizontálisan, míg kijutnak az alkatrész alól, ha ez egyáltalán megtörténik. Ilyen esetekben (10x10mm-es egybefüggő kontaktusfelületeknél ez teljesen biztos) az iparban vákuumforrasztást alkalmaznak. A gőzfázisú kemencében a gőztér nagyobb mértékű nyomása miatt a zárványbuborékok távozása a konvekciós-infrás módszerhez képest is nehezebb.



4-15. ábra Röntgenfelvétel (PCB0 réztömb 3)

A 4-16. ábrán jól láthatóak a zárványok. Közelítéssel meghatároztam a következő képen bekarikázott zárványok területét.



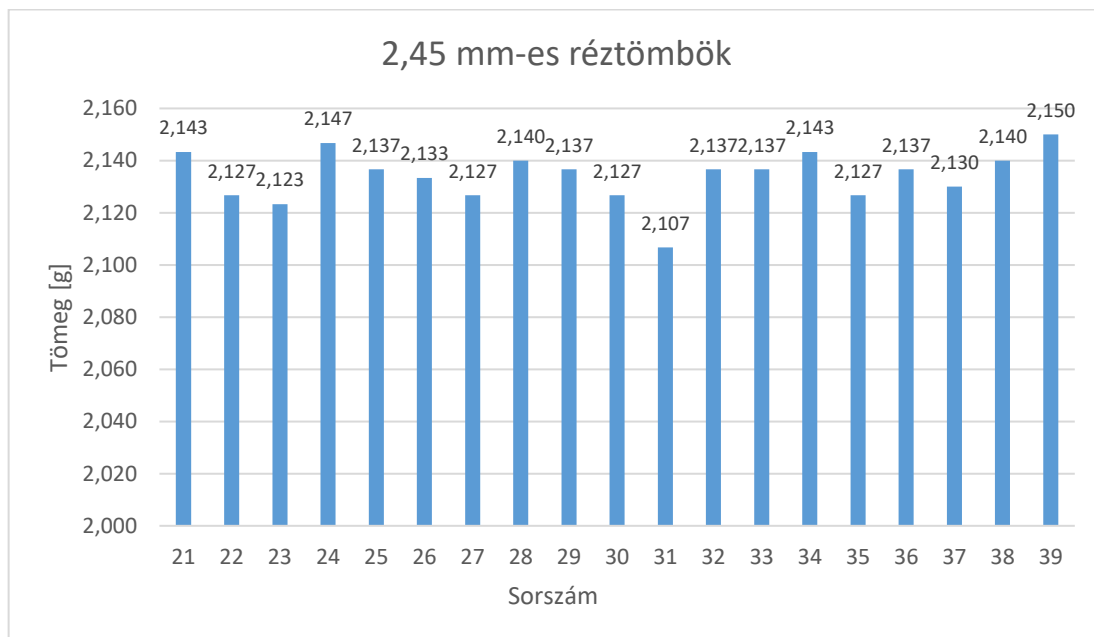
4-16. ábra Zárványok (PCB0 réztömb 3)

A képen bekarikázott kerületek nagysága összesen 76 mm. Ez majdnem a duplája az alkatrész 40 mm-es területének. Ha a bekarikázott zárványok mind érintkeznek a réztömb aljával, akkor az olvadt forrasztás által kifejtett tartóerő elérheti a 61 mN-t, amellyel képes lehetne egy 6,2 g-os réztömb megtartására is (az előzetesen számolt 2,14 g helyett).

