



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Elektronikai Technológia Tanszék

Havellant Gergő

**ENERGIAHATÉKONY GŐZFÁZISÚ  
FORRASZTÁS OPTIMALIZÁLÁSA  
STACK-MÓDBAN, A TERMELÉKENYSÉG  
NÖVELÉSE ÉRDEKÉBEN**

Tudományos Diákköri Dolgozat

KONZULENS

Dr. Géczy Attila

BUDAPEST, 2023

# TARTALOMJEGYZÉK

Kivonat .....	4
Abstract .....	6
1. Bevezetés.....	8
1.1 Motiváció.....	8
2. Szakirodalmi áttekintés .....	9
2.1 Az újraömlesztéses forrasztás folyamata.....	9
2.2 A gőzfázisú forrasztás bemutatása .....	11
2.3 A laboratóriumban a kísérlethez elérhető berendezések .....	14
2.3 Gőztér tulajdonságai – korábbi kutatásaim .....	15
2.4 A „Stack” forrasztás lehetősége .....	15
2.5 Újraömlesztéses hőprofilok .....	17
3. Bevezető vizsgálatok.....	18
3.1 Gőztér vertikális vizsgálata – olvadási teszt.....	18
3.2 Tálca vizsgálata .....	19
3.3 Rács tervezés .....	21
3.4 Tesztpanel – végleges stack elrendezés.....	22
4. Mérés menete .....	23
4.1 Összefoglalás .....	23
4.2 Golden sample – lapos forrasztás .....	24
4.3 Stack-elt forrasztás .....	25

4.4 Rács használata – lapos forrasztás .....	26
4.5 Rács használata – stack-elt forrasztás .....	27
5. Vizsgálati eredmények .....	28
5.1 Hőprofilok összehasonlítása .....	28
5.2 Letolási teszt eredmények .....	29
5.3 Keresztcsiszolati kép vizsgálata .....	32
6. Összefoglalás.....	37
7. Köszönetnyilvánítás .....	39
8. Irodalomjegyzék.....	40

## Kivonat

Az elektronikai felületszerelés megvalósításához, és a folyamat részeként, az újraömlesztéses forrasztási lépés elvégzéséhez, több lehetőség közül választhatunk. Ennek egyik eszköze a gőzfázisú forrasztás, melynek nagy előnye, hogy teljes mértékben kontrollálni tudjuk a maximális hőmérsékletet és egységes hőeloszlást tudunk vele elérni a hordozó felületén, jó energiahatékonysággal. A forrasztási technológia ezen fajtája optimális beállításokkal a fenntartható szereléstechológiákért folytatott küzdelemben is nagy kvantitatív előrelépést adhat.

Hátránya, hogy gyártósorba nehezebben integrálható és az egyszerre forrasztható PCB-k számát a berendezésben található tálca mérete határozza meg. Ebben a konfigurációban a termelékenységet csakis a tálca méretével tudjuk növelni. Ennek hatására a berendezés fizikai méretei megnőnek, ezzel a berendezés költsége is növekszik, illetve a működéshez használandó Galden folyadék mennyisége is növekszik, ami tekintettel a folyadék igen magas árára, nem kedvez a gyártóegység számára.

Kutatásom során több módon is megvizsgáltam hogyan lehetne a termelékenységet növelni, úgy, hogy a már meglévő berendezéseinket használjuk, és abban csak minimális újrakonfigurációkat végzünk.

A kutatásom során „stack-elt” (másképpen, halmozott) hordozókon végeztem forrasztási tesztekkel és korábban, részben általam kifejlesztett szenzorfüziós vizsgálati módszerrel megvizsgáltam, hogy egy ipari gőzfázisú berendezésben milyen magasságig található meg gőztakaró, és az így kapott forrasztás módosult hőprofilja megfelel-e az alkatrészgyártók ajánlott hőprofiljainak.

A kutatás során saját tervezésű, csökkentett tömegű mintatartóval dolgoztam, és megvizsgáltam, hogy azonos beállítások mellett milyen hőprofilok állnak elő az egyes szinteken lévő PCB-k esetében, ebben az esetben, ha a jelentős tömegcsökkenéssel üzemel a berendezés. A kutatás egyik ágán az egyszerre forrasztható PCB-k számát kívánom növelni, míg a másik részén pedig a ciklusidőt rövidíteni, ezáltal szintén növelve a termelékenységet.

A kutatás során összevettem egy golden sample mintával a különféle konfigurációban keletkező forraszkötéseket és a forrasztás közben mért hőprofilokat. A mintán letörési tesztet

végeztem, amelynek eredménye megadja, hogy milyen minőségbeli, kvantitatív különbségek adódnak a különböző magasságokban történt forrasztások esetében.

A kutatás eredménye megmutatja, hogy növelhetjük-e ilyen módon a termelékenységet, tudunk-e érdemben segíteni a fenntartható szereléstechológiákra való törekvésekben, és hogy milyen hatással van a módosított konfiguráció a forrasztott kötés minőségére.

## Abstract

To achieve electronic surface mount, and as part of the process, to perform the reflow soldering step, there are several options to choose from. One of these is vapour phase soldering, which has the great advantage of being able to fully control the maximum temperature and achieve homogeneous heat distribution on the substrate surface with good energy efficiency. This type of soldering technology, with optimum settings, can also provide a major quantitative advance in the fight for sustainable assembly technologies.

Its drawback is that it is more difficult to integrate into a production line and the number of PCBs that can be soldered at a time is determined by the size of the tray in the equipment. In this configuration, productivity can only be increased by the size of the tray. The effect of this is to increase the physical dimensions of the equipment, which increases the cost of the equipment and the amount of Galden fluid required for operation, which, given the very high cost of the fluid, is not beneficial to the manufacturing unit.

In my research, I have looked at several ways to increase productivity by using existing equipment with minimal reconfiguration.

In my research, I performed soldering tests on "stacked" substrates and used a sensor fusion test method, partly developed by myself, to investigate the height of the vapour blanket in an industrial vapour phase machine and whether the resulting soldering heat profile corresponds to the heat profiles recommended by component manufacturers.

In this research, I used a reduced mass sample holder of my own design and investigated what heat profiles are generated for PCBs at each level under the same settings, in this case when the equipment is operated with a significant weight reduction. In one branch of the research, I aim to increase the number of PCBs that can be soldered at one time, while in the other part I aim to shorten the cycle time, thereby also increasing productivity.

During the research, I compared the solder joints produced in different configurations and the heat profiles measured during soldering with a golden sample. A shear test was carried out on the sample, the results of which will give an indication of the qualitative, quantitative differences in solder joints at different heights.

The results of the research will show whether we can increase productivity in this way, whether we can make a meaningful contribution to the drive towards sustainable assembly technologies, and what effect the modified configuration has on the quality of the soldered joint.

# 1. Bevezetés

## 1.1 Motiváció

Az elektronikai felületszerelés megvalósításához, és a folyamat részeként, az újraömllesztés forrasztási lépés elvégzéséhez, több lehetőség közül választhatunk. A tömeggyártásban általában az alagútkemencés konvekciós melegítést használják, de a forrasztás egy másik, alternatív eszköze a gőzfázisú forrasztás. Ennek nagy előnye, hogy teljes mértékben kontrollálni tudjuk a maximális hőmérsékletet és egységes hőeloszlást tudunk vele elérni a hordozó felületén, jó energiahatékonysággal. A forrasztási technológia ezen fajtája optimális beállításokkal a fenntartható szereléstechológiákért folytatott küzdelemben is nagy kvantitatív előrelépést adhat. Kvalitatív minősítés tekintetében pedig a vizsgálatokra a mai napig nagy az igény a különböző alkatrész méretek és a forrasztóanyagok bevezetése miatt.

A gőzfázisú forrasztás hátránya, hogy gyártósorba nehezebben integrálható és az egyszerre forrasztható PCB-k számát a berendezésben található tálca mérete korlátozza. Összefoglalva a kihozatal nem mindig felel meg a tömeggyártás követelményeinek. A gőzfázisú forrasztókemencék alapvető konfigurációjában a termelékenységet csakis a tálca méretével tudjuk növelni. Ennek hatására a berendezés fizikai méretei megnőnek, ezzel a berendezés költsége is növekszik, illetve a működéshez használandó Galden folyadék mennyisége is növekszik, ami tekintettel a folyadék igen magas árára, nem kedvez a gyártóegység számára.

Kutatásom során több módon is megvizsgáltam hogyan lehetne a termelékenységet növelni, úgy, hogy a már meglévő berendezéseinket használjuk, és abban csak minimális újrakonfigurációkat végzünk. Ez a motiváció a termelékenység javítása mellett egyben a fenntarthatóságra is mutathat pozitív fejlődési irányokat.



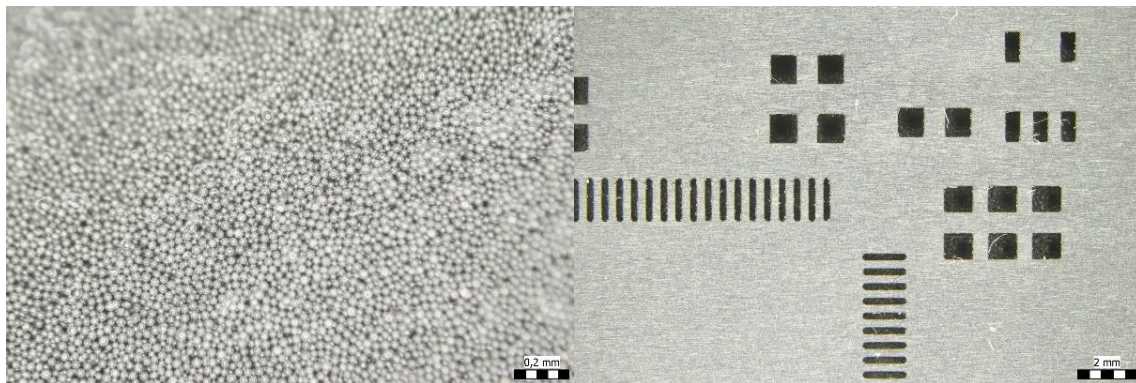
## 2. Szakirodalmi áttekintés

### 2.1 Az újraömlesztéses forrasztás folyamata

Az újraömlesztéses forrasztás a mai tömeggyártás alapvető technológiája. Az SMT (SMT - Surface mount technology – felületi szereléstechológia) gyártósorok eleme, amely során kialakítják a forrasztott kötést [1].

A forraszpaszta kicsi, jellemzően, típustól függően, 25-50  $\mu\text{m}$  átmérőjű forraszgolyócskákból és folyasztószerből áll (1. ábra). Ezt a pasztát a stencilnyomtatás során viszik fel szelektíven a hordozó felületére. A stencil (1. ábra) jellemzően 100  $\mu\text{m}$  vastag fémlemez, amelyen különféle technológiákkal apertúrákat nyitnak, amin keresztül lehet a pasztát a kontaktusfelületre vinni.

A technológia során pontosan összeillesztik a hordozót és a stencillemez, hogy az apertúrák a megfelelő helyre kerüljenek, ezután a nyomtatókés maga előtt görgetve a forraszpasztát végighalad a lemez felületén. Ennek során a paszta kitölti az apertúrákat. A hordozó és a stencil szétválasztása után a paszta csak a kívánt forraszfelületeken jelenik meg.



1. ábra: Forraszpaszta (balra), stencil lemez (jobbra)

Ezután történik az alkatrészek beültetése a megfelelő helyekre automatizált berendezések (2. ábra) segítségével. A berendezés vákuumpipetta segítségével fogja meg a megadott alkatrészt, amit X-Y irányba mozgatva a hordozó felületén lévő pasztába helyez.



2. ábra: Beültetőgép

A forrasztott kötés kialakításához a pasztát a forraszanyag olvadáspontja fölé kell melegíteni, ennek hatására a golyók megömlenek, a folyasztószer aktiválódik és a golyók egy homogén forraszanyaggá állnak össze. Ez a folyadék befutja (nedvesíti) a rendelkezésre álló felületet az alkatrészkivezetésen és a hordozón kialakított pad felületén. A hűtés hatására a forraszötvözet folyékony állapotból szilárdvá válik, létrejön az intermetallikus (IMC - Intermetallic Compound) réteg, és kialakul a kívánt forrasztott kötés.

