



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikai Technológia Tanszék

ELEKTRONIKAI GYÁRTÁS ÉS MINŐSÉGBIZTOSÍTÁS

Segédlet

Krammer Olivér

BUDAPEST

2020

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. Újraömllesztés forrasztási technológia, szelektív hullámforrasztási technológiák.....	3
2.1. Hőprofil jellemzése.....	3
2.1.1. Ismétlés.....	3
2.1.2. Hőprofilok típusai.....	4
2.1.3. A fűtési tényező.....	5
2.2. Forraszok nedvesítése a megömllesztési szakaszon.....	7
2.2.1. Alapok.....	7
2.2.2. Alkatrészekre ható erők.....	9
2.3. Intermetallikus vegyület- és rétegeképződés.....	12
2.3.1. Alapok.....	12
2.3.2. Aktivációs energia mérése.....	14
2.3.3. A forrasztási hőprofilra visszavezethető hibák.....	15
2.3.4. Hőprofil mérése.....	18
2.4. Szelektív hullámforrasztás.....	20

1. Bevezetés

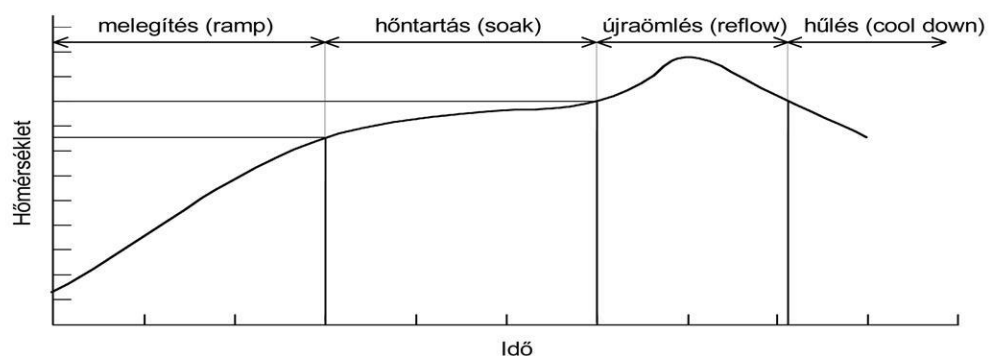
Ez a segédlet az EGyM (BMEVIETAC05) tárgyhoz készült. A jegyzetírásra vonatkozó formai követelmények jelenleg még nem teljesülnek. A dokumentum célja elektronikus segédlet biztosítása a COV miatt bevezetett távoktatás támogatására. A dokumentumot az előadás ppt-vel együtt érdemes tanulmányozni.

2. Újraömlesztési forrasztási technológia, szelektív hullámforrasztási technológiák

2.1. Hőprofil jellemzése

2.1.1. Ismételés

Az újraömlesztési forrasztási technológia 3. fő lépése (az alkatrész-beültetés után) a forrasztott kötések létrehozása, ipari körülmények között alagútkemencében. A teljes szerelvényt felmelegítik a forrasz olvadáspontja fölé, a forrasz megömlik, nedvesíti a kivezetéseket (létrejön a forraszalak), majd a lehűtésnél a forrasz megszilárdul és kialakul a mechanikai ill. villamos kapcsolat az alkatrészek és a szerelőlemez között. Tipikus hőprofil és a jellemző szakaszok paramétereit mutatja az 1. ábra.

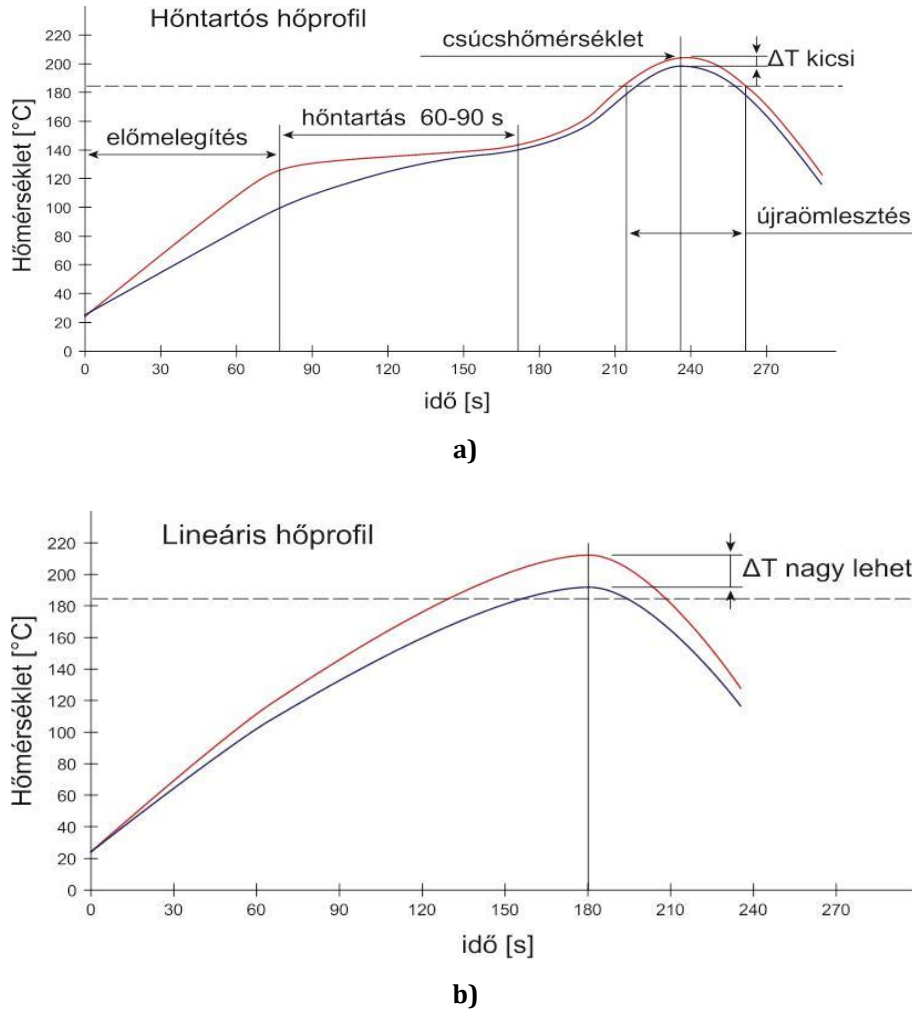


Reflow profil szakasz	SnPb	SnAgCu (ólommentes)
Melegítés (ramp)	Hőmérséklet tartomány: 0-150 °C Hőmérséklet változás: <2 °C/s Szakaszon töltött idő: 60-150 s	Hőmérséklet tartomány: 0-160 °C Hőmérséklet változás: 2-4 °C/s Szakaszon töltött idő: 60-150 s
Hőntartás (soak)	Hőmérséklet tartomány 150-183 °C Szakaszon töltött idő: 60-90 s	Hőmérséklet tartomány 160-200 °C Szakaszon töltött idő: 60-120 s
Újraömlés (reflow)	Csúcshőmérséklet: 208-230 °C Szakaszon töltött idő: 45-90 s	Csúcshőmérséklet: 230-255 °C Szakaszon töltött idő: 20-60 s
Hűlés (cool down)	Hűlés 130 °C-ig Hőmérséklet változás: 3-4 °C/s	Hűlés 130 °C-ig Hőmérséklet változás: 4-5 °C/s

1. ábra. Tipikus hőprofil és a jellemző szakaszok nagyságrendi paramétereit

2.1.2. Hőprofilok típusai

A hőprofilok két nagy csoportra, típusra bonthatók: hőntartós (soak – 2. ábra a)) és lineáris profilra (2. ábra b)).