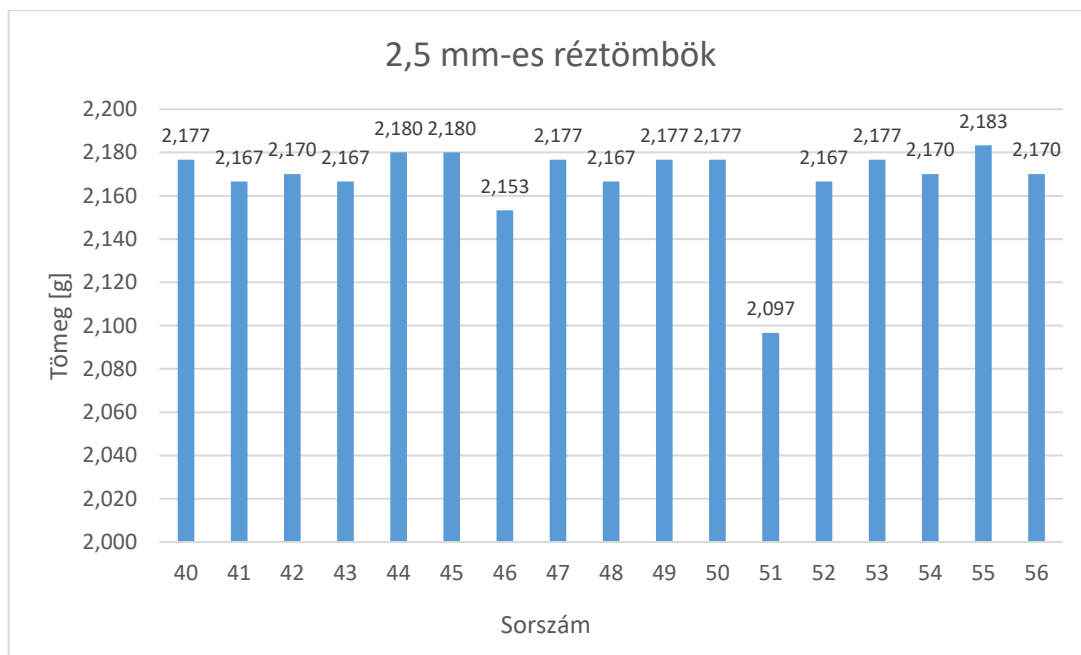
A vizsgálatokat követően elvégeztem a második forrasztási fázist, ezúttal a panel széleinél 1 cm magasan alátámasztva, réztömbökkel lefelé. A folyamat végeztével a kemencéből kivéve megállapítottam, hogy mindegyik réztömb a helyén maradt, az előzetes számításokkal megegyezően.

4.2. Második kísérlet 5 db 2,45 mm-es és 5 db 2,5 mm-es réztömbbel

A kísérletezést ismét az elkészített réztömbök tömegének mérésével kezdtem.



4-17. ábra 2,45 mm magas réztömbök tömege



4-18. ábra 2,5 mm magas réztömbök tömege

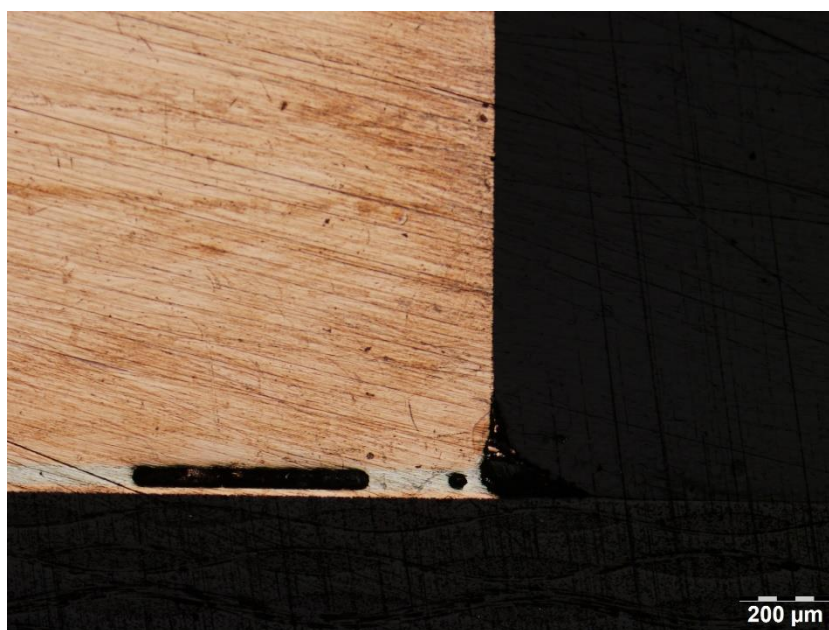
A réztömbök magasságának növelésével nőtt a tömegük is. A 2,5 mm magas alkatrészek között volt egy kirívóan alacsony érték, ezért ezt a réztömböt nem használtam fel a mérések későbbi lépéseiben.