Az újraömlesztéses forrasztás általánosan elterjedt fűtési módszerei három különböző hőtranszport folyamat segítségével történnek; az első az infravörös fűtés. Ezt a módszert számos kritika érte az egyenetlen hőmérséklet-eloszlás, a nehezen beállítható hőprofil és a különböző forrasztási hibák miatt [2]. A második és a tömeggyártásban legszélesebb körben alkalmazott újraömlesztéses forrasztási módszer a kényszerkonvekciós forrasztás, ahol a hőátadás szabályozott gázáramlással (inert gáz, nitrogén) történik elkülönített munkazónákban. [3]. A harmadik módszer a gőzfázisú forrasztás, másnéven Vapour Phase Soldering (VPS).

## 2.2 A gőzfázisú forrasztás bemutatása

A gőzfázisú forrasztás a kondenzáción keresztüli hőátadáson alapul. Az 1980-as évek után ez a technológia kikerült a figyelem középpontjából. Ennek oka az eljárás során használt hőátadó közegben lévő káros anyag volt [4]. Napjainkban az inert és kémiaiilag stabil PFPE-alapú (PFPE - Perfluor-poliéter) Galden-folyadékok [5] lehetővé teszik a tisztább gőzfázisú forrasztást [6]. A VPS-eljárás során a hőátadó közeg (Galden) gőze a kemence aljában oszlik el [7], és a hidegebb nyomtatott huzalozású lemez (PCB) ebbe a gőztérbe merül bele. A hőátadás akkor következik be, amikor a hideg PCB felületén kondenzáció indul meg. Belátható, hogy ebben a rendszerben a hőmérséklet nem tud a forráspont fölé emelkedni amíg folyadék fázisban található Galden a tartály alján, mivel az összes betáplált energia a forrás fenntartására fordítódik.

A VPS újbóli megjelenése során különböző új kemence-konstrukciók és vezérlési elvek jelentek meg a piacon. Ezek egyike a "hőszinten" alapuló (HL – Heat Level) VPS-megközelítés [7]. Először a hordozót egy tálcára helyezik a tartály tetején vagy oldalán. Ezután a tartály lezárásra került és a PCB-t leeresztik a kemencében lévő gőztérbe. A legalapvetőbb „standard” VPS-eljárások során a tartályban már ekkor telített gőz van jelen. Ahogy a tálca leér az alsó pozícióba, a gőz elkezd kicsapódni a felületre. A forrasztási folyamat szabályozása a tartály különböző magassági pontjain lévő hőmérséklet szenzorok mérésein alapul. Ezek visszajelzést adnak a hőátadó közeg hőmérsékletéről. A mérési pontok általában a forrásban lévő folyadékban, a lemez szintjén, és a forrasztási szint felett egy meghatározott magasságban helyezkednek el. Ha a lemez szintje felett megnövekedett hőmérséklet mérhető, akkor abból következtetni lehet arra, hogy a gőz e függőleges pozíció felett már jelen van, mert a tálca már nem von el jelentősebb mennyiségű gőzt a kondenzációval. A túlhaladó gőz tehát felmelegíti a felső hőelemet, és egy beprogramozott késleltetés után a kemence leállítja a forrasztási folyamatot. Végül a nyomtatott áramkört a tálcával együtt a betöltési magasságba emeli. Egy forrasztási ciklus összesen 10-25 percet vesz igénybe a kemence állapotától függően. Az SMT technológia és a gőzfázisú forrasztás sematikus rajza a 3. ábrán látható.

## SMT lépései

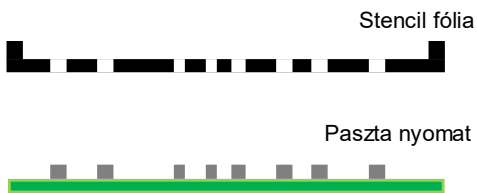
a.) Nyomtatott áramköri hordozó



PCB



b.) Forraszpaszta nyomtatás



Stencil fólia

Paszta nyomat

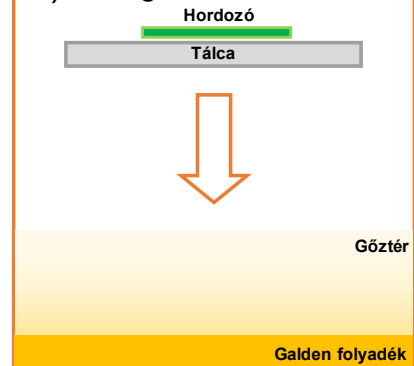
c.) Automatikus alkatrész beültetés



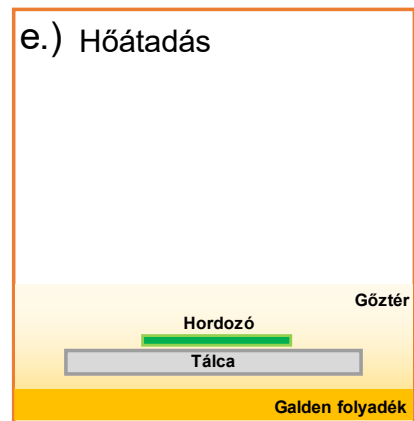
Beültetőfej

## VPS lépései

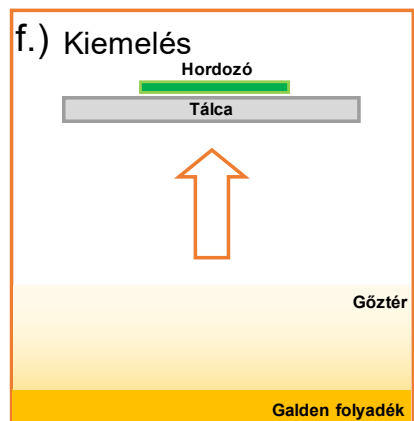
d.) Leengedés



e.) Hőátadás



f.) Kiemelés



3. ábra: A technológia lépései

A galdengőz koncentrációja és az ebből következő telített gőzoszlop a forrás miatt alulról növekszik. A galdengőz térfogatsűrűsége 20-szor nagyobb, mint a levegő sűrűsége. A telítetlen

gőzök (levegő-Galden keverék) is képesek nem elhanyagolható mennyiségű energiát tárolni. Így ennek a keveréknek az energiája még mindig elegendő lehet a munkaterületet figyelő hőmérséklet-érzékelők felmelegítéséhez. Ez a probléma vezette a tanszéki kollégákat, amikor az érzékeny, differenciális áramlásérzékelős nyomásmérést szabványos VPS-kemencékben valósították meg [8]. A nyomásmérésen alapuló vezérlés növelheti a termelékenységet [9] a kemencék üresjáratú idejének csökkentésével.

A VPS hőátadása a következő modellel írható fel (1 és 2):

$$\frac{dQ_b}{dt} = h \cdot A \cdot (T_{sat} - T_b) \quad (1)$$

$$\overline{h_{L\_VPS}} = 1.079 \cdot \frac{k_l}{L} \cdot \left( \frac{h_{lv} \cdot \rho_l(T_{REF}) \cdot (\rho_l(T_{REF}) - \rho_v) \cdot g \cdot L^3}{(T_{sat} - T_b) \cdot \mu_l(T_{REF}) \cdot k_l} \right)^{\frac{1}{5}} + \left( \frac{0.90 \cdot k_l \cdot (Ra')^{\frac{1}{6}} \cdot \sqrt{g \cdot (\rho_l(T_{REF}) - \rho_v)}}{\left( 1 + 1.1 \cdot (Ra')^{\frac{1}{6}} \right) \cdot \sqrt{\sigma}} \right) \quad (2)$$

ahol  $Q_b$  a testet érő hőenergia [J],  $h$  a hőátadási együttható [W/m<sup>2</sup>K],  $A$  maga a felület, ahol a VPS filmszerű kondenzációja történik [m<sup>2</sup>],  $T_{sat}$  a telített gőz hőmérséklete,  $T_b$  a melegített test hőmérséklete [°C]. Az első képletben (1) a hőátadási együttható a lényeg, melyet a bonyolult (2)-es képlet fejezi ki, melynek levezetése a [10]-ben található. (Jelen dolgozatban nem megyek bele mélyebben a részletekbe, viszont a paramétereket itt is érdemes bemutatni.) A (2) es képletben a következő paraméterek szerepelnek (indexek lentebb):  $h$  a hőátadási együttható, mint (1)-nél,  $k$  a hővezetési együttható [W/mK],  $L$  a kondenzáció karakterisztikus hossza, a panelre jellemző dimenzió [m],  $h_{lv}$  a látens hő [kJ/kg],  $\rho$  a sűrűség [kg/m<sup>3</sup>],  $g$  a gravitációs állandó [m/s<sup>2</sup>],  $\mu$  a dinamikus viszkozitás [kg/ms]. Ezen túl az indexek: L\_VPS (L karakterisztikus hosszúságú panel hőátadása VPS-nél), REF (referencia), sat (telített), b (test), v (gőz), l (folyadék).

Tehát elmondható, hogy a gőzfázisú forrasztást igen kontrollált hőmérsékleten végezzük, a Galden folyadék forráspontja és a telített gőz jelenléte, és az ebből kicsapódó kondenzátum határozza meg a forrasztási hőmérsékletet. Ez előnyös abban az esetben, ha egy-egy alkatrész érzékeny a magasabb hőmérsékletre. Itt nem jelentkezik az infra forrasztásnál megfigyelhető hőmérsékletkülönbség, sokkal egyenletesebb hőmérsékleteloszlás alakul ki a hordozó felületén. Hátránya, hogy gyártósorba nehezebben integrálható és vannak olyan alkatrészek, jellemzően szenzorok, amelyekhez nem ajánlják a gőzfázisú forrasztást.

## 2.3 A laboratóriumban a kísérlethez elérhető berendezések

Az Elektronikai Technológia Tanszéken kettő ipari gőzfázisú forrasztóberendezés található.

A közepes méretű ASSCON Quicky VP450-es [11] berendezés kifejezetten kutatási célra, tesztelésre és prototípus gyártásra alkalmas. Tálca mérete 45x45cm-es, fűtése 3 kW, a működéshez szükséges Galden mennyisége 2,5kg.

A tanszék laboratóriumában elérhető legnagyobb berendezés az ASSCON VP800 (4. ábra) [12]. Ennek tálcamérete 48x29,5 cm, átlagos fűtésteljesítménye 2,7 kW, a működéséhez szükséges Galden mennyiség 15 kg. Ez a berendezés rendelkezik egy kiegészítő egységgel, amivel a forrasztás végén vákuumot képes előállítani a forrasztási térben. A még folyadék állapotban lévő forrasz anyagból ezáltal kiszívja a levegőt, tehát a zárvány (void) képződést csökkenti [13].



4. ábra: ASSCON VP800

## 2.3 Gőztér tulajdonságai – korábbi kutatásaim

Korábbi kutatásaim során vizsgáltam a gőzfázisú kemence felépítését és a benne található gőztér viselkedését különös tekintettel a bent uralkodó nyomásviszonyokra. A nyomás alapú vezérlés új lehetőségeket nyitna meg a ciklusidő csökkentésével, a hőmérséklet mérés miatt fellépő holtidők kiküszöbölésével. Mind az itt említett irány és mind ezen kutatás célja, hogy a forrasztási minőség megtartása mellett tudjuk a folyamatot gyorsítani, ezzel energiahatékonyabbá tenni a technológiát.

A kutatás során sikerült a berendezésben található nyomást megmérni [14]. Ez a nyomás 20-25 Pa érték között mozog a berendezésben, ahol a tálca feletti gőzteret vizsgálja a nyomáscső. Ez az érték a gőztér hidrosztatikai nyomása alapján kb. 8-10 cm magasságú gőzternek felel meg. Ez összhangban van azzal, hogy a berendezésben a tálcához képest nyolc centiméterre helyezték el a hőelemet.

A berendezés automatikusan dönt a forrasztási ciklus befejezéséről. Ehhez a felső hőmérő jelét használja. Azáltal, hogy a gőzbe merítjük a tálcát vele együtt a forrasztandó hordozót, a gőztér összeesik és ennek hatására a mért hőmérséklet folyamatosan csökken. A hőátadás hatására a hordozó és a tálca felmelegszik és a gőztér további épülésnek indul a tálca felett. Ekkor a felső hőmérő által mért érték is növekedésnek indul az újra jelen lévő gőztér miatt. A berendezés ezt az újbóli növekedést érzékeli és így dönt a folyamat befejezéséről. Tehát nincs fix hőmérséklet értékhez rögzítve a folyamat befejezése: a felső hőmérő által mért érték folyamatosan csökken a gőztér hiánya miatt, majd az idő előrehaladtával újra megjelenik a gőztér ami elkezd melegíteni a hőelemet. Így tehát lesz egy lokális minimum értékünk hőmérséklet görbén, és ehhez képest ha a hőmérséklet érték növekedése 5 °C-ot eléri, vége a folyamatnak.