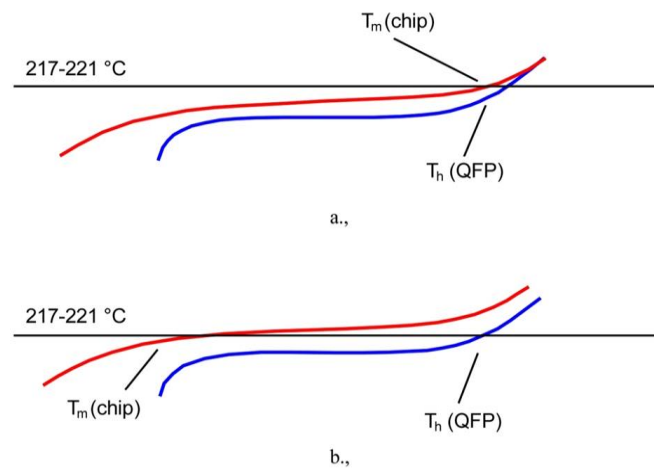


2. ábra. Hőprofilok csoportjai: a) hőntartós hőprofil; b) lineáris hőprofil

A hőntartós hőprofil előnye, hogy a hőntartási szakaszon (lassú melegítési szakaszon) a kis- és nagy hőkapacitású alkatrészek hőmérsékletei ki tudnak egyenlítődni, ezáltal a csúcshőmérsékletnél jelentkező ΔT hőmérsékleti eltérés (legmelegebb alkatrész – leghidegebb alkatrész) minimalizálható; ipari szabványok szerint a ΔT legyen kisebb, mint 5 °C. Hátránya ennek a típusnak a hosszabb hőprofil, amely kis mértékben csökkentheti a termelékenységet.

A lineáris hőprofil előnye, hogy a hőntartási szakasz kihagyásával a hőprofil gyorsabbá válik, a termelékenység nőhet. Hátránya, hogy nincs hőmérsékleti kiegyenlítés, így a csúcshőmérsékletnél a ΔT nagy lehet.

Szemben a lineáris hőprofilal, a hőntartós hőprofilok további előnye az alacsony tartható ΔT mellett az, hogy az alkatrészek egyes kivezetései is közel egyenletesen melegednek, és a forrasz olvadáspontját közel azonos időpillanatban lépik át (3. ábra). Ez azért fontos, mert amennyiben az egyes kivezetők (és a hozzájuk kapcsolódó forrasz) eltérő időpontban lépi át az olvadáspontot, sírkőeffektus kialakulásához (2 pólusú alkatrészek) valamint az alkatrészek elcsúszásához (pl. QFP tok) vezethet a forrasztás közben. Hasonló különbség tapasztalható a kényszerkonvekciós illetve infrasugárzásos hőátadási módok között.



3. ábra. Olvadáspont átlépésének időpillanata: a) hőntartós hőprofil (ill. kényszerkonvekciós hőközlés); b) lineáris hőprofil (ill. infrasugárzásos hőközlés)

Összességében, ha a szerelendő áramkör egyszerű, hőkapacitás szempontjából közel azonos alkatrészeket tartalmaz (pl. 100 db 0603-as alkatrész ☺), akkor lineáris hőprofilot választanak. Komplex, és nagy hőkapacitású szerelvények esetében pedig hőntartós hőprofilot.

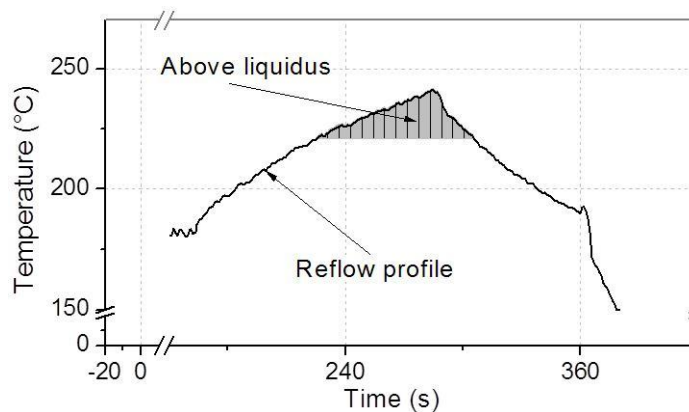
2.1.3. A fűtési tényező

A forrasztás közben, a forrasz olvadt állapotában alapvetően két jelenség zajlik le, diffúzió és nedvesítés. Mind a két jelenség erősen hőmérsékletfüggő, és az eredményük (diffúzió – intermetallikus képződés l. később) időfüggő. Ezért nem feltétlen ad pontos képet a forrasz olvadt állapotában a hőprofilról annak klasszikus jellemzése: a csúcshőmérséklet és az olvadáspont fölött töltött idő (TAL – Time Above Liquidus); fontos a hőprofil alakja is ezen a szakaszon. Ezért vezették be ezen szakasz pontosabb jellemzésére az ún. Q_η [K·s]faktort (1), a fűtési tényezőt.

A fűtési tényező egy a hőprofil alatti részterület a hőprofil megömllesztési szakaszán (4. ábra). Ennek megfelelően definíciója:

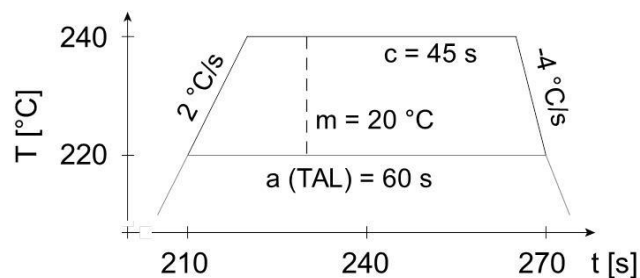
$$Q_{\eta} = \int_{t_1}^{t_2} (T(t) - T_l) dt, \quad (1)$$

ahol $T(t)$ a hőmérséklet idő szerinti függvénye, T_l ($T_{liquidus}$) az olvadáspont, t_1 az az időpillanat a melegítésnél, amikor a hőprofil (szerelvény) átlépi az olvadáspontot, t_2 az az időpillanat a hűtésnél, amikor a hőprofil (szerelvény) átlépi szintén az olvadáspontot. A fűtési tényező megfelelő értéke jellemzően ~800–1200 K·s.



4. ábra. A fűtési tényező tartalma (szürke, sraffozott szakasz)

A fűtési tényező közelíthető egy trapézformával (5. ábra), de ez csak akkor alkalmazott, ha pl. egy értekezleten, megbeszélésen gyors fejszámolással szeretnék azt becsülni. Egyéb esetekben a fűtési tényezőt a fenti (1) formulával számítjuk, amely pl. a hőprofil mérése során Excelbe gyűjtött hőmérsékleti adatok (pl. 1 s-os időközzel) összegzésével megoldható (*az olvadáspontot mérési pontonként ki kell vonni). Ilyenkor gyakorlatilag numerikusan integrálunk, téglalapokkal közelítjük az integrál értékét. A hőmérsékletmérés bizonytalanságából kifolyólag a kiszámolt értéket nagyjából 10-esre kerekítjük; pl. 1037,1245 K·s -> 1040 K·s.