A 2,45 mm magasak közül némelyik, a 2,5 mm magasak közül pedig szinte az összes tömege nagyobb, mint amennyit az előzetes számítások alapján meghatározott tartóerő képes lenne egyensúlyozni. A további kísérletezéshez kiválasztottam mindkét csoportból 5-5 db réztömböt. (a 23, 37, 29, 34, 39; 46, 52, 42, 50, 55 sorszámúakat)

Az első forrasztási ciklus után tolómérővel megmértem a beforrasztott alkatrészek panel síkjához mért magasságát, hogy a második ciklus utáni esetleges forraszmegnyúlást is detektálni tudjam.

A második, fejjel lefelé történő forrasztási ciklus után ismét minden réztömb a panelon maradt, ellentétben az előzetes számítások eredményeivel. Ekkor azt valószínűsítettem, hogy a zárványok jelentette extra kerület miatt megnövekedhetett a maximális tartóerő, ezért nem estek le.

Számításba akartam venni a forrasz nedvesítési szögét is, hátha az irodalmi adathoz képest jelentős eltérés tapasztalható. Ennek érdekében keresztmetszeti csiszolatot készítettem az egyik beforrasztott alkatrészből több mélységben, és mikroszkóp segítségével vizsgáltam.



4-19. ábra Csiszolat (réztömb 20)

A fenti kép több lényeges információt hordoz. Látható rajta olyan zárvány, amely közvetlenül érintkezik az alkatrésszel, így biztosan növelve a megolvadt forrasz által kifejthető tartóerőt. Látható rajta olyan zárvány is (jobb oldalon a kis kör alakú), amelyet minden oldalról forrasz határol, így ennek nincs jelentősége a tartóerő szempontjából. Mivel a pad-eket ugyanakkorára méreteztem, mint a réztömbök paraméterei, ezért ezzel a módszerrel nem tudtam meghatározni egzakt módon a nedvesítési szög. Tovább gondolva, a nedvesítési szög nem is játszhat ekkora szerepet vizsgálataim során, mivel ez egy kicsi szög és a tartóerőben annak koszinusza jelenik meg – ezáltal mindenképpen 0,8 és 1 közötti szorzótényezőként nagyságrendileg kisebb hatása van a mérési eredményekre, mint a zárványok.

A képen az is észre vehető, hogy a háttérben húzódik még valamilyen alakzat. További csiszolást követően megállapítottam, hogy ez a csiszolat készítése közben elkent forrasz illetve vörösréz az réztömbből.