## 2.4 A „Stack” forrasztás lehetősége

Az újraömlésztéses forrasztás elvégzéséhez többféle lehetőség közül választhatunk. Az iparban legelterjedtebb alagút kemencék forrólevegős vagy inert gázos hőátadó metódusa [15] alkalmatlan egymásra helyezett PCB forrasztására. A felül elhelyezkedő PCB-k takarást jelentenek az alatta elhelyezkedő hordozók számára, így nem lesz megfelelő a hőátadás az alsó-belsőbb rétegek esetén. Abban az esetben, ha oldalról irányítjuk a hőátadó közeget, a PCB



felületével párhuzamosan érkezik a gáz, és nem lesz megfelelő a hőátadás figyelembe véve, hogy elenyésző az alkatrészek oldalsó felülete a PCB teljes felületéhez képest.

Ha az infrasugaras kemencét [15] vesszük számításban szintén a kitakarással találkozunk, csak a legfelső panelnél lesz megfelelő a hőátadás.

Gőzfázisú forrasztás esetén ezek a problémák nem lépnek fel, mivel a gőztér minden irányból körül veszi a hordozókat. A rétegek között is folyamatos az energia beáramlása, mivel a lecsapódó galdengőz folyadékká válik, és maga helyére újabb gőzteret húz.

Láthatjuk, hogy a gőzfázisú berendezésben elméletileg van lehetőségünk egymásra helyezett stack-elt (innenről „stack”) forrasztás kivitelezésére, de néhány korlátot számításba kell vennünk.

A legelső legalapvetőbb fizikai korlátozás az adott berendezésben, hogy a berendezés elején található betöltő nyílás magassága 9 cm. Ennél magasabb stack nem helyezhető a tálcára. A nyomásmérés eredményéből tudjuk, hogy a tálca fölött 8-10 cm gőztér található, tehát elméletileg ennyi lehetőségünk van a stack kialakítására. Viszont figyelembe véve a berendezés működését, hogy a felső hőmérő nem vár a galden forradáspontjának eléréséig, csupán addig ameddig a hőmérséklet emelkedése megkezdődik, nem használható tehát a teljes gőztér forrasztásra, csak az ez alatt található térrész.

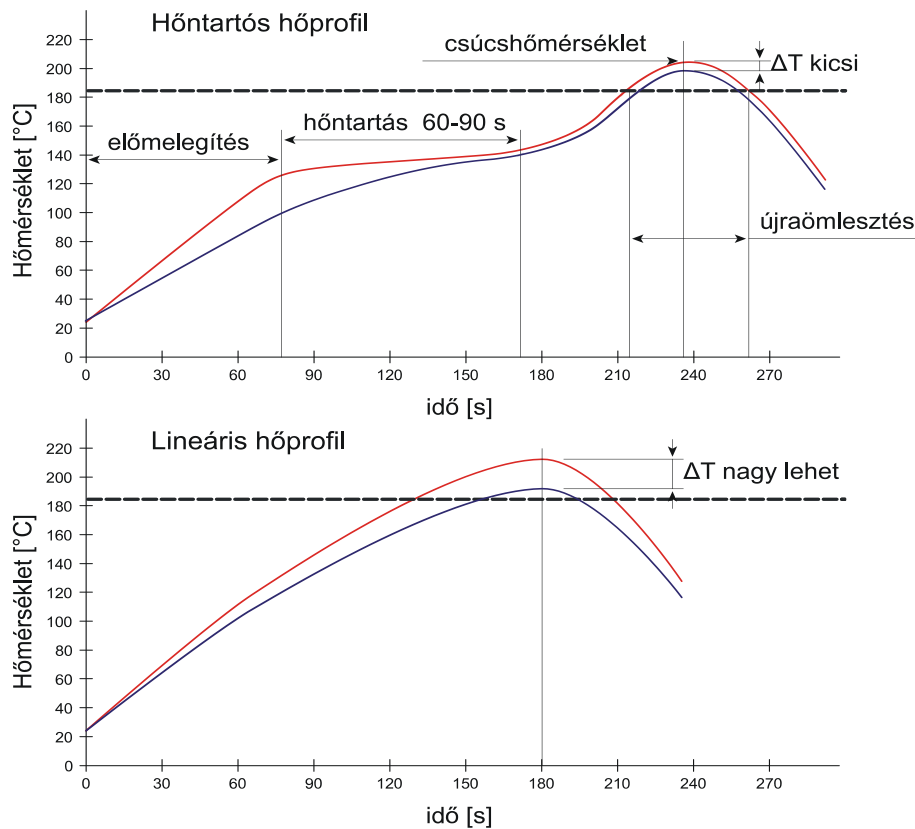
Elmondhatjuk, hogy az eddigi kutatásaim alapján és a berendezés működésének megismerése után be lehet határolni a stack (5. ábra) elméleti magasságát, amely mindenképpen 8 cm alatt található. Ezek után a berendezésben vizsgáltam tovább a ténylegesen használható hőátadó gőztér részt.



5. ábra: Lehetséges forrasztás stack módban



## 2.5 Újraömlesztéses hőprofilok



6. ábra: A két jellemző hőprofil [16]

Két hőprofil láthatunk a 6. ábrán. Az egyik a hőntartós profil, amely a kényszerkonvekciós és infra kemencék jellemző beállítása. Kényszerkonvekciós kemencében külön fűtőzónák találhatóak, ezek között futószalag szállítja a hordozókat. Infra fűtés esetén a fűtőcsövek teljesítményszabályozásával érik el a kívánt profilt. Előnye, hogy a hőntartás szakasz hatására a hőmérsékletek kiegyenlítődnek a hordozó felületén.

A gőzfázisú forrasztás során inkább a lineáris vagy legalábbis ahhoz hasonló hőprofil valósul meg. Bár vannak törekvések a hőntartásra a VPS során is, például ezt szolgálja a két lépéses tálcámozgatás is a VP800-ban, de ennek ellenére inkább lineáris profilról beszélhetünk. A lineáris profil hátránya, hogy a különböző alkatrészek hőmérsékletei nem tudnak kiegyenlítődni, de ez a gőzfázisú forrasztás során nem jelentkező probléma, mivel itt egységes a hőátadás a kondenzáció formájában a hordozó teljes felületén.

## 3. Bevezető vizsgálatok

### 3.1 Gőztér vertikális vizsgálata – olvadási teszt

Első mérés során kétféle stack elrendezésen végeztem megömlésvizsgáló tesztek (7. ábra). A PCB-k felületére pasztát helyeztem és ezeket stack-ben rendeztem el.

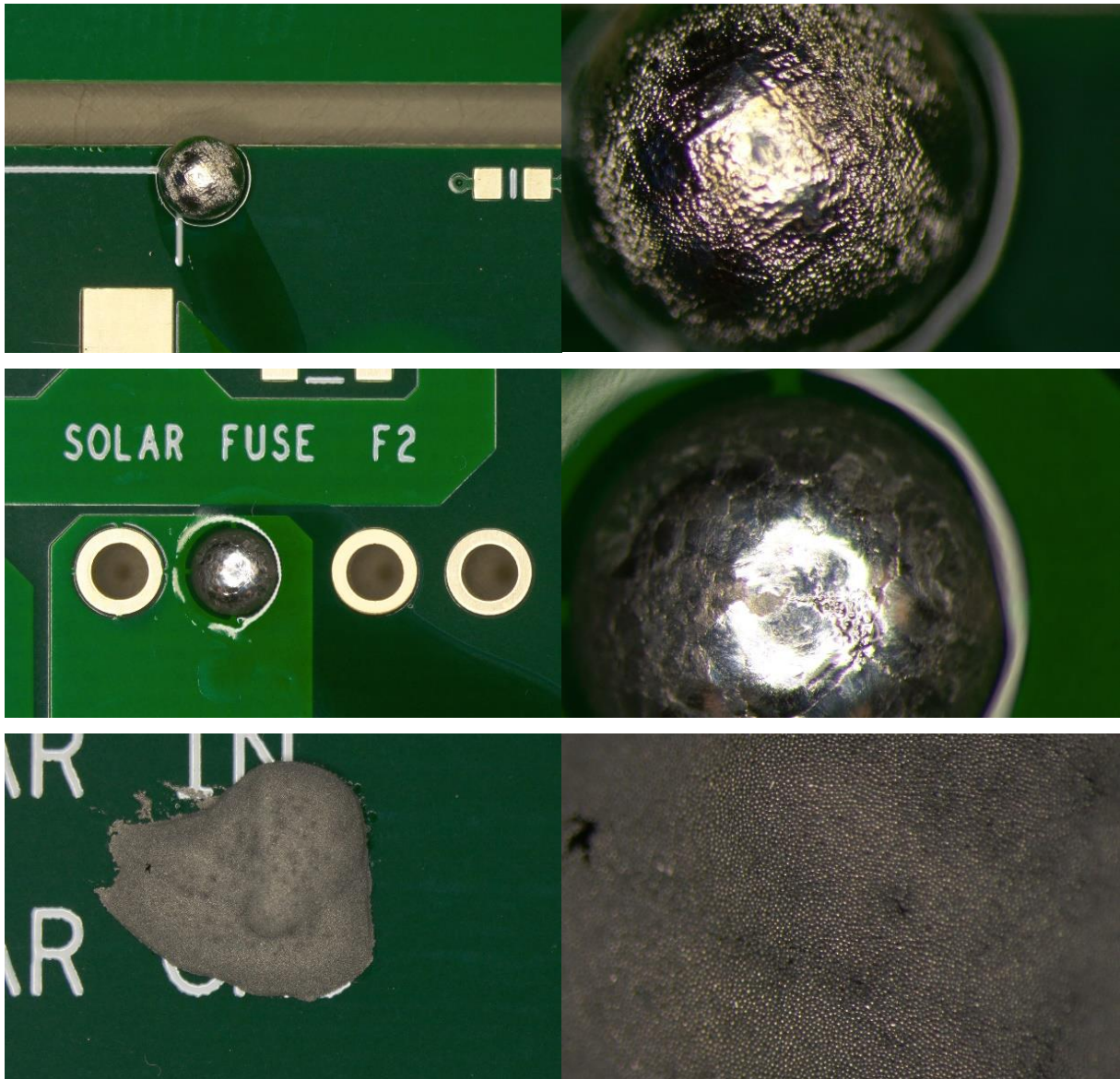
A stack minden esetben egy csavarfejjel kezdődik alulról felfele haladva, ez rögzíti a távtartót az alsó hordozóhoz. A csavarfej magassága 2 mm. A panelek vastagsága 1,6mm.

Az első teszt során 5 PCB-ből stack-et állítottam össze, ahol 20 mm-es távtartót használtam. Ebben az esetben az alsó 3 PCB felületén olvadt meg a paszta, a többin teljesen kiszáradt. Ennek eredményeképp megállapítottam, hogy a forrasztási magassági határ 47 és 67 mm között található.

Ezután finomítottam és 6 PCB álló, de ezúttal 10mm magasságú távtartót használó stack-et készítettem. Ebben a konfigurációban az alsó 5 PCB-n olvadt meg a forrasz. Ebből az eredményből arra következtettem, hogy 50-60 mm között található a határ.

Nincs értelme a határon vizsgálni, mivel forrasztási minőséget szeretnék vizsgálni a bizonytalan kimenetelű forrasztás pedig egyáltalán nem tartozik a minőségi forraszkötés közé.

Ezért a meghatározott határ értékeinél kisebb értékkel folytattam a továbbiakban; egy 3 PCB-ből álló 20 mm-es távtartót használó stack-et használtam. Így a stack teljes magassága 47 mm. Ennek gyakorlati előnye sem elhanyagolható: a tanszéken három csatornás V-Mole hőmérséklet profilozó található, így ennek segítségével egyszerre tudtam a 3 szint hőprofilját mérni.



7. ábra: Megömlési teszt eredményei: Felső: legelső PCB; Középső: 5. PCB; Alsó: 6. PCB, ahol már nem olvadt meg a paszta

### 3.2 Tálca vizsgálata

A gyakorlati tapasztalatból tudjuk, hogy a berendezés bekapcsolása után hiába, hogy a benne lévő Galden folyadék felmelegedett és a berendezés azt jelzi, hogy készen áll forrasztási ciklusra, ennek ellenére a legelső forrasztási ciklus legtöbb esetben nem az automatikus folyamat befejezéssel ér véget. A szoftver tartalmaz egy 600 másodperces biztonsági számlálót, ha a forrasztási ciklust az automatikus vezérlés nem állítja le akkor ez a számláló fogja ezt megtenni. Ebből láthatjuk, hogy a felső hőmérő mért értéke nem fordul vissza, tehát ebben a magasságban nem található gőztér 600 másodperc végére sem az első forrasztási ciklusban.