5. ábra. A fűtési tényező közelítése trapézformával

Az 5. ábrán a fűtési tényező pl. (2):

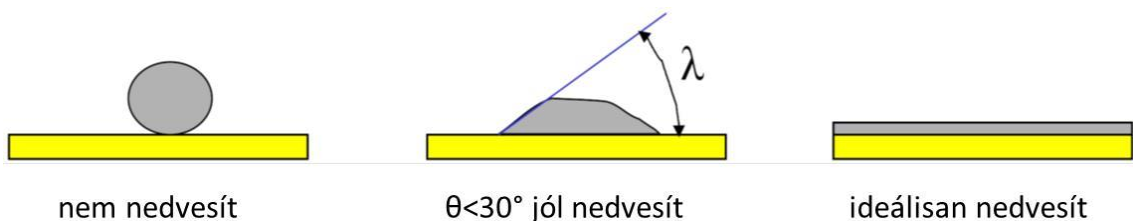
$$Q_{\eta} = \frac{a+c}{2} \cdot m = \frac{60+45}{2} \cdot 20 = 1050 \text{ K} \cdot \text{s} \quad (2)$$

2.2. Forraszok nedvesítése a megömlesztési szakaszon

2.2.1. Alapok

A megömlesztési szakaszon a forrasz nedvesíti a fémezéseket az olvadt állapotú forrasz felületi feszültségének (jele γ , mértékegysége J/m^2 vagy N/m) köszönhetően. „A felületi feszültség a folyadékok alapvető tulajdonsága, ami miatt a folyadékok a lehető legkisebb fajlagos felületű alakzatot (gömb) igyekeznek felvenni, ha külső erőter nem hat rájuk. Oka a folyadék részecskéi (atomok, egyszerű és összetett ionok, molekulák vagy ezekből felépülő kisebb aggregátumok) között fellépő kohéziós erő. Ezért gömb alakú a kis méretű lebegő folyadékcsepp, vagy a szappanbuborék stb. - wikipedia” A felületi feszültségből eredően erők is ébrednek a forrasztás közben, amelyek az alkatrészeket mozgatni tudják.

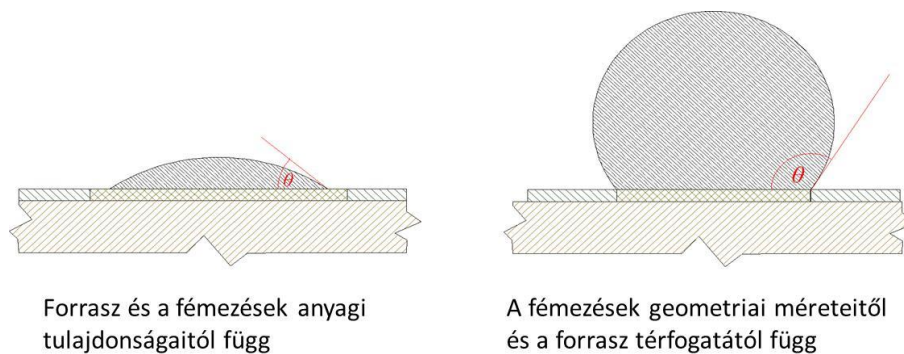
A nedvesítésnek három esetét különböztetjük meg a forrasztás szempontjából (6. ábra). 1) a folyadék/forrasz nem nedvesíti a szilárd felszínt, nem tapad a felülethez, gömbbé ugrik össze (nedvesítési szög $> 90^\circ$). 2) a forrasz nedvesíti a szilárd felszínt, elterül azon és hozzá is tapad (nedvesítési szög $< 90^\circ$); jó nedvesítésnek nevezzük forrasztás esetére, ha a nedvesítési szög kisebb, mint 30° (6. ábra középső eset). 3) a folyadék ideálisan nedvesít (elméletben ill szuperhidrofil esetekben közel): a végtelennek tekinthető felszínen a folyadék filmszerűen a végtelenbe terül és a nedvesítési szög 0° .



6. ábra. A folyadékok nedvesítésének esetei

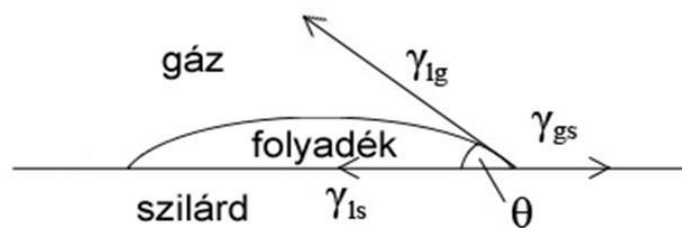
Meg kell vizsgálni továbbá azt, hogy a folyadék nedvesítése korlátozva van-e a forrasztási felületen, pl. forrasztásgátló maszk által vagy alkatrésztokozás által.

Amennyiben a nedvesítés nincs korlátozva, a forrasztási felület nagyobb, mint amennyire a forrasz terülne, ebben az esetben az érintkezési szöget nedvesítési szögnek hívjuk, és az a szilárd-folyadék-gáz hármas rendszer anyagi tulajdonságaitól függ. Amennyiben a forrasztási felület kisebb, mint amennyire a forrasz terülne, az érintkezési szöget általánosan peremszögnek hívjuk és az a forrasz térfogatától függ valamint a fémezések geometriai méreteitől függ (7. ábra). Gondoljunk pl. a BGA tokozású alkatrészek kivezetéseire, amelyek gömb alakúak (peremszög $> 90^\circ$), de szó sincs arról, hogy a forrasz nem nedvesítené a tok ill. szerelőlemez kontaktusfelületeit, csak egyszerűen jóval nagyobb a forrasz térfogata és jóval kisebb a forrasztási felület mérete.



**7. ábra. Nedvesítési és peremszög közötti különbség
(forrasz térfogat vs. forrasztási felület mérete)**

A nedvesítés statikus egyensúlyát a Young feltétel írja le (8. ábra) (3):



8. ábra. A nedvesítés statikus egyensúlya

$$\gamma_{LG} \cdot \cos \theta + \gamma_{LS} = \gamma_{SG}, \quad (3)$$

ahol γ_{LG} a felületi feszültség a folyadék-gáz (liquid-gas) határfelületen, γ_{LS} a felületi feszültség a szilárd-folyadék (solid-liquid) határfelületen és γ_{SG} a felületi feszültség a szilárd-gáz (solid-gas) határfelületen. Ezek közül a γ_{LG} mérése könnyű, látjuk majd későbbi tételben; a γ_{LS} -t már nehezebb mérni, sokszor csak következtetnek rá; γ_{SG} -nek pedig még az értelmezése is nehézkes.

Ha a (3)-at átrendezzük a nedvesítési szögre (4), látszik, hogy a forrasztás nedvesítésének „jósága” függ az ötvözetől (pl. ólmos vagy ólommentes), a szilárd felszín anyagi minőségétől (praktikusan milyen bevonat van a kontaktusfelületen) és az újraömlésztő kemence atmoszférájától (nitrogén vagy levegő).

$$\theta = \arccos \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \quad (4)$$

A nitrogén pl. növeli a γ_{LG} -t, ami rosszabb nedvesítéshez vezetne, de sokkal jobban növeli a γ_{SG} -t, így végezetül jobb nedvesítés kapunk. A γ_{LG} növekménye emellett megnöveli az alkatrészekre ható erőket a forrasztás közben, így nitrogén atmoszféra alkalmazásával megnő pl. a sírkőeffektus kialakulásának veszélye. A folyadék-gáz határfelületen a felületi feszültséget csökkenti a folyasztószer gőzadszorpciója (ezáltal javítva a nedvesítést), de ezt elhanyagoljuk a számításoknál.

2.2.2. Alkatrészekre ható erők

Mielőtt meghatározhatnánk az alkatrészekre ható erőket, először a forrasztás profilját kell kiszámítani. A forrasztás profiljának számítása több területen is fontos:

- meghatározható, hogy a forrasztott kötés alakja adott térfogat és fémezés-geometria mellett teljesíti-e az IPC szabványokat,
- számíthatók az alkatrészekre ható erők – becsülhető sírkőeffektus és alkatrész-elcsúszás,
- kétoldalas szerelésnél, amennyiben egy alkatrészt az alsó oldalra terveznek (ez az első szerelési oldal), becsülhető, hogy mekkora a forrasztás tartóereje a második szerelési oldal forrasztása közben, át kell-e tervezni az alkatrészt a felső oldalra (második szerelési oldalra),
- a profilt 3D csereformátumokon (pl. .stl, .iges) keresztül át lehetne vinni numerikusan modellező eszközökbe (pl. Ansys), és ott mechanikai vizsgálatokat lehet végezni, szilárdságot és élettartamot lehet becsülni.

