



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

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

Tudományos Diákköri Konferencia

2019/20. tanév I. félév

**NAGYMÉRETŰ FELÜLETSZERELT
KONDENZÁTOROK ÚJRAÖMLESZTÉSES
FORRASZTÁS KÖZBENI MOZGÁSÁNAK
VIZSGÁLATA**

Készítette: Szilágyi Richárd (HJAWR2)

Konzulens: Dr. Krammer Olivér

BUDAPEST

2019

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
2. Újraömllesztéses forrasztás technológiája	6
2.1 Forraszanyagok	6
2.1.1 Forraszpaszta reológiai tulajdonsága	7
2.1.2 Folyékony ólommentes forrasz viszkozitása	9
2.2 Újraömllesztéses forrasztás technológiai lépései	12
2.2.1 Stencilnyomtatás	12
2.2.2 Alkatrészek beültetése	13
2.2.3 Újraömllesztéses forrasztás	13
3. Alkatrészre ható mozgató erők és profilszámítás	15
3.1 Alapmodellek [18]	15
3.1.1 Wassink-Verguld modell	15
3.1.2 Ellis-Masada modell	16
3.2 Fellépő erők leírása	17
3.2.1 Felületi feszültség	17
3.2.2 Hidrosztatikus nyomás	18
3.2.3 Viszkozitásból adódó fékező erő	18
3.3 Eddigi profilszámítás	19
4. Irodalmi összefoglaló	20
5. Önálló munka	21
5.1 Profilszámítás	21
5.1.1 Forraszanyag mennyiségének számítása	21
5.1.2 Geometriai megfontolások	23
5.2 Alkatrészre ható erők számítása	26
5.3 Időfüggés vizsgálata	28
6. Eredmények	30
6.1 Nedvesítési magasság és statikus erők számítása	30
6.2 Friss állapotban lévő paszta	31
6.3 Kiszáradt állapotú forraszpaszta	32
7. Összefoglalás	34

Irodalomjegyzék.....	35
Ábrajegyzék.....	38
I. függelék – Matlab kód.....	39

1. Bevezetés

Napjaink egyik legelterjedtebb forrasztási technológiája az újraömllesztéses forrasztás, mellyel legtöbbször felületszerelt alkatrészeket rögzítenek nyomtatott huzalozású lemezre. Jól ismert és nagy irodalommal rendelkezik a forrasztás közben az alkatrészeire ható erők és az alkatrészek mozgásának leírása. A szakirodalomban részletesen tárgyalt kérdés a felületszerelt alkatrészek forrasztás közben fellépő hibáinak okai is. Különböző vizsgálatok bizonyítják, hogy nagyméretű alkatrészek esetén – pl. két kivezetéssel rendelkező felületszerelt (SMD – surface mounted device) kondenzátorok, nagyméretű FET-ek (térvezérlésű tranzisztor – field-effect transistor) – a kivezetések között a hőmérsékletkülönbség a forrasztás közben annyira jelentős is lehet a kivezetők távolsága miatt, hogy az egyik oldalon már megolvad a forrasztóanyag, míg az ellenkező oldalon még nem. Legrosszabb esetben, a két ellentétes oldalon eltérő mértékben fellépő erők miatt az alkatrészek elmozdulhatnak a beültetési pozícióból, és nyitott kötések is kialakulhatnak forrasztási hibaként. Az alkatrészek forrasztás közbeni mozgásának vizsgálatához elsőnek a forrasztóanyag alakjának, profiljának meghatározása szükséges, amely a szakirodalom szerint kissé körülményesen, illetve külön célszoftverekkel lehetséges.

Saját munkám eredményeképpen ismertetek egy új, a forrasztóprofil meghatározására szolgáló, különböző geometriai megfontolásokra alapozott analitikus módszert, mely lehetővé teszi a forrasztás közben fellépő erők egyszerű számítását. Ezen módszer felhasználásával vizsgálok egy nagyméretű felületszerelt kondenzátor ($10 \times 9 \times 5.5$ mm) forrasztás közbeni mozgását két peremfeltétel esetére is; miszerint az ellentétes oldalon, ahol a forrasztóanyag nem olvadt meg, a forrasztóanyag reológiai tulajdonságait (frissen nyomtatott állapot), illetve a súrlódási tulajdonságait (kiszáradt állapot pl. gyártósor leállása miatt) veszem figyelembe a számításoknál. Végezetül, az eredmények alapján adok egy lehetséges megoldást is az alkatrészek forrasztás közben elmozdulásának csökkentésére. A téma aktualitása megkérdőjelezhetetlen, főleg a manapság az eMobility szellemében egyre jobban elterjedő elektromos járművek szempontjából. E területen exponenciálisan növekvő darabszámban gyártanak nagyméretű alkatrészek felhasználásával eszközöket, ezért a hibajelenségek minimalizálása rendkívül kritikus élet – és nem utolsósorban vagyonszervi szempontból.