Ez a probléma csak a bekapcsolás utáni első ciklusnál jelenik, ennek kiküszöbölésére bevezettük az üres ciklus elnevezést, tehát minden gyártás előtt egy ciklust „üresen megy” a berendezés.

Viszont felmerült a kérdés, hogy mi okozza ezt a jelenséget. A berendezés igen szigetelt egymásba ágyazott dupla tartállyal van ellátva. Az alsó térrészben található a hőátadó folyadék és a gőzközeg, ide ereszkedik le a lift a ciklus során, a hordozó cseréhez pedig a felső állásban található meg a lift.

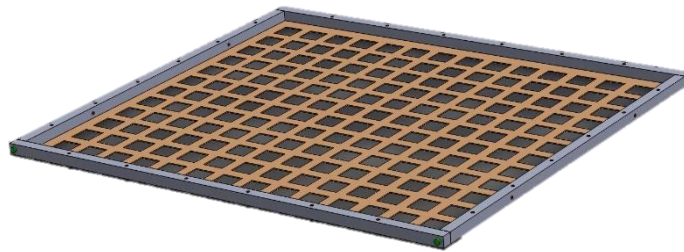
A kettő térrész között csapóajtó található, amely célja, hogy a be, illetve kitöltés esetén a gőzteret leválassza a felső résztől, így a szivárgást minimálisra csökkentse. Viszont ez az oka annak, hogy a felső térrész, hideg indítás során nem tud felmelegedni, hiába meleg a berendezés alja.

Más probléma, hogy a benne található lift össztömege meghaladja a 4,5 kg-ot. Ebből csak a tálca 4,4 kg-ot tesz ki, amely tömör egy centiméter vastag alumínium tömbből áll. Ennek felmelegítésére több energia szükséges, cserébe a felhúzás után a felső térrészt is felmelegíti.

Felmerül a kérdés miért használnak ekkora méretű hőelvonó közegként megjelenő tálcát a berendezésben. A válasz a vákuumozó egység, amely egy harag formájában ereszkedik a tálcára a forrasztási ciklus végén annak érdekében, hogy csökkentse a zárványok kialakulását. Ehhez szükséges a tömör tálca, mivel csak így képes a vákuumot létrehozni. A kisebb VP450-as berendezésben tálca helyett egy rács található, illetve a VP800-as berendezés is kapható vákuumozó egység nélkül, amely szintén egy kisebb tömegű rácsot használ.

A berendezés gyártója forgalmaz utólag is rácsot a berendezéshez, ami igen drága így a saját megvalósítás mellett döntöttem. A vákuumot jelenleg egyébként sem használom a kísérletemben.

### 3.3 Rács tervezés



8. ábra: 3D terv a készülő rácsról

A rács (8.-9. ábra) 10x10 mm-es alumínium keretből áll, amely külső méretei megegyeznek a gyári tálca méreteivel. Ennek az aljára rögzítettem egy 1 mm vastag alumínium lemezt, amelyre 20x20 mm-es ablakokat terveztem. A lemez marását ezúton is köszönöm az UNIPCB Kft.-nek. Az alumínium hasábok fúrását és összeszerelését magam végeztem. A rács a berendezésbe való beépítést követően a 8. ábrán látható.

Az alumínium fajlagos hőkapacitása 0,9 J/gK. Ha feltételezzük, hogy a tálcát 25 °C-ról kell 240 °C-ra melegíteni, akkor ahhoz 193,5 J energiára van szükségünk grammonként. Az eredeti tálca tömege 4,4 kg, ehhez képest az új tálca tömeg 0,76 kg lett. A súlycsökkenés tehát 3,64 kg, ami ezen a hőmérsékletváltozáson 704 kJ energia megtakarítást jelent.



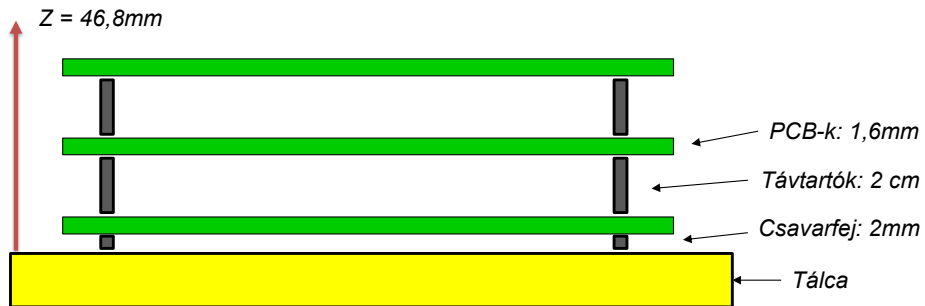
9. ábra: Az új rács beszerelve a berendezésbe



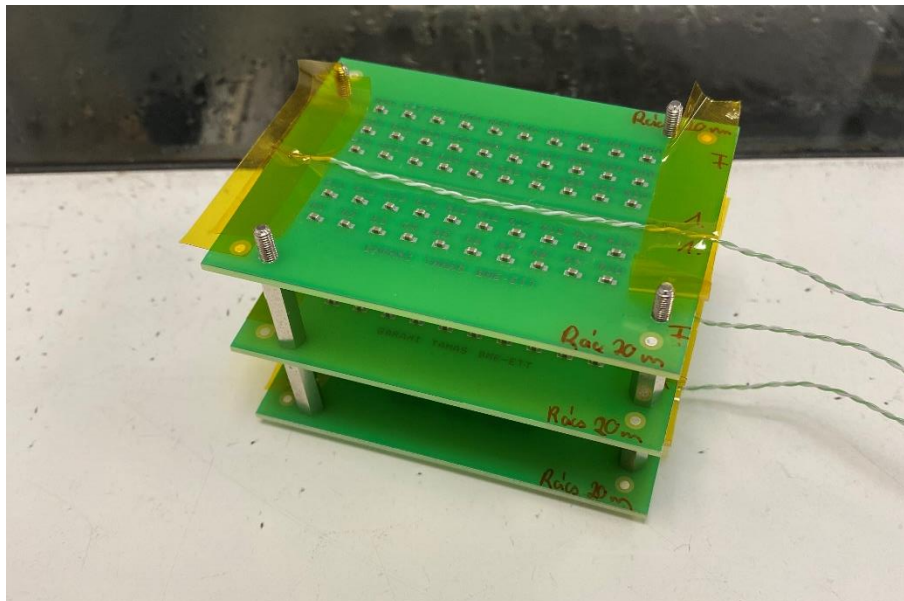
### 3.4 Tesztpanel – végleges stack elrendezés

A teszteléshez egy tanszéki tervezésű panelt használtam, amelyen 50 db 0603 SMD méretű alkatrésznek található hely.

Minden pozícióba 0603 méretű felületszerelt kondenzátort ültettem be, beültetőgép segítségével. A végleges stack elrendezése a 10. és 11. ábrán láthatjuk.



10. ábra: A stack végleges elrendezése



11. ábra: Egy stack forrasztás előtt

## 4. Mérés menete

### 4.1 Összefoglalás

A mérést két részre bontottam és függetlenül végeztem azokat. Más napokon azért, hogy minden esetben kihűlt kemencével kezdjek. Ezt azért tartottam fontosnak mert az összes hordozót egymás után forrasztva, más paraméterekkel találkozhatunk az első és az utolsó forrasztási ciklus során, a folyamatos átmelegedés miatt.

Első részben a gyári tálcával végeztem vizsgálatok. Korábban kifejtésre került, elsőként egy üres ciklust indítottam. Ezek után sorban a következő méréseket végeztem el „lapos” (azaz térbeli stackelést nem alkalmazó) és stack-elt üzemmódban:

- Gyári tálca: első lapos forrasztás: 1PCB
- Gyári tálca: első 20mm-es stack: 3PCB
- Gyári tálca: második lapos forrasztás: 1PCB
- Gyári tálca: második 20mm-es stack: 3PCB

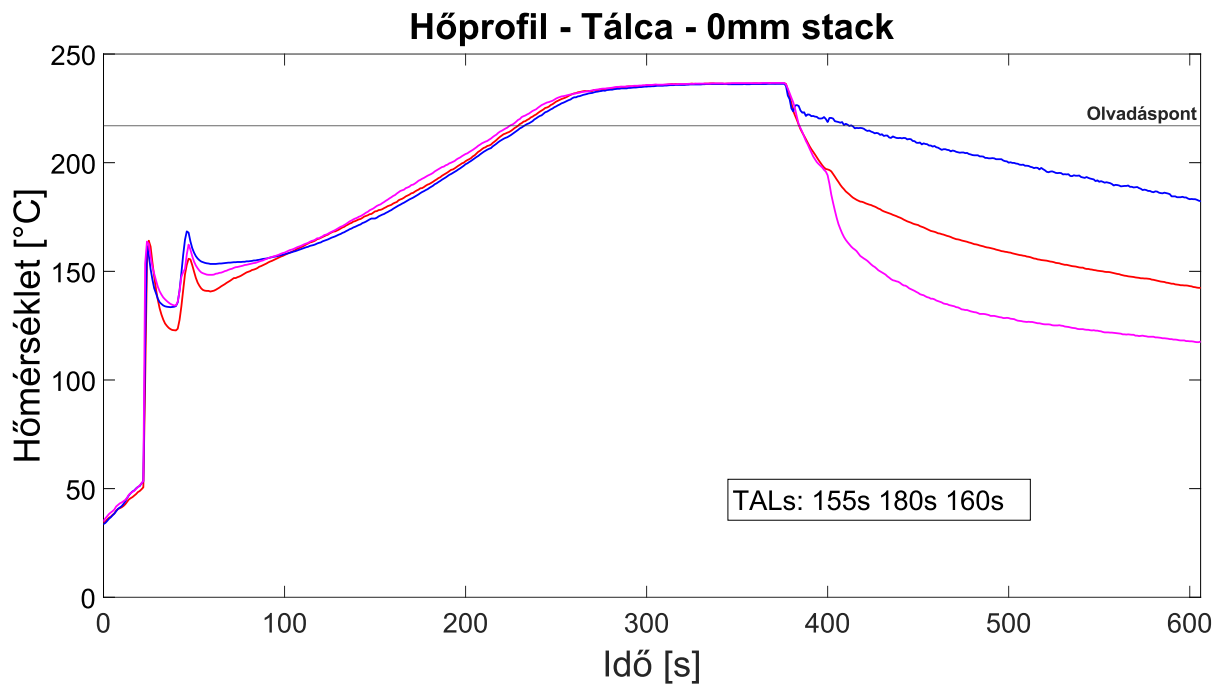
Ezután a tálcát kicseréltem az elkészült rácsra, ahol ugyan ezen szintaktika mentén végeztem a méréseket:

- Saját rács: első lapos forrasztás: 1PCB
- Saját rács: első 20mm-es stack: 3PCB
- Saját rács: második lapos forrasztás: 1PCB
- Saját rács: második 20mm-es stack: 3PCB

A mérések során folyamatosan hőprofil mentettem a V-Mole (ECD, USA) eszköz segítségével K-típusú hőelemekkel ( $\pm 1^\circ\text{C}$  pontosság, TC Direct, UK). A forrasztások után letolási tesztet végeztem 30 darab alkatrészen. A PCB-n 50 darab kondenzátor került beültetésre, a le nem tört alkatrészek a további vizsgálatokra lettek meghagyva.

Minden elrendezésben kétszer végeztem el ugyan azt a mérést. Az eredmények nem különböznek a kettő között, a továbbiakban csak egyet vagy a két mérés átlagát fogom bemutatni.