A forrasztásprofil-számítás alapja 3D esetben, hogy vesszük a rendszer energiáját, és a forrasztás felületét addig minimalizáljuk, amíg az energiafüggvény minimumát el nem érjük. A rendszer energiája (5) külső erők hiányában két tényezőtől áll, a

forrasz potenciális energiájából (E_G) és a felületi feszültségből származó energiából (E_S).

$$E = E_S + E_G \quad (5)$$

Az E_G meghatározható a (6) alapján; ez az összefüggés az $m \cdot g \cdot h$ -nak a generalizálása.

$$E_G = \iiint_{x,y,z} \rho \cdot g \cdot z \cdot dx dy dz, \quad (6)$$

ahol ρ a forrasz sűrűsége (kb. 7 300 – 7 400 kg/m³), g a gravitációs gyorsulás, z a függőleges irány derékszögű koordinátarendszerben.

A felületi feszültségből származó energia kalkulációnál két külön peremfeltételből indulhatunk ki. Az első eset, amikor a forrasz végig nedvesíti a fémezést, és a forrasz térfogatától (és a fémezés geometriájától) függő peremszög alakul ki. Ekkor az E_S energia (7); megjegyzés: a felületi feszültség mértékegysége J/m², így az együttható felületi integráljával energiához jutunk:

$$E_S = \int_A \gamma dA, \quad (7)$$

ahol A a forrasz felszíne (nem csak a szabad felszín).

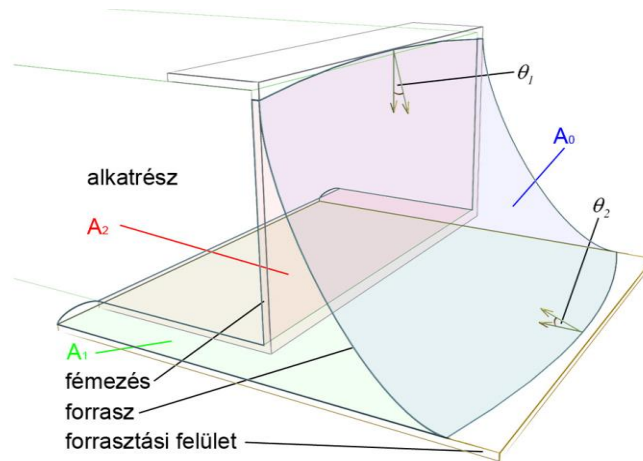
A másik eset, amikor a forrasz nem nedvesíti végig a fémezést, és az anyagi tulajdonságoktól függő nedvesítési szög alakul ki. Ekkor a forrasz felszínét érdemes három részre bontani: 1) a forrasz szabad felszíne, ami a gázfázissal érintkezik (A_0), itt γ_{LG} hat; 2) a forrasz és szerelőlemez kontaktusfelületének határfelülete (A_1), itt γ_{LS1} hat; 3) a forrasz-alkatrészfémezés határfelület (A_2), γ_{LS2} hat (9. ábra). Ekkor a felületi feszültségből származó energia (8):

$$E_S = \int_{A_0} \gamma_{LG} dS + \int_{A_1} \gamma_{LS1} dS + \int_{A_2} \gamma_{LS2} dS \quad (8)$$

A γ_{LS1} és γ_{LS2} kifejezhető a Young egyenletből (9). Behelyettesítve ezt (8)-ba, megkapjuk az összefüggést (10) a felületi feszültségből származó energiára.

$$\gamma_{LS_i} = \gamma_{SG} - \gamma_{LG} \cdot \cos \theta_i \quad (9)$$

$$E_S = \int_{A_0} \gamma_{LG} dS + \int_{A_1} -\gamma_{LG} \cdot \cos \theta_1 dS + \int_{A_2} -\gamma_{LG} \cdot \cos \theta_2 dS \quad (10)$$

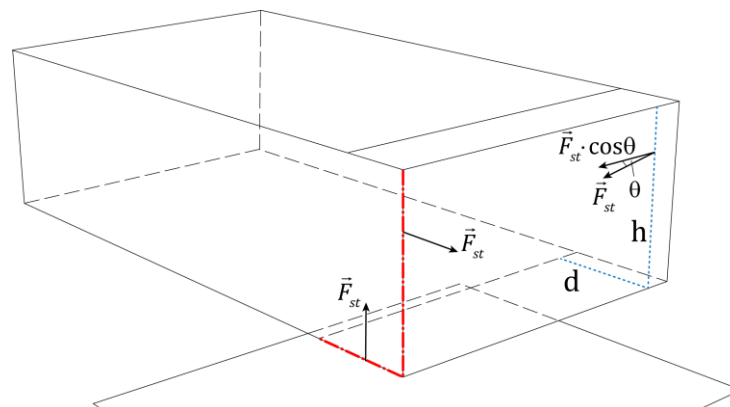


9. ábra. A forrasz felszínei

A (10)-ben gyakorlatilag az eltérő nedvesítési szögekkel tudjuk figyelembe venni az alkatrészfémzés és a NyHL kontaktusfelületének esetleg eltérő anyagi minőségét.

A gyakorlatban a (10)-et nem kell papíron kiszámolni, vannak profilszámításra alkalmas eszközök; pl. a Surface Evolver, amely gradiens csökkentő eljárást alkalmaz az (5) függvény minimumának keresésére. Az *edu* rendszerben megnézhető egy lassított videó a profilszámítás lefolyásáról <https://edu.vik.bme.hu/mod/resource/view.php?id=10061>.

A felületszerelt passzív diszkrét alkatrészek (leginkább ellenállások, kondenzátorok), amennyiben pozícióhibával lettek beültetve, képesek helyrehozódni forrasztás közben. A forrasztás közben ilyenkor fellépő erők nagyságrendi becsléséhez egy egyszerűsített modellt vizsgálunk. Legyen egy 0603-as méretkódú ellenállás 400 μm pozícióhibával beültetve (10. ábra).



10. ábra. Felületszerelt ellenállás pozícióhibával beültetve

Ekkor a forrasz felfut az alkatrész homlokfalán és alján lévő fémezésre, és a kék pontozott vonal mentén (forrasz-fémezés-atmoszféra találkozási vonala) helyrehozó erő ébred (a felületi feszültség másik mértékegysége N/m); a felületi feszültségből származó erő, F_{ST} arányos a kék pontvonal hosszával (11). Az alkatrész magassága legyen $h = 430 \mu\text{m}$, az alsó oldali fémezés hossza $d = 260 \mu\text{m}$, $\theta = 22^\circ$, $\gamma_{LG} = 550 \text{ mN/m}$ (SAC305).

$$F_{ST} = \gamma_{LG} \cdot (h + d) \cdot \cos \theta = 352 \mu\text{N} \quad (11)$$

A piros vonal mentén ébredő erő nem a helyrehozás irányába hat. Ez természetesen csak egy becslés, mert a valóságban a forraszprofil görbült, és a helyrehozó erő vonalmenti integrállal számítható. Amennyiben az alkatrész pozícióhibája a rövidebbik oldallal párhuzamos, akkor a forraszprofil szempontjából a rendszer szimmetrikus, és azonos helyrehozó erő ébred mindkét kivezetésnél, homlokfalnál. Tehát a teljes F_r helyrehozó erő (12):

$$F_r = F_{ST} \cdot 2 = 700 \mu\text{N} \quad (12)$$

A helyrehozódásról két videó, amit a laborban készítettünk:

x-irányú: <https://edu.vik.bme.hu/mod/resource/view.php?id=10062>

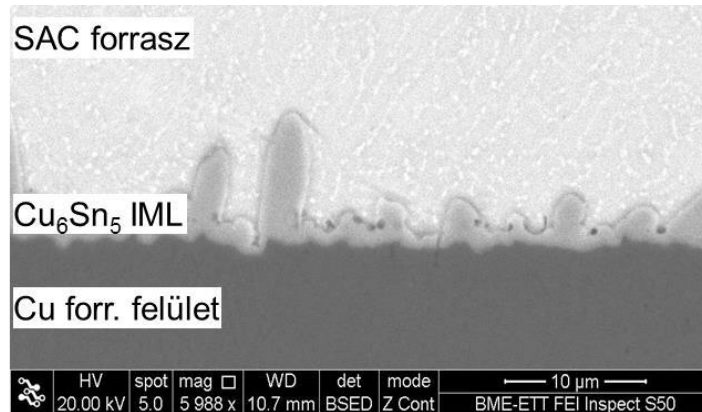
y-irányú: <https://edu.vik.bme.hu/mod/resource/view.php?id=10063>

A lemezt alulról melegítettük, így mire a forrasz megolvadt, az epoxi elkezdett kiolvadni a szerelőlemezből (alien tojásra hasonlító buborék). A laborban egy hétig kellett szellőztetni utánam ☺

2.3. Intermetallikus vegyület- és rétegeképződés

2.3.1. Alapok

A forrasztás közben a diffúziós folyamatok intermetallikus vegyületek (a forrasztott kötésen belül) és intermetallikus réteg (intermetallic layer – IML a forrasz-kontaktusfelület határfelületen) kialakulásához vezetnek (11. ábra).