Abstract

One of the most widespread soldering technologies today is the reflow soldering, where the surface mounted components are connected to a printed circuit board. Describing forces acting on components and movements of them during soldering have a well-known and well documented literature. The explanations for soldering defects are discussed also in details in the literature. Various research works have shown that large parts - like surface mounted (SMD – surface mounted device) capacitors that have 2 terminals, large-scaled FETs (field effect transistors) – can have such a significant temperature difference between their terminals that yields solder melting only at one side of the component, and non-melting at the other side. In the worst case scenario, the forces arising at the opposite sides may vary due the reflow soldering that can move away the components from their placement position, resulting an open joint soldering failure. To investigate the movement of components during soldering, the shape and profile of the solder have to be determined at first. According to the literature, this calculation can be complicated and may require specialized software tools.

As result of my work, I have introduced a new analytical method for determining the solder profile based on various geometrical considerations, which allows simple calculations of the forces during soldering. By using this method, I investigated the motion of a large scale surface mounted capacitor ($10 \times 9 \times 5.5$ mm) through two different boundary conditions, as follows: 1) at the opposite side of the component, where the solder was not melted, the rheological properties of the solder paste (freshly printed) were taken into account; 2) or the frictional properties (dried-out phase, e.g. when production line was stopped) were considered. Based on the results, I provided a possible solution for reducing defects during soldering finally. The relevance of the topic is unquestionable today, especially with regard to electric vehicles, which are becoming more widespread nowadays in the spirit of eMobility. In this field, the device numbers exponentially growing that using large-scale components, so minimizing manufacturing defects is extremely critical for protecting life – not least - for security reasons.

2. Újraömllesztéses forrasztás technológiája

Az elektronikai gyártás egyik legelterjedtebb technológiája az újraömllesztéses forrasztás. Felületszerelt (SMD – surface mounted device) alkatrészek elektronikus és mechanikus kötését hozzák létre, melynek folyamata a következő. A forrasztanyagot paszta formában viszik fel a nyomtatott huzalozású lemezen lévő kontaktusfelületekre, általában stencilnyomtatással. A paszta folyasztószer és forrasztaszemcsék szuszpenziója. A paszta típusának függvényében különböző a szemcseméret az IPC szabvány besorolása alapján; pl. 4-es típusú forrasztaszemcsében a szemcseátmérő 20–38 μm . A paszta felvitele után automata beültetőgép helyezi fel az alkatrészeket a hordozóra. Az alkatrészek pozicionálását az ún., fiduciális jelek (illesztést segítő ábrák) segítik. A megfelelő alkatrész-pozíciókat egy külön fájlban tárolt adatok alapján képes beazonosítani a gép. Amikor kész a beültetés, az egész szerelvényt egyszerre forrasztják. Ezt többféle hőközlési technikával is megvalósulhat, például infrasugaras, kényszerkonvekciós hőátadással vagy akár kondenzáció elvén (gőzfázisú forrasztás).

2.1 Forrasztanyagok

A forrasztanyagot forrasztaszemcsék és a folyasztószer egy speciális szuszpenziója alkotja. A különböző szemcseméreteket alapján osztályozzák a forrasztanyagokat. Ezt az IPC J-STD-005A szabványa listázza (1. táblázat).

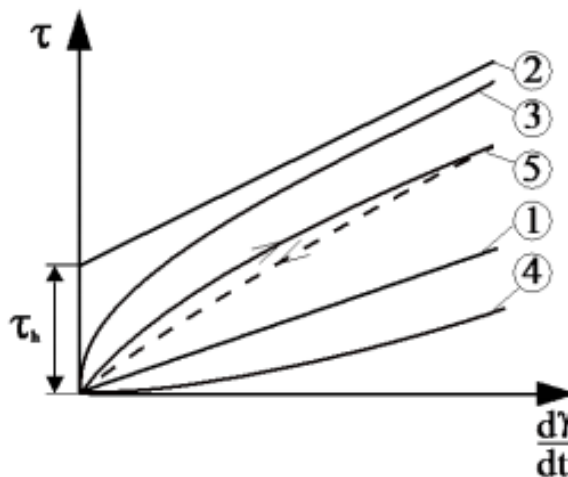
1. táblázat – Forrasztanyagok típusai szemcseméret alapján