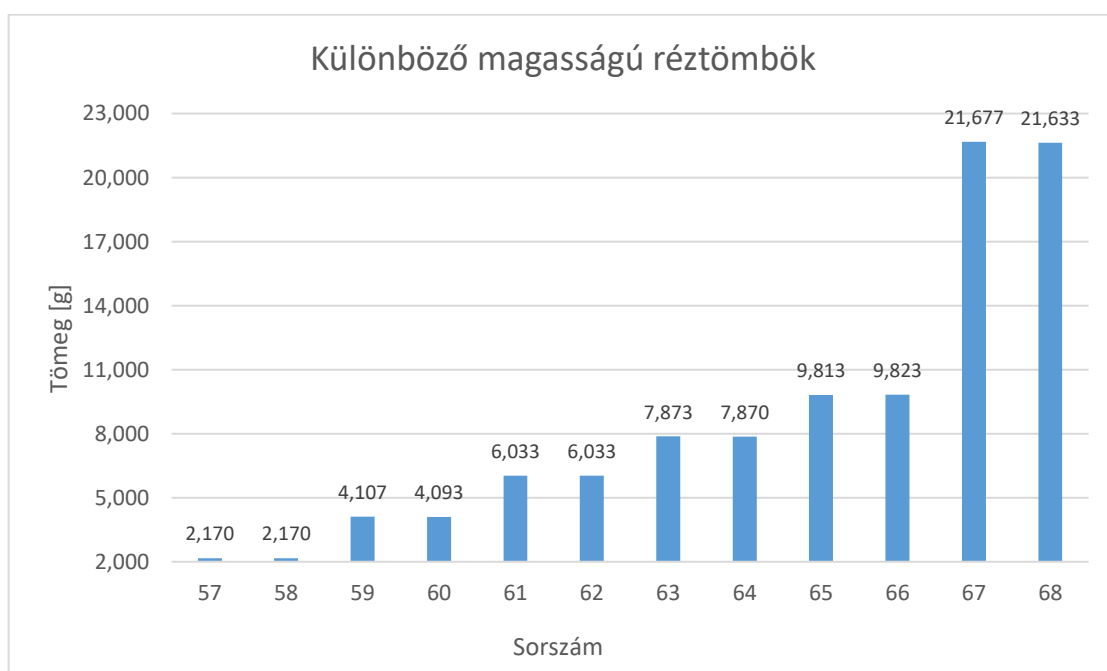


4-20. ábra Elkenődött csiszolat (réztömb 20)

A második forrasztási ciklus után tolómérővel ismét megmértem a réztömbök magasságát a panelhez képest, ám semmilyen lényeges eltérést nem tapasztaltam a mérés pontatlanságát figyelembe véve.

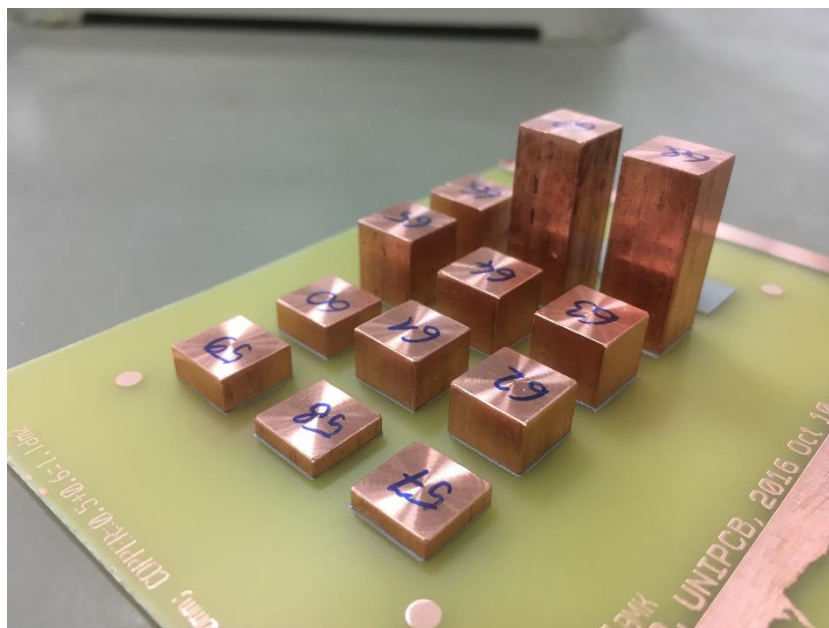
4.3. Harmadik kísérlet különböző méretű réztömbökkel

Az előző kísérletek kudarcai után drasztikusabb léptékben emeltem a réztömbök tömegét.



4-21. ábra Különböző magasságú réztömbök

Ennél a kísérletnél a réztömbök magassága 2,5 – 24,7 mm közötti értékek voltak páronként. A legnagyobb 21,6 grammos tömegű réztömböknél biztos voltam benne, hogy a zárványok ellenére is le kell esniük a második forrasztási ciklus során.