11. ábra. Forrasztott kötés csiszolatának elektronmikroszkópos képe

Ólommentes forraszok alkalmazásakor az alábbi vegyületek alakulnak ki tipikusan:

- amennyiben rézhez forrasztunk (pl. OSP, ImAg, ImSn bevonatok azonnal beoldódnak a forraszba, mert vékonyak), akkor a forrasz-kontaktusfelület határon tipikusan Cu_6Sn_5 intermetallikus vegyületből álló réteg alakul ki. Ennek optimális vastagsága 2–3 μm ; ha ennél vékonyabb, akkor nem alakult ki a kötés, ha ennél vastagabb, akkor törékennyé válik a kötés, mert az intermetallikus réteg ridegebb, mint a forrasz;
- amennyiben kis mennyiségben Ni és van jelen a rendszerben, pl. alkatrészfémezésből beoldódva, akkor az intermetallikus vegyület azt szilárd oldatban tartalmazza, és $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$ alakul ki;
- kialakul továbbá kb. 200 nm vastagságban Cu_3Sn réteg a Cu_6Sn_5 és a réz között; a termékek élettartama alatt ez a réteg nagyobb rátával nő, mint a Cu_6Sn_5 ; a Cu_3Sn rétegnövekedés nagymértékben felelős a forrasztott kötések előregedéséért;
- amennyiben nikkelt forrasztunk (pl. ellenállások Ag-Ni-Sn fémezéséhez), akkor Ni_3Sn_4 réteg alakul ki; ennek optimális vastagsága 1–2 μm ;
- a forraszon belül pedig Ag_3Sn intermetallikus vegyület alakul ki (fehéres pontok a 11. ábrán); ezek kialakulási formája nagyban függ a hűtési rátától, l. később.

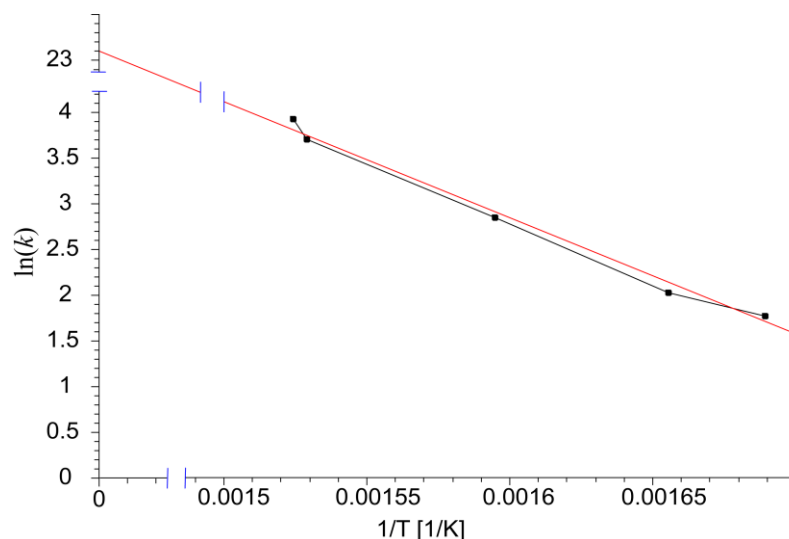
Az intermetallikus réteg növekedésére, mind a forrasztás közben, mind az élettartam során (pl. emelt hőmérséklet hatására) egy egyszerűsített rétegpülési modell szolgáltat becslést (13):

$$x(t, T) = C + t^n \cdot e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)}, \quad (13)$$

ahol x a rétegvastagság, t az idő, T az abszolút hőmérséklet, E_a az aktivációs energia, R az egyetemes gázállandó. A C értéke 0 forrasztás esetére, mert nincs kezdeti rétegvastagság, egyéb esetben a vizsgálat kezdetén érvényes rétegvastagsággal egyező. Az n értéke 0,3 (forrasztás esetére) – 0,5 (emelt, de az olvadáspont alatti hőmérsékleten tartás) között szokott lenni, tehát a növekedés az idő függvényében gyökös menetet mutat. Az aktivációs energia mértékegysége J/mol, de szokásos az eV mértékegység használata is. Ekkor a gázállandó helyett a Boltzmann állandó megfelelő mértékegységű értéke ($8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$) szerepel az exponenciális kitevő nevezőjében.

2.3.2. Aktivációs energia mérése

A forrasztott kötés élettartama alatti intermetallikus rétegnövekedés aktivációs energiáját olyan kísérlettel szokás meghatározni, amely során forrasztott kötések különböző emelt hőmérsékleteken (pl. 100, 125, 175 °C) tartanak hosszabb ideig, pl. 1000 h. Az egyes mintákon ezután megméri az intermetallikus réteg vastagságát pl. keresztmetszeti csiszolatról készült képen. Hasonló kísérlettel határozható meg a forrasztás közbeni rétegnövekedésre vonatkozó aktivációs energia is; itt különböző csúcshőmérsékleten végeznek forrasztási kísérleteket. Ezután a rétegvastagságokat ábrázolják az ún. Arrhenius diagramon, melyen a felvett egyenes meredeksége arányos az aktivációs energiával (12. ábra).



12. ábra. Arrhenius diagram – az aktivációs energia arányos az egyenes meredekségével

Az Arrhenius diagram szerkesztésének menete a következő. Az Arrhenius tag a (14) szerinti összefüggés:

$$k = Ae^{-E_a/RT} , \quad (14)$$

ahol A a preexponenciális együttható. A (13)-at a következőképp kell átalakítani (15), itt az exponens előtt lehet még egy k_0 együttható:

$$k = x(t,T) - C \quad \text{és} \quad t^n \cdot k_0 = A$$

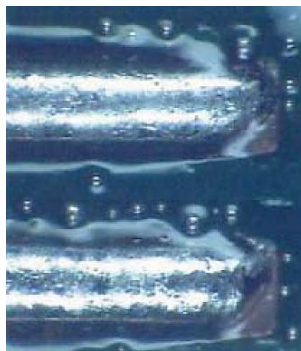
$$k = Ae^{-E_a/RT} \rightarrow \ln(k) = \frac{-E_a}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + \ln(A) \quad (15)$$

Tehát az egyenes meredeksége $-E_a/R$, míg az ordináta metszése egyenlő $\ln(A)$ -val. Meg kell jegyezni, hogy az aktivációs energia így meghatározott értékének bizonytalansága nagymértékben függ az intermetallikus rétegvastagság mérési bizonytalanságától. A rétegvastagság mérése különösen a kezdeti állapotban (C értéke) nehézkes, amikor a rétegvastagság még az $1 \mu\text{m}$ -es nagyságrendbe esik. A rétegvastagság mérési bizonytalanságának hatásáról a következő prezentációban értekeztünk: <https://edu.vik.bme.hu/mod/resource/view.php?id=10057>

2.3.3. A forrasztási hőprofilra visszavezethető hibák

A forrasztási hőprofilra visszavezethető hibák a hőprofil négy szakaszára bontva a következők.