## 4.2 Golden sample – lapos forrasztás



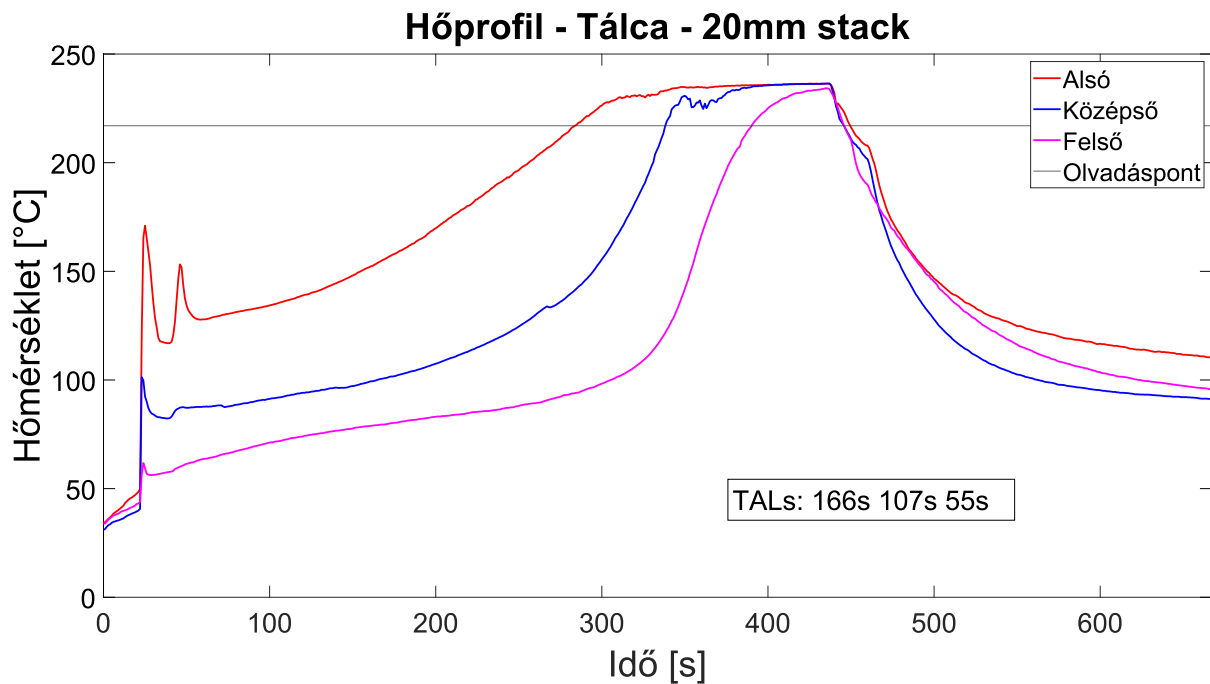
12. ábra: Gyári tálca stack nélküli konfiguráció

A berendezés gyári formájában történt forrasztás esetén (amit az egyszerűség kedvéért vagy lapos vagy 0 mm-es stacknek nevezek) a mért hőprofil a 12-es ábrán látható. A berendezés a gyári hőprofil beállítással üzemelt. A hőprofil elején található két hőmérséklet túske a tálca kétlépéses moztatásából adódik. A tálca az első megálláskor átveszi a gőztér energiáját, ami ezáltal eltűnik, de a tálca alatt még marad gőz. A második moztatáskor a tálca beleérkezik ebbe a megmaradt gőztérbe, ahonnan átveszi a még megmaradt energiát, ez okozza a második tuskét. Ezután kezdődik a tényleges forrasztási ciklus, amikor a fűtőlapok visszatermelik a gőzteret. A folyadék állapotban töltött (TAL: time above liquid) idő 160-180 másodperc körül alakul, a felmelegedés  $0,45\text{ °C/s}$  sebességgel történik. A teljes ciklus 606 másodperc hosszú.

A végén látható 3 jel szétválása elhanyagolható mérési hiba, a hőelemeket kapton szalaggal rögzítettem a hordozóhoz, amelyek a lift felhúzása során a vezetékek mozgása miatt kicsúsztak a ragasztó alól. Fontos megjegyezni, hogy a V-Mole eszközt nem célszerű gőztérbe beletenni ezért minden mérés során az eszköz a berendezésen kívül helyezkedett el, a hidegponti referencia leválasztása érdekében a munkatértől kellő távolságra; a hőelem vezetékeket a berendezés ajtaján keresztül vezettem a munkatérbe.



### 4.3 Stack-elt forrasztás

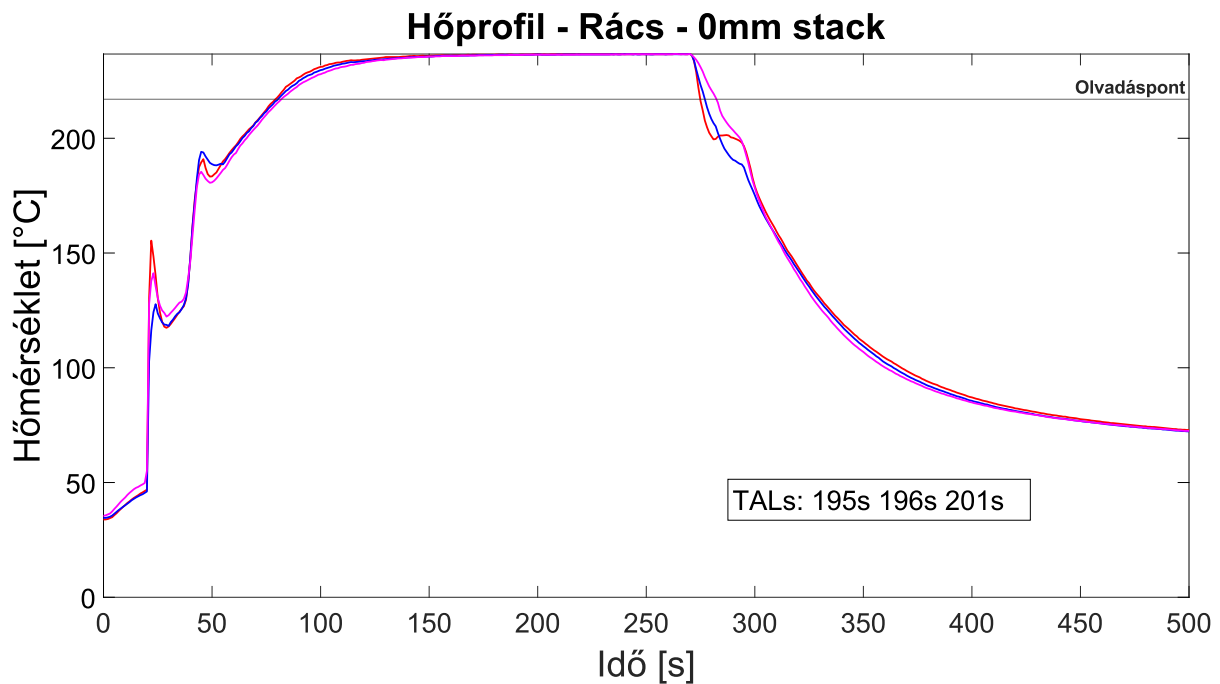


13. ábra: Gyári tálca 20 mm-es stack konfiguráció

Ebben a mérésben szintén a gyári tálcat használtam és a korábban bemutatott stack elrendezést forrasztottam. A kapott hőprofil a 13-as ábrán látható. A tálcamozgatásból eredő dupla túske a profil elején csak az alsó hordozó esetén jelentkezik, a középsőn minimálisan, a legfelsőn pedig teljesen eltűnik. Ebből láthatjuk, hogy nincs közvetlen hőátadás a gőz és a hordozó között ezeken a szinteken. Az idő előrehaladtával a gőztér fokozatosan visszaépül, ebből adódik az eltolódás a különböző szintek között. Látszik, hogy a felső hőprofil jelentősen kevesebb időt tölt (55 s) az olvadáspont fölött (TAL), mint az első esetben (166 s).

A melegedés sebessége is változik, az alsó a leglassabb ( $0,4 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ ) amely egyezik a lapos forrasztás eredményével, ezzel szemben a középső és a felső panel  $1,5$  illetve  $1,7 \text{ } ^\circ\text{C/s}$  sebességgel melegszik. Itt a teljes ciklusidő valamivel hosszabb 667 másodperc.

## 4.4 Rács használata – lapos forrasztás

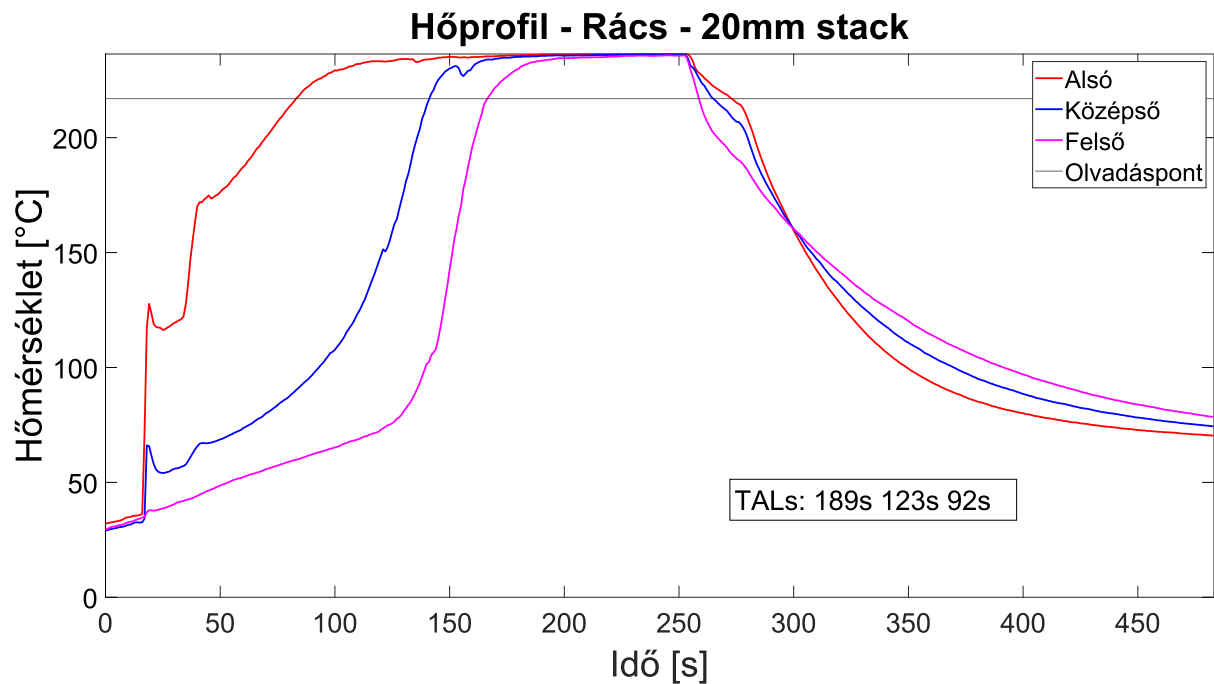


14. ábra: Rács stack nélküli konfiguráció

A továbbiakban a tálcát kicseréltem az általam tervezett rácsra. Ezt hideg állapotban tettem meg így ugyan azok a mérések, ugyan abban a sorrendben kerültek végrehajtásra külön a tálca és külön a rács esetén is.

A rács használatával jelentősen kevesebb tömeg kerül a gőztérbe ezért a hordozó hőmérséklete jóval nagyobb sebességgel tud növekedni (14. ábra). A dupla tálcamozgatásból eredő tüskék megváltoztak, a második mozzgatás során a hordozó hőmérséklete már ekkor eléri a 190 °C-ot. 120 másodperc környékén már a hordozó eléri a Galden forráspontját 240 °C-ot. Tehát 120 másodperc alatt 210 °C változás következik be. A TAL jelentősen megnő 200 másodperc környékére.

## 4.5 Rács használata – stack-elt forrasztás



15. ábra: Rács 20 mm-es stack konfiguráció

Utolsó esetben a rácson végeztem stack-elt forrasztást, amelynek hőprofilja a 15-ös ábrán látható. Itt is a különböző magasságok miatt késleltetést látunk a különböző szintek között. Ezen felül a TAL nagyságrendileg ~190-90 másodperc közé esik.

## 5. Vizsgálati eredmények

### 5.1 Hőprofilok összehasonlítása

	TAL [s]	Sebesség [°C/s]	Ciklusidő [s]	Fűtési faktor s°C
<b>Tálca 0</b>	160	0,45	606	2480
<b>Tálca 20 - A</b>	166	0,41	667	2505
<b>Tálca 20 - K</b>	106	1,54	667	1595
<b>Tálca 20 - F</b>	55	1,7	667	650
<b>Rács 0</b>	200	1,75	500	3400
<b>Rács 20 - A</b>	189	2,31	483	3044
<b>Rács 20 - K</b>	123	3	483	2019
<b>Rács 20 - F</b>	92	4	483	1455

1. táblázat: Különböző profilok összehasonlítása

Az előző fejezetben bemutatam a különböző konfigurációban történt profilokat, itt eredmények az 1. táblázaton láthatók összefoglalva. A gyári „lapos” forrasztást kiindulásként tekintve a tálcán végzet stack esetében egyre magasabb melegedési sebességgel találkozunk ezzel párhuzamosan pedig a TAL idők csökkennek. Hasonló tendenciát látunk a rács esetén is, viszont itt legrosszabb esetben 10x-es sebességet is látunk a hőmérséklet emelkedésében. A ciklusidő rács alkalmazása esetén csökkent, ami várható, a korábban bemutatott tömegcsökkenés miatt; az itt megtakarított energia a kikönnyített tálca fűtésénél az időben is megjelenik.