Típus	Kevesebb, mint 0,5 m/m% nagyobb mint	Maximum 10 m/m% értékek között	Minimum 80 m/m% értékek között	Maximum 10 m/m% kisebb mint
1	160 μm	150 – 160 μm	75-150 μm	75 μm
2	80 μm	75-80 μm	45-75 μm	45 μm
3	60 μm	45-60 μm	25-45 μm	25 μm
4	50 μm	38-50 μm	20-38 μm	20 μm
5	40 μm	25-40 μm	15-25 μm	15 μm
6	25 μm	15-25 μm	5-15 μm	5 μm
7	15 μm	11-15 μm	2-11 μm	2 μm

2.1.1 Forraszpaszta reológiai tulajdonsága

A reológiát úgy definiálják, mint a deformáció és az áramlás tudománya. Széles körben használják különféle anyagoknál, ilyen például a festékek, tinták, kozmetikumok, de akár az aszfalt is ide sorolható. A forraszpaszta homogén, stabil szuszpenziója a forraszrészecskéknél és a folyasztószernél úgynevezett flux-nak. A flux különböző kémiai anyagok kombinációja, mint például oldószerek, sűrítők, antioxidánsok, illetve tisztító vegyületek. A forraszpaszták reológiája fontos megfontolás tárgya, mivel közvetlenül kihatással van a nyomtatás minőségére, illetve a nyomtatás után a forraszpaszta viselkedésére. Ezért ennek a tulajdonságnak a pontos ismerete szükséges, mivel erős korreláció van a reológia és a forraszpaszta teljesítménye között [1].

Mivel a forraszpaszta egy speciális szuszpenzió, ezért úgy viselkedik, mint egy nem-Newtoni folyadék. A viszkozitási görbe alapján 5 különböző csoportba soroljuk a nem-Newtoni folyadékokat.



1. ábra - nem-Newtoni folyadékok folyásgörbéi [2]

Az 1. ábra láthatóak a különböző nyomásgörbék. A vízszintes tengelyen a nyírési sebesség, a függőleges tengelyen a nyírési feszültség található. Az 1. görbe a Newtoni folyadékokra jellemző, a 2. görbe a plasztikus közegekre. Ezen közegek nyugvó közös tulajdonsága, hogy egy bizonyos τ_h kezdeti nyírési sebesség kell az áramlás megindításához, utána a Newtoni közegehez teljesen hasonlóan viselkednek. A 3. görbe az úgynevezett pszeudoplasztikus közegek tulajdonságát ábrázolja. A nyírési sebesség

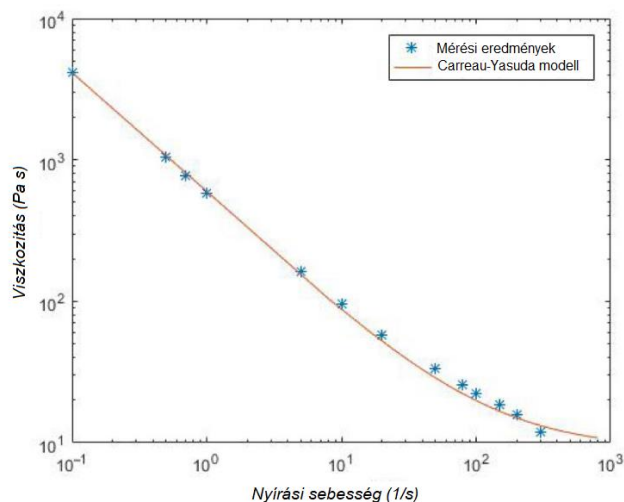
növekedéssel ezen anyagok viszkozitása csökken, ilyen például a vér, a nyomdafesték. A 4. görbe a dilatáló közeget mutatja meg. Itt a pszeudoplasztikussal közegekkel ellentétben, a nyírási sebesség növelésével, a viszkozitás nő. A köznyelvben, ha a nem-Newtoni folyadékokról beszélünk, akkor szinte mindenkinek ez a típusú közeg ugrik be, a könnyű elkészítése miatt. Általában valamilyen keményítőtartalmú keverékből könnyen előállítható. Nyugalomban a közeg folyadékként, nagy erőbehatás hatására viszont szilárd anyagként viselkedik.

Az 5. görbével leírt közeg a tixotróp közeg. Ennél a típusú közegnél a viszkozitás függ a megelőző deformációtól [3]. Ilyen típusú közeg a forraszpaszta is.

A nem-Newtoni folyadékok folyásgörbéinek matematikai leírására több modell is létezik. Ezek egyike a Carreau-Yasuda modell. Az irodalomban előszeretettel használják ezt a modellt a forraszpaszta dinamikus viszkozitásának leírására [4][5][6]. A modell egyenlete az alábbi (1).

$$\eta_{CY} = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{\left[1 + (\lambda \cdot \partial v / \partial z)^{CY}\right]^{\frac{1-n}{CY}}} \quad (1)$$

Ahol η_{CY} a keresett viszkozitás, az η_0 , illetve az η_{∞} az aszimptotikus viszkozitás értékek a 0, illetve a végtelen nyírási sebességhez tartozóan, λ az időállandó, n egy dimenzió nélküli exponens, illetve CY a dimenzió nélküli Yasuda állandó. A 2. ábra látható, egy mérési eredményekre illesztett Carreau-Yasuda modell.