Az előmelegítés során, ha túl lassú a folyamat a paszta megrogyhat, ami rövidzár kialakulásához vezethet, túl gyors folyamat esetén a folyasztószer felforrhat, ami hatására apró forraszgyöngyök jelennek meg (beading) – 13. ábra. Ez a hibajelenség nem összekeverendő a forraszgolyó-képződéssel; itt a gyöngyök átmérője egy nagyságrendbe esik a paszta szemcseméretével.



13. ábra. Forraszgyöngy képződés

A hőntartás során, ha túl alacsony hőmérsékleten történik, a folyasztószer nem tisztítja a kontaktusfelületet, rossz lesz a nedvesítés. Túl magas hőmérséklet esetén a forraszpaszta jobban oxidálódik, ami szintén rossz nedvesítéshez vezet. Túl rövid idejű hőntartás esetén nagy marad a hőmérsékletkülönbség az alkatrészek között a csúcshőmérsékleti szakaszon, hideg kötés alakulhat ki. Túl hosszú idő esetén a termelékenység visszaesik a hosszú ciklusidő miatt, illetve a forraszpaszta jobban oxidálódik, és rossz nedvesítés alakulhat ki.

Csúcshőmérséklet esetén, ha az túl alacsony, nem ömlik meg a forrasz, nyitott kötés, illetve ún. hidegkötés (rideg, törékeny) alakulhat ki (14. ábra), túl magas csúcshőmérséklet esetén eléghetnek az alkatrészek.

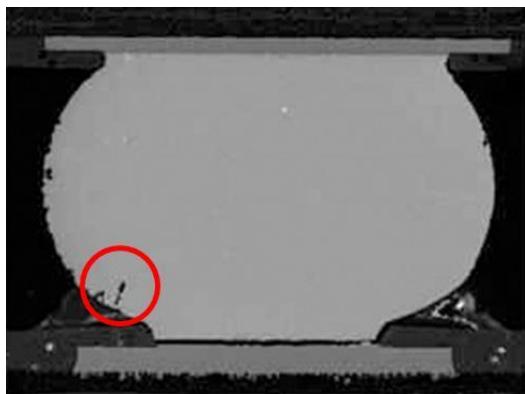


14. ábra. Hidegkötés

Ezen hibák közben az alkatrészek sérülése különböző módon történhet. Az alkatrészek megolvadhatnak, ekkor ellenőrizni kell az alkatrész adatait, ha lehet, módosítani kell a hőprofil újraömlésztési szakaszát.

Az alkatrészek elrepedhetnek, eltörhetnek, pl. az alkatrész magába szívja a nedvességet és a forrasztás közben képződő gázok megrepesztik a tokot, ez ún. popcorn hibajelenség, mert olyan hangja van, mint a pattogatott kukorica készítésének. Ilyen esetben az alkatrészeket beültetés előtt szárítani kell, a maximális forrasztási hőmérsékletet csökkenteni kell, ha lehetséges.

Repedt kötés esetén meg kell akadályozni az áramköri hordozó, vagy az alkatrész mozgását, csökkenteni kell a hűtési rátát. Ugyanakkor magas ezüsttartalmú (wt% > 2.8%) forraszok esetén nem lehet csökkenteni korlátlanul a hűtési meredekséget, mert túl alacsony ráta a kötések repedéséhez vezethet; ez az ún. Shrinkage defect – zsugorodási hibajelenség (15. ábra).

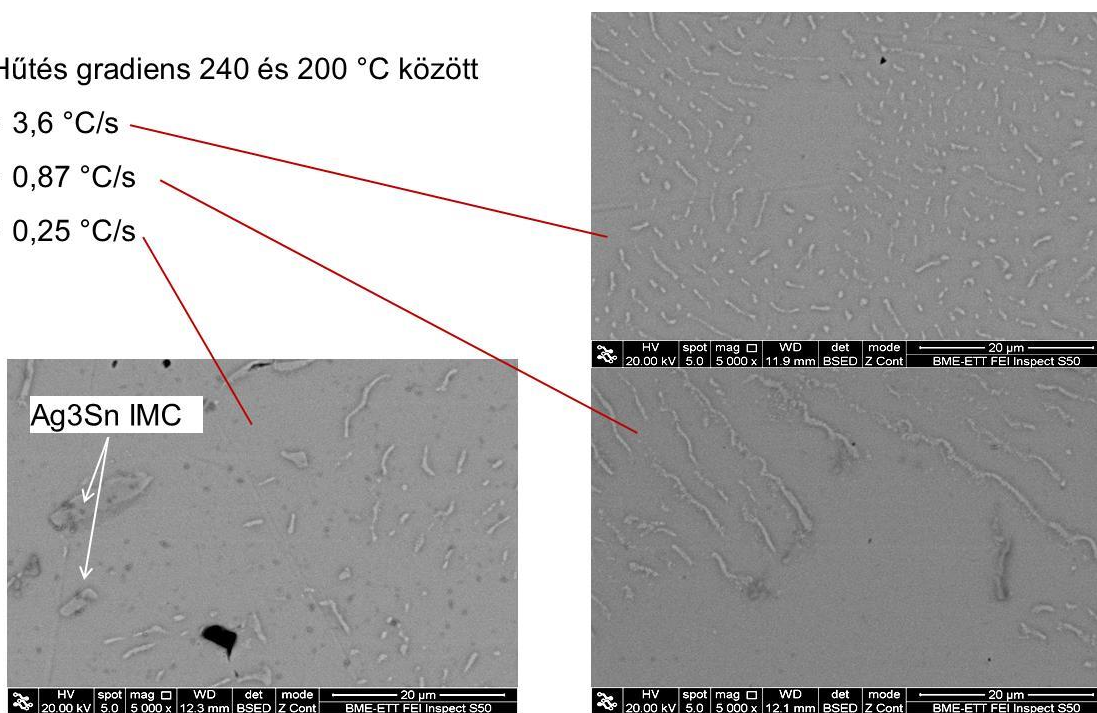


15. ábra. BGA kötés repedése – shrinkage defect

A hibajelenség kialakulásának oka az, hogy az Ag_3Sn intermetallikus kialakulási formája függ a forrasztás hűtési rátájától. Megfelelően gyors hűtésnél ($>3 \text{ K/s}$) szemcseszerűen válnak ki, és erősítik a kötetst; lassabb hűtésnél ($<1.5 \text{ K/s}$) pálcika-szerűen válik, míg nagyon lassú hűtésnél ($\ll 1.5 \text{ K/s}$) szigetszerűen válnak ki (16. ábra). Ezek az Ag_3Sn szigetek nagyon ridegek, és hőmérsékletváltozás esetén nagyon könnyen reped-törnek ezen területeknél a kötés a hőtágulási együttható különbségeiből kifolyólag. Megjegyzés: az alkatrészek hőkapacitása a hűtést is befolyásolja, nem csak a melegedést. Nagy hőkapacitású alkatrészek (BGA tokozás, TH csatlakozó) lassabban tudnak hűlni, és a zsugorodási hibajelenség könnyebben alakul ki.