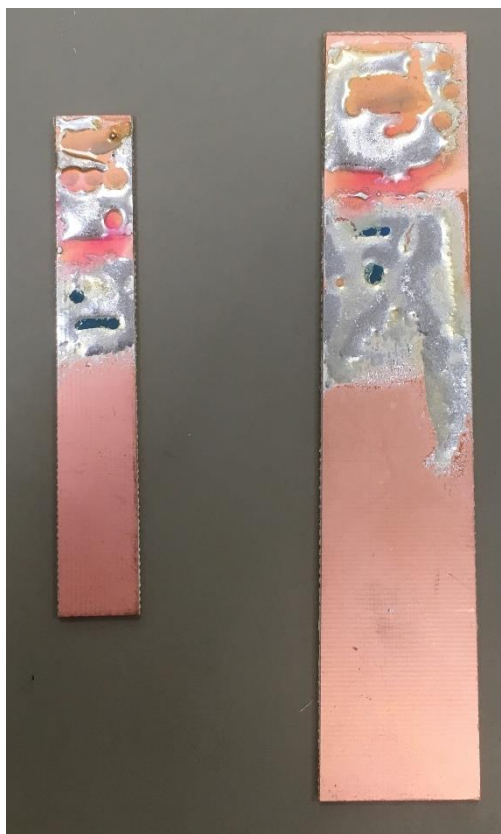


4-22. ábra Különböző magasságú réztömbök forrasztás előtt

A későbbiekben fontosnak bizonyult, hogy ekkor a nagyon magas alkatrészek miatt legalább 2,5 cm magas alátámasztást kellett alkalmaznom a második forrasztási ciklus során, hogy a legnagyobb réztömbök ne tartsák el a panelt.

A kísérletet végrehajtva ismét azt tapasztaltam, hogy mindegyik réztömb a panelon maradt. Ekkor született meg az a feltevés, miszerint a forrasz nem olvadt meg, és ezért nem estek le az alkatrészek.

A következő kísérlet megkezdése előtt feldolgoztam a mért adatokat. A legnagyobb tömegű réztömb esetén azt kaptam, hogy 1 mm terület képes 0,542 g megtartására, szemben a kísérlet elején feltételezett 0,054 g-mal. Ezért arra gondoltam, hogy az alkatrészek magasságának növelése helyett valahogyan a kontaktusfelületet kell csökkentenem. Ennek érdekében kipróbáltam több lehetőséget, hogy csökkentsem az elkészült panelek pad-jeit. Többféle lakfilccel satíroztam ki területeket réz borítású NYÁK-darabokon, hogy megfigyeljem, azok mennyire tudják csökkenteni a felületet. A kapott eredményeket nem tartottam használhatónak, ezért más megoldást kerestem. Úgy gondolom, a folyasztószer az aktivációja során feloldotta a lakkfilcet, ezért a berajzolt alakzatokat nem tartotta.



4-23. ábra Pad-ek méretének csökkentése

Az eddig elkészített és fel nem használt alacsony réztömböket megpróbáltam az oldalélükénél beültetve elvégezni a kísérletet. Kiszámolva az így kapható kerület/tömeg arányt rájöttem, hogy még így sem esnének le a második forrasztási ciklus során a korábbi adatok szerint. Mivel az előző gondolatmenet során elvettem a panelen lévő pad-ek méretének csökkentését, ezért új ötletre volt szükség. Ekkor merült fel az az elgondolás, hogy az alacsony réztömbök közepét kifúrva akasszak különböző tömegű mérő súlyokat, és így végezzem el a kísérleteket.