2. ábra - Carreau-Yasuda modell illesztése egy forraszpaszta viszkozitás-mérés adataira [6]

A egyik előnye a Carreau-Yasuda modellnek, hogy minden $\gamma = \frac{\partial v}{\partial z} \geq 0$ esetén folytonos. Ha $n < 1$, akkor $\lim_{\gamma \rightarrow 0} \eta = \eta_0$ és $\lim_{\gamma \rightarrow \infty} \eta = \eta_\infty$, ami megmutatja, hogy nagy nyírási sebességnél a forraszpaszta úgy viselkedik, mint egy Newtoni folyadék η_∞ viszkozitással és alacsony nyírási sebesség esetén a forraszpaszta viselkedése egy η_0 viszkozitású Newtoni folyadék tulajdonságait mutatja. Az a, n, λ paraméterek befolyásolják a paszta nem-Newtoni folyadék viszkozitásának alakulását e két aszimptotikus viszkozitás között[7].

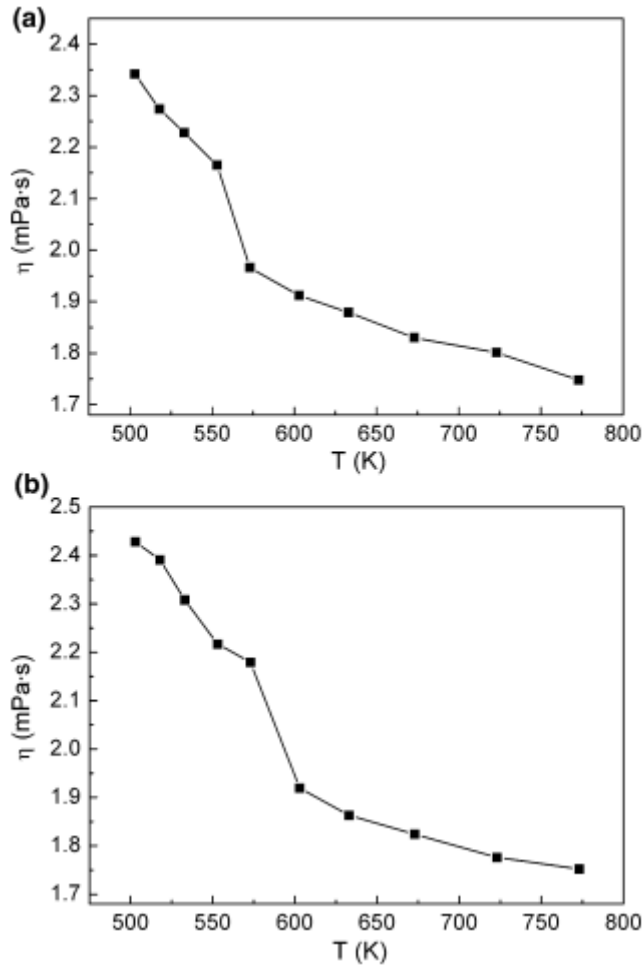
A nem-Newtoni viselkedés leírásának paraméterei a λ időállandó, illetve az n dimenzió nélküli hatványkitevő. Az időállandó határozza meg, azt nyírási sebességet, amelyen a viszkozitás kezd tolni a hatványkitevős tartományba. Jellemzően az alacsony időállandó hatására ez az átmenet a nagyobb nyírási feszültségnél történik meg. Az n hatványkitevő határozza meg az alsó és felső határ-viszkozitás közötti átmenet élésségét. Ha n kis értékű, akkor ez az átmenet élesebbé válik. [8]

2.1.2 Folyékony ólommentes forrasz viszkozitása [9]

A viszkozitás egy fontos fizikai paramétere a folyadékoknak. Az elektronika gyártás területén egyik kulcsparaméter a viszkozitás legyen szó forraszthatóságról vagy

úgynevezett alátöltésről. Mivel a forraszanyag az újraömlésztéses forrasztás közben folyékony állapotban van, ezért fontos ennek a paraméternek a vizsgálata.

A folyékony forraszanyagot elég körülményes mérni a hőmérséklete miatt. Az irodalomban elég kevés mérési eredmény akadt, viszont Zhao munkásságának köszönhetően ezek az adatok a rendelkezésre állnak. A 3. ábra mutatja a hőmérséklet függvényében az olvadt ólommentes forrasz viszkozitását.