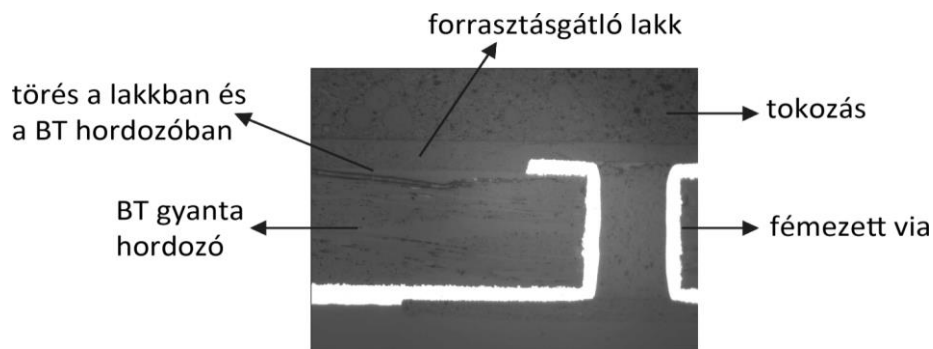
Hűtés gradiens 240 és 200 °C között

- 3,6 °C/s
- 0,87 °C/s
- 0,25 °C/s



16. ábra. Az Ag_3Sn intermetallikus vegyület kialakulási formája különböző hűtéseknel

BGA tokozású alkatrészek szerelésénél figyelembe kell vennünk az MSL-t (Moisture Sensitivity Level). Ez határozza meg, hogy a kibontás után mennyi időn belül kell beforrasztani az alkatrészeket. Illetve azt, hogy a kicsomagolt, de be nem forrasztott alkatrészeket a későbbi forrasztás előtt mennyi ideig kell szárítani. Be nem tartása esetén deformáció, delamináció (17. ábra) és törés jöhet létre a tokban (popcorn). A javasolt szárítási paramétereket különböző MSL szintekre az 1. táblázat tartalmazza. Megfigyelhető, hogy viszonylag hosszú, 1-2 napos szárítási időtartamokat írnak elő a szabványok, így az egy logisztikai kérdés is, hogy az alkatrészek szárítva rendelkezésre álljanak, amikor az adott szerelvény szerelése ütemezve van.



17. ábra. Törés, delamináció BGA tokozású alkatrész újraelosztó-hordozójában

1. táblázat. Szárítási paraméterek különböző MSL szintek esetére

MSL szint	Szárítás nélkül felhasználható	Szárítás (125 °C) 1.4 mm vastag tok	Szárítás (125 °C) 2 mm vastag tok	Szárítás (125 °C) 4 mm vastag tok
MSL 6	Kötelező szárítani	28 óra	48 óra	48 óra
MSL 5A	24 óra	28 óra	48 óra	48 óra
MSL 5	48 óra	24 óra	48 óra	48 óra
MSL 4	72 óra	21 óra	48 óra	48 óra
MSL 3	168 óra	16 óra	43 óra	48 óra

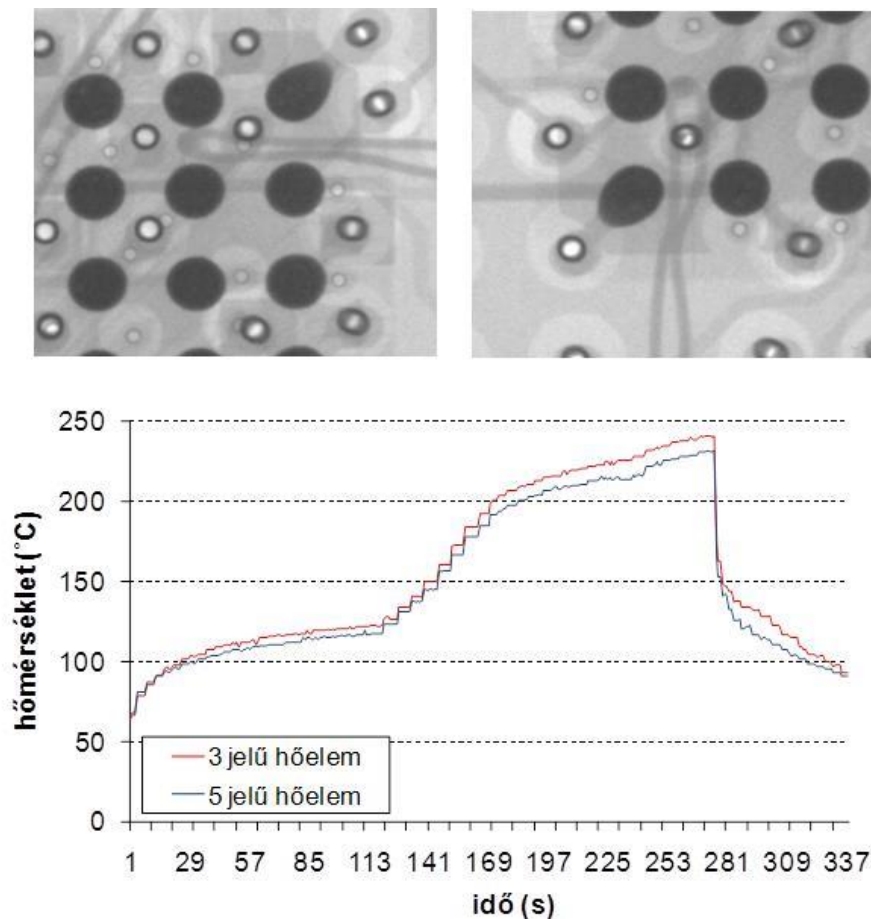
2.3.4. Hőprofil mérése

A hőprofil méréshez speciális mérőeszközt alkalmazunk, mely hőelemből, adatrögzítőből, hőálló dobozból, és egy adatfeldolgozó software-ből áll. Az SM alkatrészek esetén a hőelemeket a forrasztási felületekhez rögzítve – ragasztva, vagy magas olvadáspontú forrasszal forrasztva – tudjuk mérni a szerelőlemez forrasztása közben kialakult hőmérsékleti viszonyokat. Mindig több ponton mérnek egyszerre (4-16 csatorna), és általában tesznek hőelemet a következő típusú lokációkra: kis

hőkapacitású alkatrész; nagy hőkapacitású alkatrész; PIP csatlakozó, ha van; érzékeny alkatrész (BGA), akkor a tokjára; szerelőlemez felszíne – és ezekből többet is kiválasztanak.

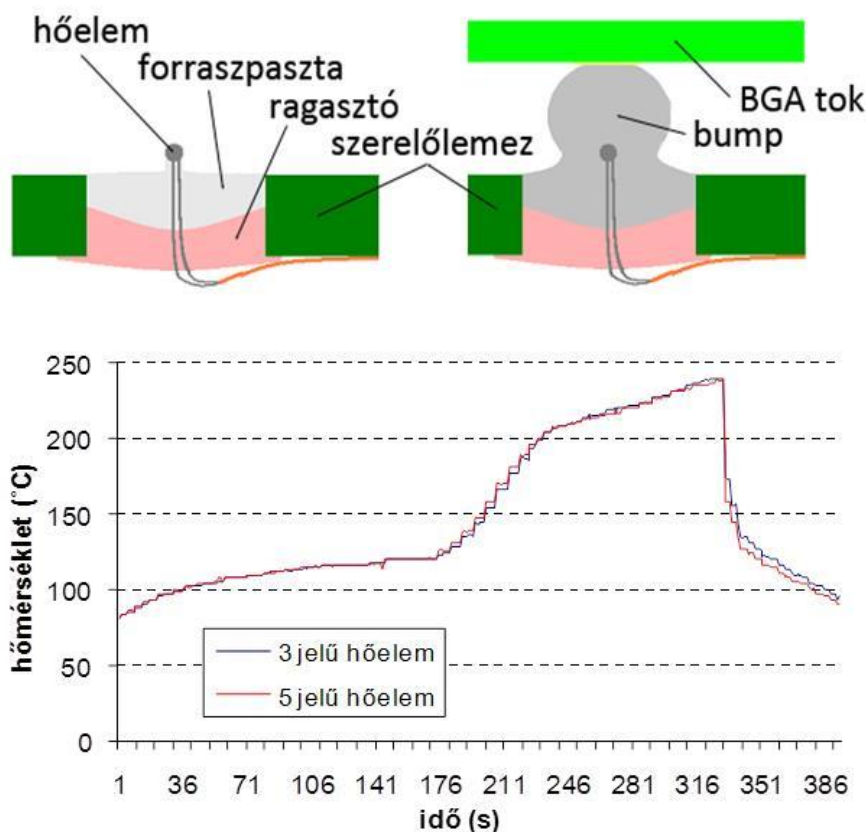
BGA tokozású alkatrészek esetén a forrasztó hőmérsékletét két félre elrendezésben is mérhetik. A hőelemet a bumpok közé teszik, vagy a hőelemet beforrasztják a bumpba.