A fűtési faktor (3) megmutatja a görbe alatti terület nagyságát az olvadási hőmérséklet felett. Ez arányos a TAL idővel, figyelembe véve, hogy a forraszpaszta mindig 217 °C-on olvad, a galdengőz hőmérséklete pedig mindig 240°C-os. [17, 18]

$$Q_{\eta} = \int_{t_0}^{t_c} (T(t) - T_0) dt, \quad (3)$$

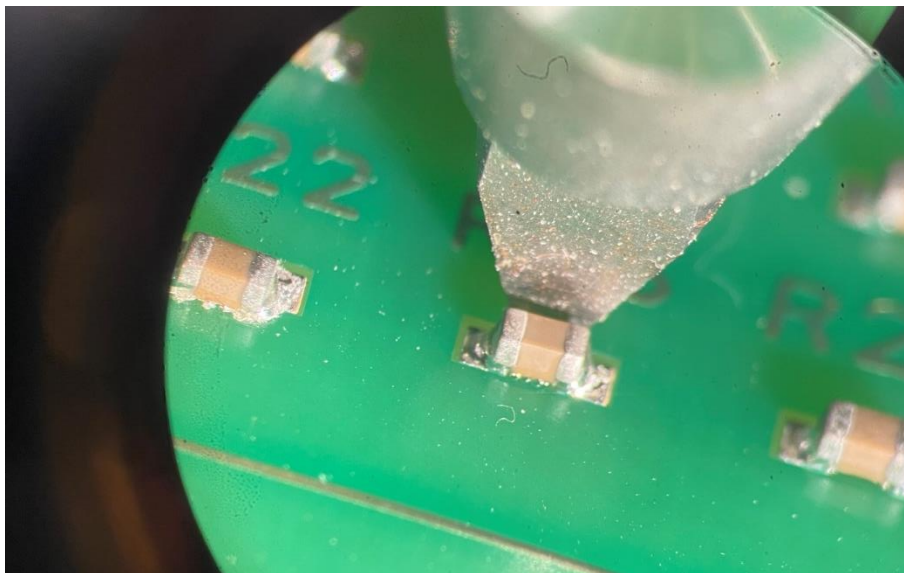
ahol  $Q_{\eta}$  a fűtési faktor [s°C],  $T(t)$  a szaturáció felé tartó hőmérséklet [°C],  $T_0$  a forrasztóanyag olvadáspontja, ld. fentebb [°C],  $t_0$  és  $t_c$  között van az olvadáspont felett töltött idő ablaka [sec].

## 5.2 Letolási teszt eredmények

A letolási teszteket a tanszéken található DAGE BT 2400 shear testerrel végeztem (16.-18. ábra). Ebben az eszközbe a letoló kés megkeresi a hordozó felszínét és ehhez képest egy beállított magasságban az alkatrészt folyamatosan nekitolja a késnek. Ekkor erő ébred az összeérő felületek között, amit a berendezés folyamatosan rögzít. Ez az erő folyamatosan növekszik mindaddig amíg törés következik be. A rögzített erődiagramból a legmagasabb érték adja meg a letörési erőt.

A letörési teszt során rendre a forrasz meniszkusz és a PCB padje között következett be a törés. Letörési teszteknel gyakran előforduló probléma, hogy a törés nem a forrasztott kötésben, hanem az alkatrész kivezető termináljában történik meg. A kísérletet megelőzően ezt megvizsgáltam két alkatrészen és ellentétben a másik alkatrésszel, a választott kondenzátornál a terminál kibírta a letörést és a forrasztott kötés volt a gyengébb láncszem.

Mivel itt a forraszfelület és a meniszkusz között történt a legtöbb törés feltételeztem, hogy az intermetallikus réteg változása okozhatja az eltérő eredményeket, de a keresztcsiszolati képek megmutatták, hogy nem ez áll a jelenség mögött.

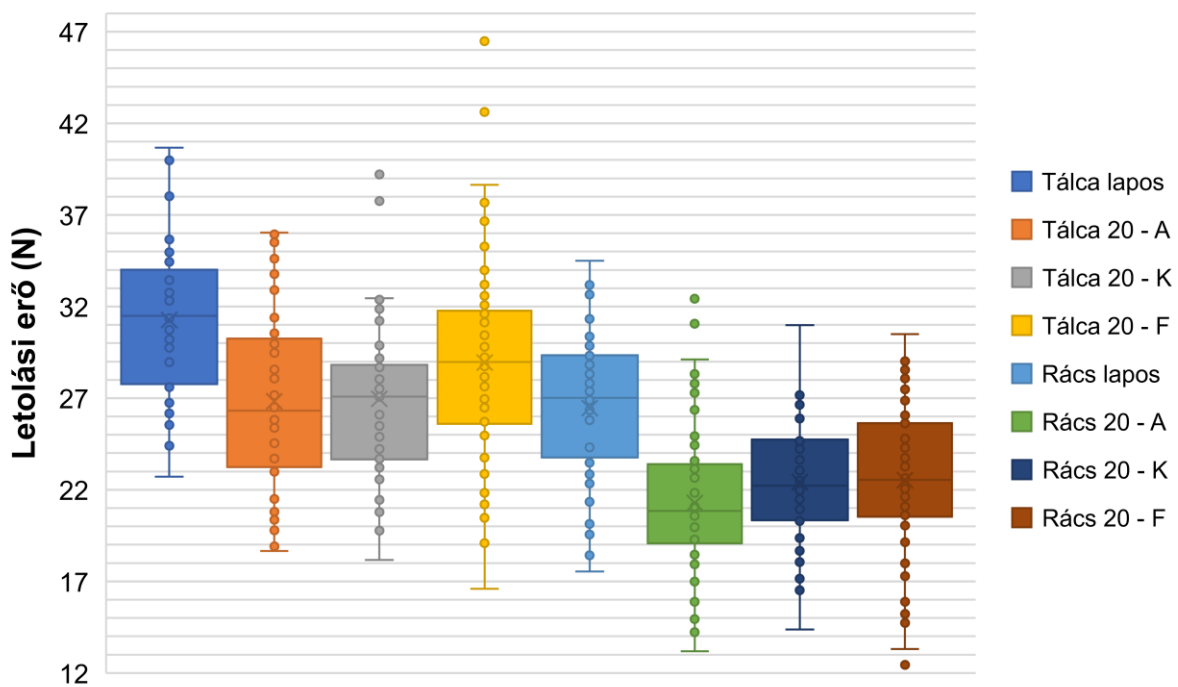


16. ábra: Letolási teszt a berendezésben

2. táblázat: Letörési eredmények összehasonlítása

[N]	Átlag	Szórás	Max	Min	Terjedelem
Tálca 0	31,28	4,05	40,68	22,72	17,96
Tálca 20 - A	26,90	4,69	36,04	18,66	17,38
Tálca 20 - K	26,55	3,90	39,22	18,16	21,06
Tálca 20 - F	28,61	4,56	38,64	19,08	19,56
Rács 0	26,47	3,80	34,50	17,54	16,96
Rács 20 - A	20,96	3,68	29,12	13,18	15,94
Rács 20 - K	22,50	3,27	30,98	14,38	16,60
Rács 20 - F	22,30	4,20	30,50	12,44	18,06

A letörési teszt eredményeinek összefoglalóját a 2. táblázatban, illetve a 17. ábrán találhatjuk.



17. ábra: Letolási erők összehasonlítása

A legjobb eredményt az eredeti gyári profillal történő forrasztás adta. Ehhez képest csökkenés tapasztalható a 20mm-es tálcás stack-elt forrasztás során. Itt a stack-en belül közel egységesnek mondható a romlás a három szinten.

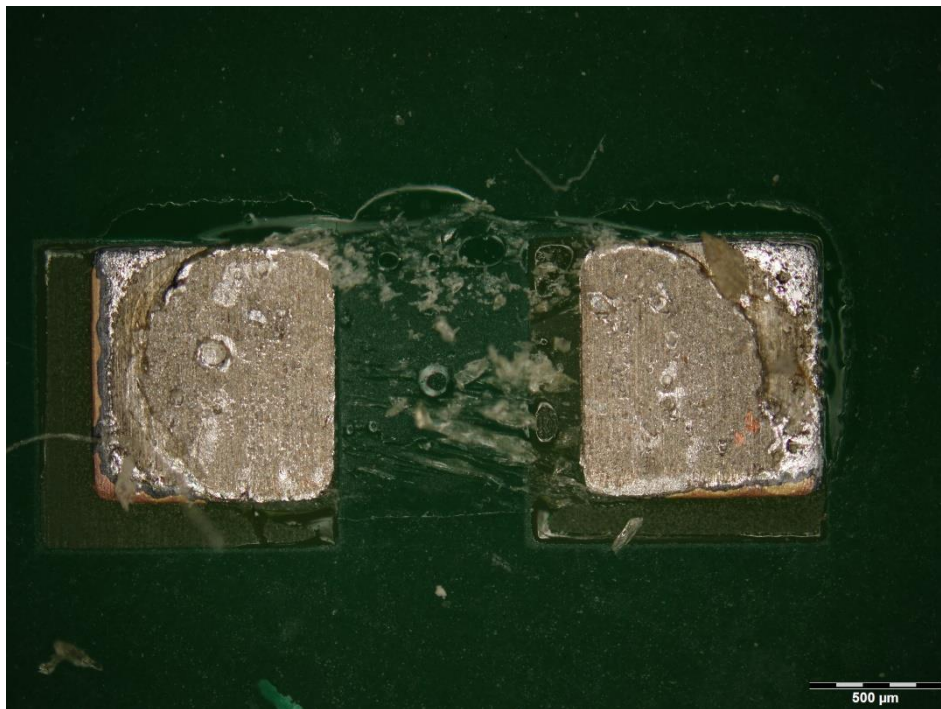
A rácson történt lapos forrasztás esetén további romlás tapasztalható.

Legrosszabb eredményt a rácson történt stack-elt forrasztás adta. Itt is elmondható, hogy a stack-en belül közel azonos értékeket kaptam. A fentiek elemzéséhez érdemes átnézni a profiloknál kapott értékeket.

A gyári hőprofil tulajdonságai merőben eltérnek a rácson stack-el történt forrasztáséhoz képest. A gyári lassú melegezési sebességhez képest itt a legmeredekebb szakaszon 4,7 °C/s-os értéket is mérhetünk. A stack-en belül nem tapasztalható jelentős eltérés a letörési értékek között annak ellenére, hogy a folyadék állapotban történt idő jelentősen más a különböző konfigurációkban.

A szórás és a terjedelem állandónak mondható a tesztek során, csak pár kiugró értékkel találkoztam a munkám során.

Tehát elmondható, hogy a forrasztott kötés minőség romlása összefüggésben állhat a felmelegedési sebesség növekedésével, aminek köszönhetően romolhat a nedvesítés, zárványosabb lehet a forrasz. Fontos megállapítás, hogy a fűtési faktor értékek (amivel általában korreláltatják az eredményeket) nem mutatnak egyértelmű korrelációt, ez pedig azt mutatja, hogy valószínűleg a felmelegedési sebességből fakadó problémák okozhatják a minőségsökkenést.



18. ábra: PCB a letörés után

Érdekes ezen a ponton irodalmi összevetést is tenni a kötésminőséggel. 0603-as ellenállásokra a következő táblázat (3) foglalja össze az általános kötéserőket:

3. táblázat: Letörési eredmények összehasonlítása

Irodalom	Átlag [N]	Min [N]	Max [N]
[19]	18	14	24
[20]	~30	24	41
[21]	25	22	30
[22]	34	21	47
Jelenlegi eredmények	21-31	12-23	30-41

A táblázat összehasonlító eredményei után elmondhatom, hogy az irodalmi értékeknél még a rosszabb eredményeim is hasonló nagyságrendben találhatóak, tehát adott esetben (megadott minőségi korlátok között) alkalmazható lehet a stack-elt forrasztás.