3. ábra - Olvadt forrasz viszkozitása különböző hőmérsékleten a) Sn-0,7Cu b) Sn-2Cu

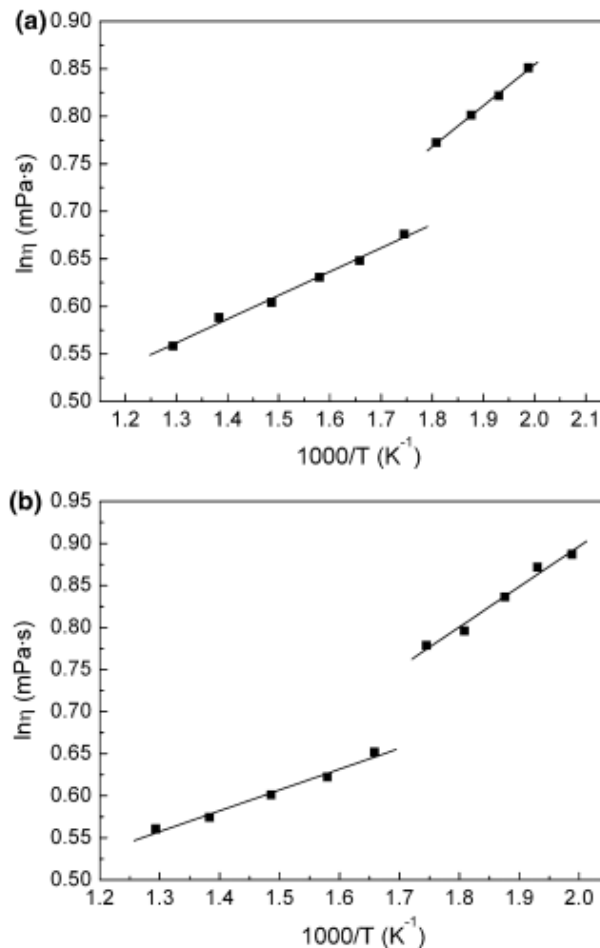
A forraszanyag hőmérsékletfüggése kifejezhető az Arrhenius egyenlet alapján (2).

$$\eta = A \cdot e^{\frac{\varepsilon}{kT}} \quad (2)$$

Ahol η a viszkozitás, A egy pre-exponenciális tényező, ami egyenlő a h/v_m hányadossal, ahol h a Planck állandó, v_m az áramlási egység, k a Boltzmann állandó, T az abszolút hőmérséklet, illetve ε az aktivációs energiája az egyenletes áramlásnak. Ha vesszük az (2) egyenlet mindkét oldalának a természetes alapú logaritmusát, az alábbi egyenlet adódik (3).

$$\ln \eta = \ln A + \frac{\varepsilon}{kT} \quad (3)$$

A viszkozitás lineáris összefüggést mutat az $1/T$ grafikonon (4. ábra) a különböző hőmérsékleti zónában, ami igazolja, hogy a folyékony forrasztás hőmérsékleti függése jól közelíthető az Arrhenius – egyenlettel, illetve a kísérleti eredményeket is igazolja.



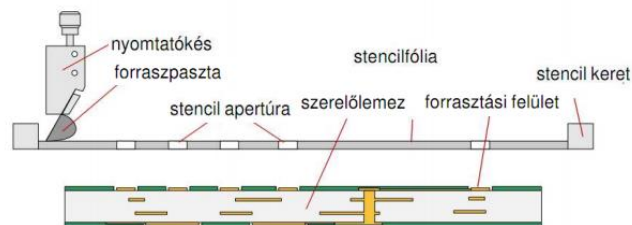
4. ábra - A viszkozitás lineáris függése a hőmérséklettől a) Sn-0.7Cu b) Sn-2Cu

2.2 Újraömlesztéses forrasztás technológiai lépései

2.2.1 Stencilnyomtatás

A stencilnyomtatás kulcseleme az elektronika gyártásnak. A forraszpasztát a megfelelő mennyiségben kell felvinni a nyomtatott huzalozású lemezen lévő forrasztási felületekre. Ha nem ez történik, akkor forraszhidak, illetve rövidzárok is keletkezhetnek. Ezen paraméter főleg kisméretű BGA alkatrészeknél kritikusak. A gyártási hibák 52-71 % - a a stencilnyomtatás nem megfelelő minőségére vezethető vissza [10].