Az első elrendezés esetén előny a könnyű felhelyezhetőség (18. ábra), hátrány az akár 5–10 °C-os mérési hiba (kék és piros vonallal jelzett mérés közötti különbség), mivel a termikus csatolás nem tökéletes a termoelem és a bump között.



18. ábra. Hőprofil mérés a bump-ok közé helyezett termoelemmel

A második esetben bonyolult a hőelem felhelyezése, a szerelőlemezbe furatot kell készíteni, és a termoelemet először be is kell ragasztani.. Azonban valóban a bump hőmérsékletét mérjük; a mérési hiba összemérhető a termoelemek mérési bizonytalanságával: $\pm 0,5-1$ °C (19. ábra).

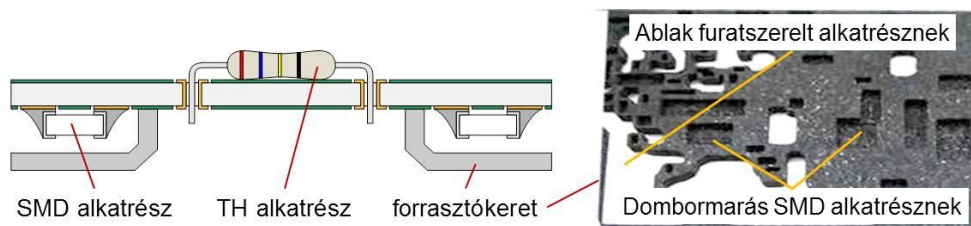


19. ábra. Hőprofil mérés a bump-ba beforrasztott termoelemmel

2.4. Szelektív hullámforrasztás

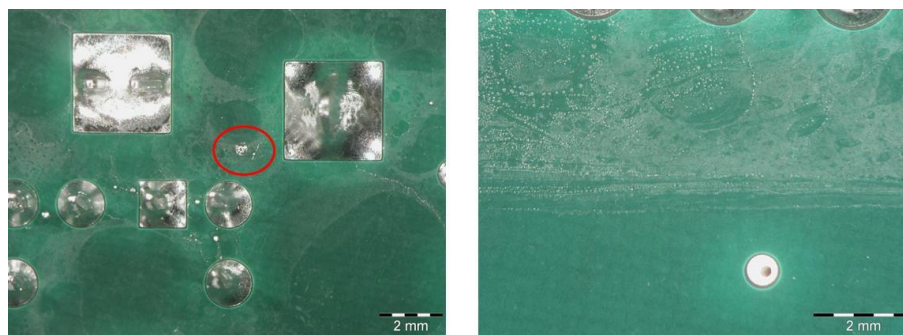
Szelektív hullámforrasztás esetén a felületszerelt és furatszerelt alkatrészeket egyaránt tartalmazó áramkörök esetén a felületszerelt alkatrészeket újraömlesztési forrasztási technológiával, a furatszerelt alkatrészeket pedig valamilyen szelektív forrasztási technikával szerelik. A szelektív forrasztásnál a forraszanyag csak a furatszerelt alkatrészek kivezetéseit éri. Legelterjedtebb szelektív hullámforrasztási technikák a keretes szelektív hullámforrasztás, a bélyeges forrasztás, és a kéményes szelektív hullámforrasztás.

Keretes szelektív hullámforrasztás esetén a forrasztást hagyományos hullámforrasztó berendezéssel végzik, szerelőlemez alján lévő felületszerelt alkatrészeket fém maszkkal védik, melyen ablakokat alakítanak ki a furatszerelt alkatrész kivezetéseinek megfelelően (20. ábra). Nagy termelékenység jellemzi, mivel a hagyományos „nagy” hullámforrasztó berendezést alkalmazzák.



20. ábra. Keretes szelektív hullámforrasztás

A keretes szelektív hullámforrasztási technika hibája az esetlegesen visszamaradó szennyeződések, illetve folyasztószer-maradványok, melyeket az okoz, hogy a fémkeret nagy hőkapacitása miatt a folyasztószer nem tud megfelelően aktiválódni (21. ábra). A folyasztószer-maradványok csökkentik a szerelőlemez szigetelési ellenállását (SIR – surface insulation resistance), illetve nagyfrekvenciás alkalmazásoknál nagyobb mértékű szivárgási áramokat okozhat.



Visszamaradó szennyeződések;
forrasz és folyasztószer
maradvány

A forrasztókeret ablakinak éleinek
megfelelően folyasztószer
maradványok figyelhetők meg

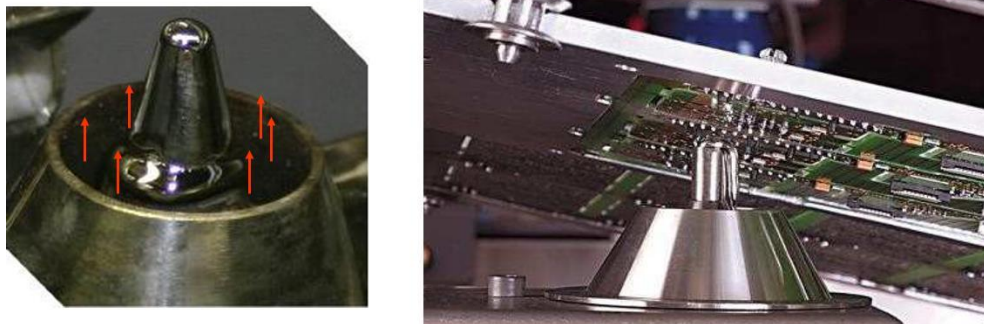
21. ábra. Szennyeződések, és folyasztószer aktiválási hibák keretes szelektív hullámforrasztásnál

Bélyeges szelektív hullámforrasztáshoz olyan forrasztószerszámot alkalmazunk, mely a szerszámtestre erősített bélyegeket (apró vályúkat) tartalmaz (22. ábra). A szerszámtest a bélyegekkel együtt olvadt forraszt tartalmazó kádba merülve helyezkedik el. A forrasztás során a szerszámtest a bélyegekkel együtt kiemelkedik a forraszfürdőből. A bélyegek a rajtuk kialakított mélyedések segítségével olvadt forrasztanyagot emelnek ki a kádból, és mivel nem nedvesíthető anyagból készült a vályú ezért a forrasz golyóvá ugrik össze, melyet a furatszerelt alkatrészek kivezetőihöz érintünk, és így jön létre a forrasztandó kötés. A bélyeges forrasztás előnye, hogy gyors (nem annyira, mint a keretes), nincs folyasztószer maradvány, hátránya, hogy minden gyártmányhoz külön bélyegszerszám kell.



23. ábra. Bélyeges szerszám szelektív hullámforrasztáshoz

Kéményes hullámforrasztás során pedig speciális forrasztófejjel pontszerű forraszhullámot állítunk elő. Ezt a pontszerű forraszhullámot a forrasztási helyek alá pozícionálva, kivezetőnként létrehozuk a forrasztott kötéseket (24. ábra). Előzetesen a folyasztószer felvitele történik ugyanabban a berendezésben. Kéményes hullámforrasztásnak az előnye, hogy nincs folyasztószer maradvány, hátránya, hogy nem annyira termelékeny (kb. 5 db kéményes hullámforrasztó berendezés termelékenysége ér fel egy keretes gépével), viszont sokkal takarékosabb.



24. ábra. Kéményes szelektív hullámforrasztás (minihullám-forrasztás)