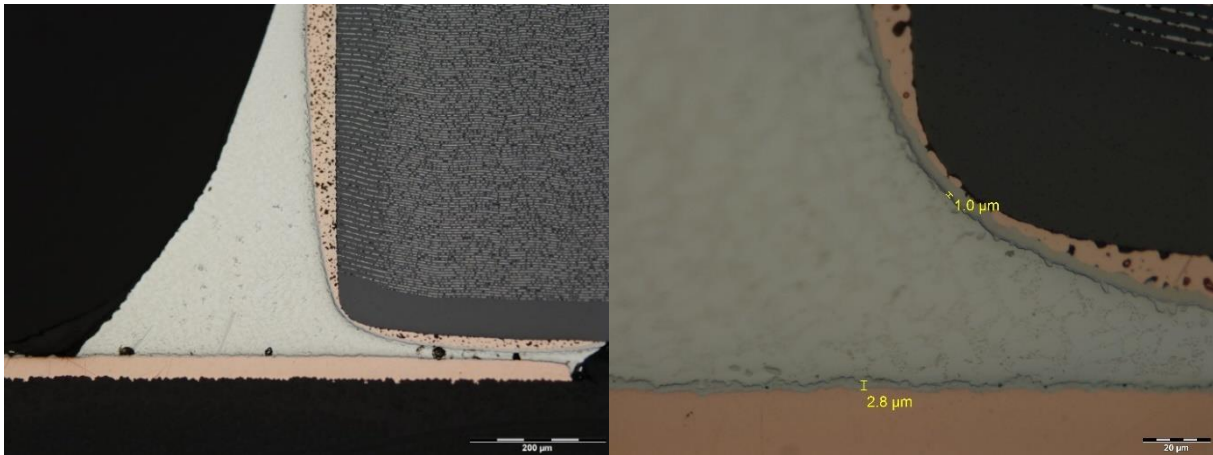
### 5.3 Keresztcsiszolati kép vizsgálata

Mivel jelentős eltérések mutatkoztak a letolási erőkben, és csupán ez és a hőprofilok elemzése nem ad kielégítő magyarázatot a jelenségre, szükségesnek tartottam keresztcsiszolati képekkel is megvizsgálni a forrasztott kötéseket. A mintaelőkészítés során a hordozóból kimarásra kerül a vizsgálni kívánt rész, amelyet ezután epoxy gyantába ágyaznak be. A megszilárdulás után több lépéses csiszolási és polírozási folyamaton esik át a minta. Ezután van lehetőség optikai mikroszkóp segítségével a minta keresztmetszete mentén vizsgálni a forrasztott kötést. A tesztpaneleden meghagyott alkatrészekből 3 alkatrész tudott egy mintába bekerülni. Nem tartottam szükségesnek az össze mintát megvizsgálni, mivel a szélsőséges értékek, és egy köztes érték is elegendő információt tud szolgáltatni.

Összességében négy minta készült:

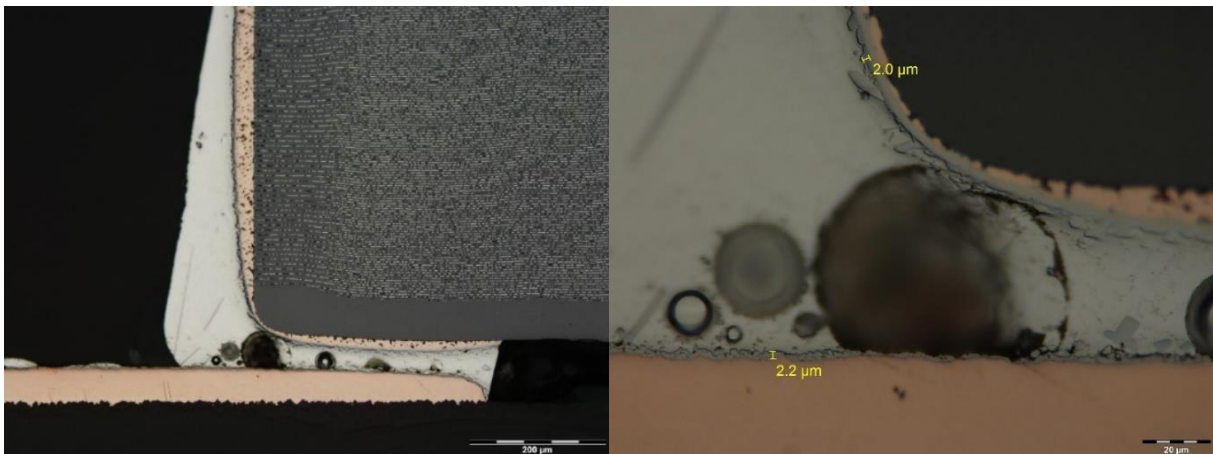
- egy a golden sample-nek is nevezett forrasztásról, ahol a gyári tálcával stack nélkül készült a minta (legjobb)
- egy a rácson készült stack-ből (legrosszabb)
- egy a rácson történt lapos forrasztásból (köztes)
- egy a tálcán történt stack-ből (köztes)





19. ábra: Gyári konfigurációban történt forrasztás keresztcsiszolat képei

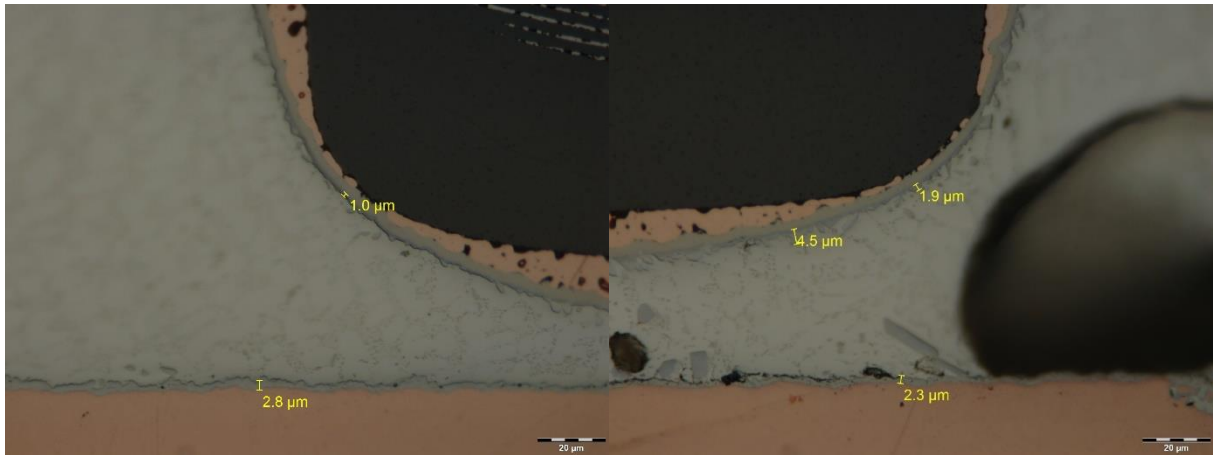
A gyári tálcás és stack nélküli forrasztásban készült „arany” minta képeit 19. ábrán láthatjuk. A forrasztás keresztmetszete közel egyenletes, homogén. Az intermetallikus réteg vastagságának meghatározása ilyen módon igen nehézkes, de szemrevételezéssel „átlagolással” elmondható, hogy a pár mikronos tartományban található.



20. ábra: Rács 20 mm-es stack középső paneljának keresztcsiszolat képei

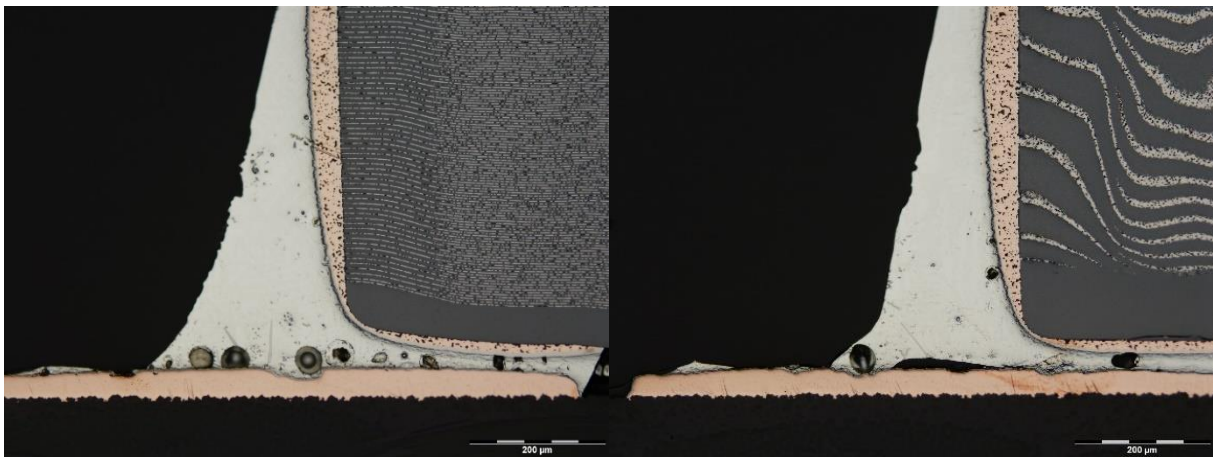
A 20. ábrán a rácson készült stack középső paneljéről készül keresztcsiszolat képei láthatóak. A meniszkusz kialakulása nem tökéletes, ez nedvesítési hibára utalhat. A zárványok száma és mérete is jelentős.

Az intermetallikus (IMC) réteg vastagsága nem változik a különböző konfigurációkban, a korábbi feltételezéseimmel ellentétbe nem ez okozza a letörési erőkben való eltéréseket. Megfigyelhető, hogy (21. ábra) hogy a gyári forrasztáshoz képest az IMC réteg sokkal csipkésebb (egyenetlenebb); változó nagyságú, helyenként szigetekben is különválnak.



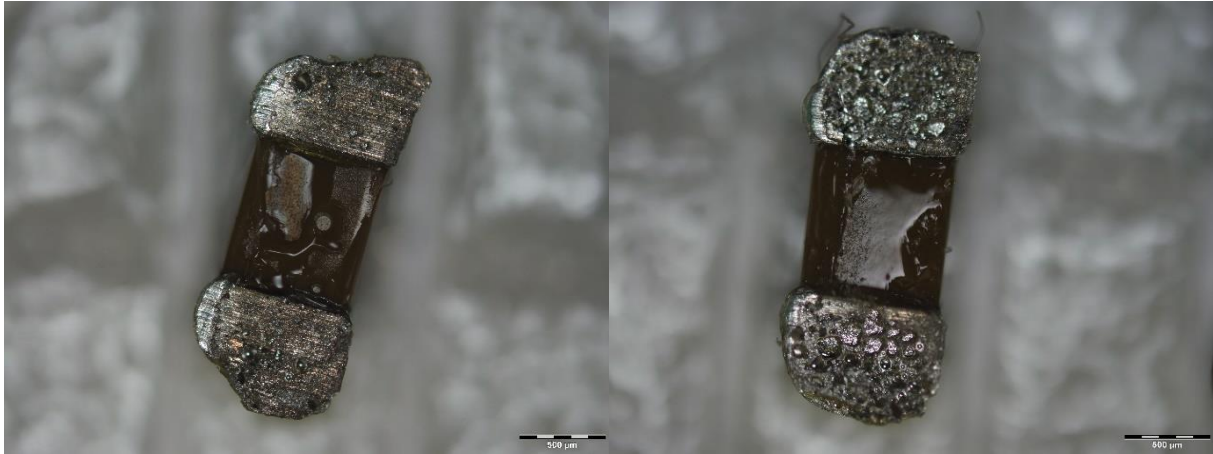
21. ábra: Balra a gyári forrasztás egyenletes, jobbra módosult profil okozta csipkés szigetes IMC rétege látható

Sokkal nagyobb problémát okoz a zárványok kialakulása. A gyári konfigurációban készült forrasztás esetén csupán pár apró méretű zárványt figyeltem meg. Ezzel szemben főleg a rácson történt forrasztás esetén a zárványok darabszáma és a méretük is megnövekedett. A 19. ábrán láthatjuk a forrasztás egyenletességét, illetve a 21. ábra bal oldalán; ezzel szemben láthatjuk a megnövekedett zárványok számát és méretét a 20-as ábrán, a 21. ábra jobb oldalán és külön a 22. ábrán.



22. ábra: Rácson történt forrasztás esetén látható a zárványok jelentősebb megjelenése

Optikai mikroszkóppal megvizsgáltam az alkatrész töret felületeit is (13- ábra). A bal oldalon egy gyári konfigurációs stack nélküli forrasztás eredménye látszik. A töret felülete egységes pár zárvány látszik rajta. A jobb oldalon ezzel szemben egy rácson készült stack középső paneljéről származó alkatrész látszik. A felülete közel sem egységes már-már szivacsos szerkezetű, zárványokkal borított.