A nyomtatásnál a stencil általában valamilyen ötvöztött fémből készült 75 -200 μm vastagságú fólia. A megtervezett áramkör forrasztási felületeinek negatívján szereplő helyeket, úgynevezett apertúrákat lézerrel, kémiai maratással, vagy más egyéb technikával alakítják ki a stencil keresztmetszetén. Ezekbe az ablakokba kerül bele a nyomtatás közbe a forraszpasztta. Így amikor megtörténik az elválás a szerelőlemezről, a forraszpasztta a forrasztási felületekre kerül [11]. Az 5. ábra látható a stencilnyomtatásról egy keresztmetszeti rajz. A szerelőlemez és a stencilfólia közötti távolság, csak a jobb érthetőség miatt ekkora, nem méretarányos a rajz.

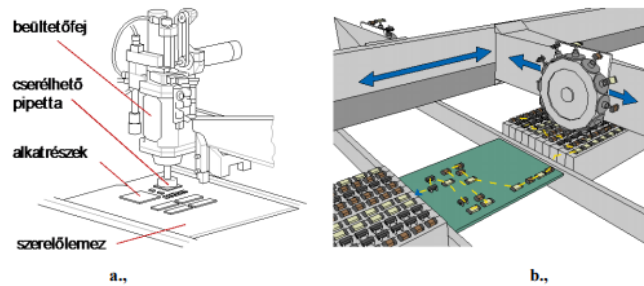


5. ábra – Stencilnyomtatás [12]

A kontaktusfelületek apertúrákhoz igazítása után, a stencilnyomtató berendezés segítségével, egy kés végigpörgeti a pasztát a stencilfólián. Fontos paraméter a kés nyomóereje, a gördüléshez szükséges pasztamennyiség, illetve a kés haladási sebessége, illetve a szerelőlemez elválás sebessége a stenciltől [13]. A stencilnyomtatás elvégzése során, egy gyártósorba integrálható AOI (automatic optical inspection) berendezés ellenőrzi, hogy mindenhova a megfelelő mennyiségű paszta került [14].

2.2.2 Alkatrészek beültetése [15]

A stencilnyomtatás és a minőség-ellenőrzés után a következő lépés az alkatrészek beültetése. Általában ezt a folyamatot automata beültetőgépek végzik. A gép a nyomtatott huzalozása lemezhez tartozó fájlból és a szalagtárak elhelyezkedéséből számolja ki az alkatrész pozícióját, illetve az alkatrész orientációját. Az ültetőgépek két típusa a 6. ábraán látható.



6. ábra - Ültetőgépek típusai a) pick and place, b) collect and place [11]

Az ültetőgépeknek általában kétféle típusa létezik. Az egyik az úgynevezett pick and place. Itt a beültetőgép a vákumos pipettájával egy vagy maximum két alkatrészt vesz fel az előre meghatározott tárból, majd pozicionálja az ültetőfejet az alkatrész helye felé, ezt követően lerakja a megfelelő orientációban. Ezen eljárást használó gépek előnye, hogy pontos, viszont az alkatrész ültetési sebessége körülbelül 20 ezer per óra.

Létezik a beültetőgépeknek egy másik fajtája is az úgynevezett collect and place típus. Itt a beültetőfej, ami akár lehet forgótáras is, egyszerre több alkatrészt (8-10) vesz fel. Ezen ültetőgépeknek nagy beültetésű képessége van, akár 80 ezer per óra, viszont beültetési pontosságuk messze elmarad az előző bekezdésben említett gépektől. Ezért ezeket általában chipméretű 2 kivezetéses alkatrészekhez (ellenállás, kondenzátor, dióda, stb.) alkalmazzák, amiből sok van egy szerelőlemezen, viszont ültetési pontosságuk nem kritikus.

2.2.3 Újraömllesztéses forrasztás

A folyamat során, ahhoz hogy a forraszpasztát kialakítsa a mechanikai, illetve az elektromos kötés a pasztát meg kell ömlesztetni. A forrasztás alatt hőt kell közölni az

anyaggal, ami a forraszpaszta megolvadását okozza, majd kihülés közben kialakul a kötés.

Az úgynevezett hőprofil az idő függvényében felvett hőmérsékletet ábrázolja. Egy konkrét hőprofil a 7. ábraán található meg. Az újraömlésztéses forrasztás folyamata több részből áll, mindegyiknek megvan a feladata. Az előmelegítés folyamán az egész panel el kezd melegedni, így elkerülve a hősokk által okozott töréseket, mechanikai feszültségeket. Ezt követően a hőntartás fázis alatt, a folyasztószerbe lévő különböző kémiai anyagok segítségével, mind az alkatrész kivezetések, mind a forrasztási felületek oxidmentesítése zajlik le. Ez a nedvesítési tulajdonságok javítása miatt is szükséges. Az újraömlésztés fázisában a forraszpaszta teljesen megolvad, megnedvesíti az alkatrészek kivezetéseinek, illetve a forrasztási felületeket, a következő fejezetben tárgyalt erők kiegyenlítik egymást.