4.4. Negyedik kísérlet különböző méretű réztömbökkel

Az előző kísérlet eredményét követően tesztelni kellett, hogy valóban szilárd halmazállapotú marad-e a forrasz a gőzfázisú forrasztókemencében. Ezért hőlégfúvóval kezdtem melegíteni a réztömböket. A hőlégfúvó beállításai:

- hőmérséklet: 480°C
- fűzési sebesség: 5-ös fokozat

Sorszám	68	63	62	61	60	59	57
Leesett-e	Igen	Igen	Igen	Csak mozgásra	Elmozdult	Elmozdult	Elmozdult

Kezdetben nagyon nagy légsebességgel fűjtam az alkatrészeket, ezért mozdult el némelyik, de le nem esett. Az a tény, hogy a 62-es számú leesett, viszont a 61-es rajta maradt a melegítés ideje során – közben tisztán látszott szabad szemmel, hogy a forrasz megömlött – arra enged következtetni, hogy körülbelül ennél a tömegnél (6 g) lehet a vizsgált tartóerő határa.

Arra, hogy a gőzfázisú kemencében a forrasz nem ömlik meg a második ciklus során, többféle magyarázat is lehetséges. Az alátámasztás magasságának növelésével a forrasz egyre magasabbra került a kemencében. Korábbi mérések szerint más témában az alaphelyzettől már 2 cm-rel magasabban is lényegesen torzul a forrasztás közbeni hőprofil a várt értékekhez képest. Ez jelen esetben azt is jelenthette, hogy az olvadáspont fölött töltendő 15-20 másodperc helyett valószínűleg 2-3 másodpercig érte csak el ezt a hőmérsékletet.

A másik magyarázat alapján a panel alsó oldalára vastagabb galdenréteg kondenzálódik, ezzel rontva a hőátadási tényezőt és tovább csökkentve az elért hőmérsékletet.

5. Összefoglalás

Az előzetes számításaimhoz képest jelentősen különböző eredményeket tapasztaltam munkám során. A felvetett probléma további vizsgálódást igényel, ehhez megfelelő kiindulási pont lehet 1 cm magasságú alátámasztás mellett 6 g-os réztömbök felhasználása hőprofil méréssel egybekötve. Valószínűleg a zárványok miatt adódott háromszoros eltérés az egyensúlyi határra megállapított tömeg és az előzetes számítások közötti tömegek között.

6. Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti Laufer Ferenc egyetemi műszerészt, aki precíz munkájával elkészítette számomra az alkatrész-modelleket.

Köszönöm Dr. Krammer Olivérnek, hogy javaslataival, ötleteivel támogatta a munkámat.

Kísérleteimet paneljeivel támogatta az UNIPCB Kft.

Köszönöm Dr. Berényi Richárd munkáját, aki a lézervágott stencilek elkészítésében segített.

7. Irodalomjegyzék

- [1] <http://web.mit.edu/nnf/education/wettability/wetting.html>
- [2] <https://imperia.physik.uni-konstanz.de/~ltwww/wetting/wettingtext.html>
- [3] http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9783642342424-c1.pdf?SGWID=0-0-45-1368817-p174704744
- [4] http://www.circuitinsight.com/pdf/weight_limit_qfn_smta.pdf
- [5] http://www.pmdtk.upc.smm.lt/dokumentai/Medziaga/inzinerine/mm12/Priedai/3_4%20priedas.%2023_Solder_paste_general_info_KOKI.pdf
- [6] Phill Zarrow – Soldering, Surface Mount Technology, 2000. augusztus
- [7] http://www.msed.nist.gov/solder/NIST_LeadfreeSolder_v4.pdf
- [8] http://www.pcbboard-assembly.com/photo/pl6181921-flexible_printed_circuit_board_smt_pcb_assembly_1_layer_30_layer.jpg
- [9] <https://www.uk-cpi.com/wp-content/uploads/2013/09/dek-flatbed.png>
- [10] http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/55556-6721989.jpg
- [11] <http://www.siplace.com/en/placement-systems/tx>
- [12] <http://www.asscon.de/e/pages/products/vp450.html>
- [13] <http://www.visionpro.com/>
- [14] <http://www.slideshare.net/scientificgear/fundamental-of-surface-tension>
- [15] http://www.mtarr.co.uk/courses/ami4945_dpb/restricted/u07/images/pcbh103_08.gif