23. ábra: Töret felületeinek összehasonlítása: balra gyári tálca - jobbra rács

Ennek eredményeként elmondhatom, hogy a letörési erők változását a zárványok jelentősebb kialakulása okozza. A zárványokkal bővelkedő meniszkusz hatásos teherviselő keresztmetszete jelentősen lecsökken, ezáltal kisebb erőknek tud ellenállni.

A zárványosság visszavezethető a módosult hőprofilokra. A folyasztószer átlagos aktiválási hőmérséklete 125 °C. Ezzel szemben a módosult hőprofilokban sok időt tölt 100 °C alatt a hordozó, ami alatt csupán a paszta száradása történik. Ezek után pedig nagy hőmérséklet emelkedéssel éri el a maximális hőmérséklet. Így a folyasztószer nem tudja ellátni a funkcióját és maradékai a rövidebb ciklusidő alatt nem képesek távozni a forraszból, illetve a rossz nedvesítés miatt a meniszkusz kialakulása is romlik. Ezzel magyarázhatóak az eredményeim, további vizsgálatok szükségesek a flux (flux – folyasztószer) változtatásának hatására a jelenlegi mérési konfigurációban.

Amennyiben elfogadhatónak tekintjük a letolási eredményeket, úgy korlátok között (pl. kommersz elektronikák) alkalmazható lehet a stack-alapú forrasztás. Fontos megjegyezni, hogy a 667 másodpercről 483 másodpercre történő csökkenése körülbelül 30%-os csökkenést jelent a berendezés időbeli működésében. Ez nem egyértelműen megfeleltethető a felvett teljesítménnyel, de jól mutatja, hogy nem elhanyagolható energiacsökkentést lehetne végrehajtani berendezés szinten egy ilyen módosítással. Emellett a kötésre vetített szükséges teljesítmény (W/kötés) a hármas stack esetében egy hárommal történő osztást is a rendszerre vihet, tovább fokozva az energiahatékonyságot.

Az idő csökkentésével a termelékenység is növelhető.

A fenti pontok az általános ENSZ fenntarthatósági célok közül (SDG, Sustainability Development Goal pontok) alapján [23] a 9-es ponthoz (ipar, innováció és infrastruktúra) kapcsolódik az eredményem, emellett a 12-es ponthoz is (felelős fogyasztás és termelés).

A berendezés energiafelvételének pontosabb vizsgálata jelenleg is zajlik, külön erre a célra fejlesztett mérőeszkővel.

## 6. Összefoglalás

A kutatás célja volt, hogy stack-ben, azaz egymásra rétegzett szerelvényekkel növeljem a gőzfázisú forrasztás termelékenységét, illetve az egy panelra jutó felhasznált energia mennyiségét. Mindezt úgy kívántam megvalósítani, hogy a gyári beállításokat meghagyom és betöltött tömeget változtatok. Ehhez egymásra helyezett stack-ben felállított hordozókat alkalmaztam, illetve lecsökkentettem a lift tálcájának tömegét egy saját tervezésű ráccsal.

A kutatás ezen paraméterek mentén gyengébb forrasztást eredményezett, a módosult konfigurációk során csökkent a forrasztott kötés minősége a letolóerők 31 N-ről 21 N átlagra csökkentek (~33%-os csökkenés) és a keresztmetszeti csiszolatvizsgálatok, letolási felületek vizsgálata kimutatta a zárványok keletkezését, és az inkonzisztensebb IMC rétegek kialakulását.

Célkitűzés volt, hogy úgy növeljem a termelékenységet, hogy közben a minőség nem változik. Bár a ciklusidőt 30% körüli értékkel csökkentettem, minőség-stabilitást nem sikerült elérni, de az irodalomban található letolóerő-eredményeket így is sikerült nagyságrendileg teljesíteni.

Megállapítottam, hogy a minőség romlását a gyorsabb felmelegedési rámpa (0,4 °C/sec-ről akár 4 °C/sec-re növekedett értékek), ezáltal a nem megfelelő nedvesítés a túlzott zárvány kialakulás okozza. A gyári forrasztással szemben az általam módosított konfigurációkban jelentősen módosultak a hőprofilok, ennek hatására a folyasztószer nem volt képes ellátni feladatát, és elősegítette a zárványok kialakulását.

Több lehetőség van a további kutatások elindításához. Jelen kutatás során a berendezés hőprofilját nem módosítottam, az gyári beállítások mellett üzemelt. A gépet gyártják eredetileg is ráccsal, feltételezem tehát van olyan profil beállítás, amellyel ugyan olyan minőséggel tudunk forrasztani. A felhasználói felület több beállítási lehetőséget is enged, érdemes lenne megvizsgálnom ezek változtatásával hogyan módosul a kimenet.

A továbbiakban szeretnék statisztikai szoftveres elemzést végezni a kapott eredmények elkülönüléséről és a keresztthatásokról (ANOVA, T-próba), illetve a folyasztószer hatásának, típusának vizsgálata is a kutatás további részét képezheti.

A berendezés rendelkezik egy vákuumozó egységgel, amit én nem használtam a kutatás során a paraméterter szűkítése érdekében. A vákuozás célja, hogy a forrasztás végén amikor a forrasztóanyag még olvadt állapotban van, vákuum segítségével a zárványok távozását elősegítse.

Mivel esetemben pont a zárványok okozzák a problémát megoldást jelenthet ezen egység használata a forrasztás során.

Viszont számításba kell vennem azt is, hogy amikor egy energiahatékonyságot megcélzó kutatást végzek, megéri-e egy külön egységet behozni a ciklusba, amely vákuumszivattyúja nem elhanyagolható teljesítményfelvétellel rendelkezik.

A fenntarthatósági vizsgálatok során az SDG 9 és 12-es ponthoz kapcsolódva most is zajlik a folyamat energiaigényének a vizsgálata. Adott esetben a jobb energiafelhasználás igénye mentén lehetséges egy munkapont kijelölése a több/stack-elt hordozómennyiség, ezáltal kisebb energia/kötés és redukált kötésező paraméterek mentén.

A továbbiakban ezekre a kérdésekre fogom keresni a választ.

## **7. Köszönetnyilvánítás**

Köszönetet szeretnék nyilvánítani a tanszékvezetésnek, hogy elérhetővé tették számomra az ASSCON VP800-as gőzfázisú berendezés használatát. Köszönet illeti az UNIPCB Kft.-t, aki a tesztpanel és rács lemezének gyártásával segítette munkámat.

Köszönöm Dr. Hurtony Tamásnak a keresztcsiszolatok elkészítésében nyújtott segítséget és a szakmai tanácsokat, ötleteket.

## 8. Irodalomjegyzék

- [1] Illés Balázs, Krammer Olivér, Géczy Attila (2020): Introduction to Surface-Mount Technology. In: Reflow Soldering – Apparatus and Heat Transfer Processes. Elsevier, Amszterdam, Hollandia, pp. 1-62. ISBN 97801281850563333333
- [2] Eftychiou M. A., Bergman T. L., Masada G. Y.: A Detailed Thermal Model of the Infrared Reflow Soldering Process, 1993. J Electron Packag, Vol. 115, No. 1, pp. 55.
- [3] Illés B., Harsányi G.: Investigating direction characteristics of the heat transfer coefficient in forced convection reflow oven, ( Exp Therm Fluid Sci, Vol. 33 No. 4, pp. 642–650.
- [4] Suihkonen D.: Vapor phase for lead-free reflow, 2007, Global SMT & Packaging, Vol. 7, No. 9, pp. 30-32.
- [5] Galden® LS & HS Vapor Phase Soldering Fluids, Technical Data Sheet: <https://content.solvay.com/Galden-ls/hs-vapor-phase-soldering-fluids>, (elérés dátuma: 2023.10.30).
- [6] Zabel C.: Condensation Reflow Soldering - The Soldering Process with Solutions for future Technological Demands, Germany, ASSCON Systemtechnik-Elektronik GmbH, 2006.
- [7] Leicht H. Thumm: A. Today's vapor phase soldering-an optimized reflow technology for lead free soldering, 2008 SMTAI Conference, Available online: <https://smtnet.com/library/files/upload/Vapor-Phase-Soldering.pdf> (elérés dátuma: 2023.10.30)
- [8] Mohamed Amine Alaya, Balázs Illés, David Bušek, Attila Géczy: Validation of Heat-Level Vapor Phase Soldering Process and Workspace Leakage Detection with Applied Pressure Sensors, Appl. Sci. 2021
- [9] Geczy A., Illes B., Peter Zs., Illyefalvi-Vitéz Zs.: Characterization of Vapour Phase Soldering Process Zone with Pressure Measurements, 2013, Solder Surf Mt Technol, Vol. 25, No. 2, pp. 99-106.
- [10] Attila Géczy, Balázs Illés, Zsolt Illyefalvi-Vitéz, Modeling method of heat transfer during Vapour Phase Soldering based on filmwise condensation theory, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 67, 2013, Pages 1145-1150, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.08.072>
- [11] Asscon Quicky 450 VP adatlap: <https://www.pmtech.co.uk/pdfs/TDS/Equipment/asscon/q450.pdf> (elérés dátuma: 2023.10.30)
- [12] ASSCON VP800 VACUUM adatlap: [https://www.asscon.de/wp-content/uploads/2021/11/211104\\_ASC\\_VP800\\_E.pdf](https://www.asscon.de/wp-content/uploads/2021/11/211104_ASC_VP800_E.pdf) (elérés dátuma: 2023.10.30)



- [13] Beata. K. S, Skwarek. A, Witek. K: Voids investigation in solder joints performed with vapour phase soldering (VPS), 2014, Solder Surf Mt Technol, Vol. 26, No. 1, pp. 8-11.
- [14] Havellant Gergő, Butyka László, Géczy Attila.: Measurement Device for Pressure Monitoring in Vapour Phase Soldering Reflow Processes, 2023 46th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE) (2023) pp. 1-4. , 4 p.
- [15] Balázs Illés, Oliver Krammer, Attila Geczy, Reflow Soldering, Apparatus and Heat Transfer Processes, eBook ISBN: 9780128185063, 1st Edition - July 2, 2020
- [16] G. Harsányi, *Elektronikai Technológia és Anyagismeret*. Budapest: BME Elektronikai Technológia Tanszék, 2019. ISBN: 9789634217916
- [17] Veselý, P., Horynová, E., Starý, J., Bušek, D., Dušek, K., Zahradník, V., Plaček, M., Mach, P., Kučírek, M., Ježek, V. and Dosedla, M. (2018), "Solder joint quality evaluation based on heating factor", *Circuit World*, Vol. 44 No. 1, pp. 37-44. <https://doi.org/10.1108/CW-10-2017-0059>
- [18] Jianbiao Pan Brian J. Toleno Tzu-Chien Chou Wesley J. Dee, (2006), "The effect of reflow profile on SnPb and SnAgCu solder joint shear strength", *Soldering & Surface Mount Technology*, Vol. 18 Iss 4 pp. 48 – 56
- [19] Dániel Straubinger, Attila Géczy, András Sipos, András Kiss, Dániel Gyarmati, Oliver Krammer, Dániel Rigler, David Bušek, Gábor Harsányi, (2019) "Advances on high current load effects on lead-free solder joints of SMD chip-size components and BGAs", *Circuit World*, <https://doi.org/10.1108/CW-11-2018-0088>
- [20] Wang, Y., Zhao, X., Xie, X. *et al.* Effects of nano-SiO<sub>2</sub> particles addition on the microstructure, wettability, joint shear force and the interfacial IMC growth of Sn3.0Ag0.5Cu solder. *J Mater Sci: Mater Electron* **26**, 9387–9395 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3151-8>
- [21] Henning, C., Schumann, R., & Bauer, R. (2017). *Influences of SMD sample preparation and examination conditions on shear test results. 2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. doi:10.1109/isse.2017.8001011
- [22] A. Géczy, D. Szalmási, D. Straubinger and B. Illés, "Investigating shadowing and possible tombstoning caused by large SMD components during vapour phase reflow soldering," *2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Cluj-Napoca, Romania, 2019, pp. 343-346, doi: 10.1109/SIITME47687.2019.8990744.
- [23] <https://www.ajbh.hu/-/ensz-fenntarthato-fejlodesi-celok-sustainable-development-goal-sdg> (elérés: 2023. 11. 01.)