7. ábra - Hőprofil

A forrasztási folyamat befejező lépése a hűtési szakasz. Ezen szakasz közben szilárdul meg a forraszanyag, kialakítva a villamos és a mechanikai kötetést. Fontos, hogy nem szabad hirtelen hőt elvonni a rendszerből, nehogy hősokk lépjen fel. Ha a hűlés gyors, akkor mechanikai feszültségek léphetnek fel, akár a forrasztásban is, ami a későbbiekben megbízhatósági problémákat vethet fel. Természetesen a megfelelő szabályzáshoz, mind a kemence belső terének hőmérsékletét, illetve a panel hőmérsékletét is mérni kell.

Az a forrasztás után ismét egy minőség-ellenőrzés következik, az előző fejezetben említett AOI kamerás berendezéssel. Jól beprogramozott, illetve nagy darabszám esetén (8-10k felett), egy egyszerű képből képes megállapítani, hogy az alkatrész megfelelően a helyén van, de akár azt is, hogy a megfelelő alkatrész került-e oda [16][17].

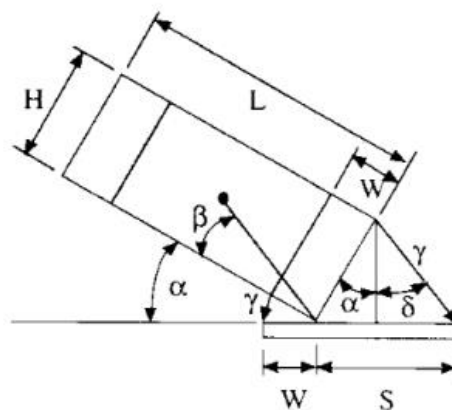
3. Alkatrészre ható mozgató erők és profilszámítás

Újraömllesztéses forrasztás közben a forraszpaszta megolvad, folyadékként viselkedik. Különböző erőhatások lépnek fel ekkor, amelyek képesek elmozdítani az alkatrészt a beültetési pozícióból, ilyen például a felületi feszültségből származó erő. Az alábbi fejezet tartalmazza ezen erők összefoglalását, illetve a kialakuló forraszpaszta profilszámításának elméleti hátterét.

3.1 Alapmodellek [18]

3.1.1 Wassink-Verguld modell

Az első komplex modellt Wassink és Verguld munkásságának köszönhetjük. Egy egyszerű 2D-s modellt alkottak, ami összefoglalja a felületszerelt alkatrészekre ható erőket az újraömllesztéses forrasztás közben. Ebben a modellben, ami a 8. ábra látható, a következő erőket vannak figyelembe véve. A gravitációs erőt, mely az alkatrészt húzza lefele a súlyából adódóan, az alsó fémezést nedvesítő forraszanyag felületi feszültségből adódó erőt, mely szintén a szerelőlemez irányú mozgást segíti, illetve a chip méretű alkatrész oldalsó kivezetését nedvesítő forrasznál fellépő felületi feszültségből származó erőt, amely az alkatrészt a szerelőlemeztől síkjától kifelé dönti.



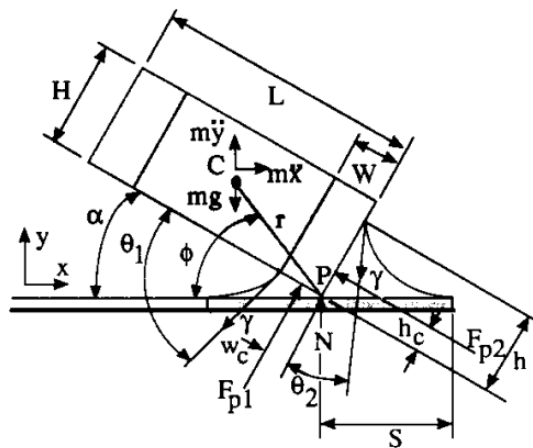
8. ábra - A Wassink-Verguld modell vázlata

A modell használhatóságának van pár korlátja. Egyik, hogy a bal oldali kivezetésnél lévő forraszanyagot nem veszi figyelembe, illetve az olvadt forrasz profilját is egy

egyenes vonallal közelíti. Wassink és Verguld, azért alkotta ezt a modellt, hogy egyszerűen meg lehessen állapítani egy alkatrészről, hogy az alkatrészre ható erők kiegyenlítéséből adódhat-e úgynevezett sűrű effektus. Megállapították, hogyha növelik az alkatrész kivezetésének fémezését, illetve csökkentik a forraszfelület hosszát, akkor a sűrűeffektus teljesen kiküszöbölhető egy 1206-os méretű alkatrésznél.

3.1.2 Ellis-Masada modell

A következő erőmodellt Ellis és Masada munkásságának köszönheti az irodalom. Ez is egy 2D-s modell, mint az előző fejezetben tárgyalt. A 9. ábra mutatja be, hogy milyen erőhatásokat vesz figyelembe. A modell sok olyan hatást is figyelembe vesz, amit a Wassink-Verguld mdoell nem. Például, hogy az olvadt forraszanyag profilját nem egyenes vonallal közelíti, hanem figyelembe veszi annak görbületét, továbbá a forrasz hidrosztatikus nyomásából fakadó erőt is számításba veszi.



9. ábra - Ellis-Masada modell

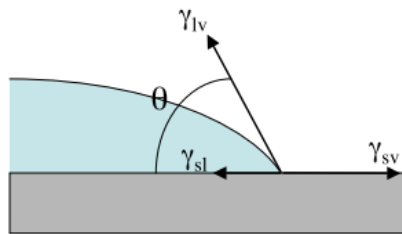
A modell használata korlátozott, mivel ebben a modellben is csak az alkatrész egyik oldalán lévő forrasz által okozott erők tartoznak bele. A chip méretű alkatrész fémezését, illetve az oldalát teljesen egyenes vonalnak tekinti, a tömegközéppontot a chip méretű alkatrész geometria középpontjában veszi figyelembe, illetve a megolvadt forraszanyag teljesen nedvesíti az alkatrész kivezetéseit. Viszont a modell a P pontra felírva számításba veszi a forgatónyomatékokat, így sokkal komplexebb becsléseknek is teret ad, mint a Wassink-Verguld modell.

3.2 Fellépő erők leírása

Három szignifikáns erő hat az alkatrészekre az újraömllesztés forrasztás közben. Ezek a felületi feszültségből adódó erő, a hidrosztatikus erő, illetve a gravitációs erő. Ezen erők közül a leghangsúlyosabb a felületi feszültségből adódó erő. [19]

3.2.1 Felületi feszültség [20]

Ha egy folyadék cseppet nézünk egy szilárd felületen, akkor három felületi feszültséget kell figyelembe venni. Szilárd-folyadék, folyadék-gáz, illetve a szilárd-gáz határfelületen lévő erőket. Ezen egyensúlyi állapotban között a Young-egyenlet (4) teremt kapcsolatot, ami látható a 10. ábra.



10. ábra - Különböző halmazállapotú anyagok közötti felületi feszültség

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos(\theta) \quad (4)$$

Ahol γ_{sv} a szilárd-gáz (solid-vapor) közötti -, γ_{sl} a szilárd-folyékony (solid-liquid) közötti -, illetve γ_{lv} a folyékony-gáz (liquid-vapor) közötti felületi feszültséget mutatja. A Young-egyenlet (4) segítségével három nedvesítési tulajdonságot tudunk megkülönböztetni. Első a) amikor az nedvesítés ideális $\theta = 0^\circ$, b) amikor részleges nedvesítésről beszélünk $0^\circ < \theta < 180^\circ$, illetve c) amikor nem nedvesíti a folyadék a felületet $\theta = 180^\circ$. Az elektronika gyártás terület elsősorban a szilárd-folyékony rész érdekes, viszont speciális eseteknél a folyadék-gáz is hatással lehet a nedvesítésre, ilyen például a N_2 gáz atmoszférában történő forrasztás. Ebben az esetben a nedvesítési szög csökken [21].

Ezen paraméter birtokában (nedvesítési szög) könnyen meghatározható a felületi feszültsége az anyagnak.

3.2.2 Hidrosztatikus nyomás [22]

A nyomásfolytonosság elve szerint a statikus forraszanyagban vízszintesen nincs nyomásváltozás, illetve függőlegesen a nyomás a forrasz magasságával arányos. A hidrosztatikus nyomásból és a kapilláris nyomásból adódó erő, az olvadt forraszanyag által kifejtett erő az alkatrész oldalát nyomó erő. Ez elsősorban fékezőerőként van jelen. A kapilláris nyomás a nyomáskülönbség a forraszanyag görbe felületének két oldala között. A nyomásesést a profil mentén a Laplace-egyenlet (5) írja le, ami a következő.

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (5)$$

Ahol r_1 és r_2 a görbület sugara az alkatrész fémezéséhez képest, γ a felületi feszültség. A két dimenziós esetben, r_2 végtelen (nincs görbület), ezért az egyenlet a következőre egyszerűsödik (6).

$$\Delta P = \gamma \frac{1}{r_1} \quad (6)$$

A hidrosztatikus nyomásból származó erőt a következő egyenlettel tudjuk kiszámolni. Minden ponton integrálni kell a nyomást az alkatrész felületén, így megkapjuk az erőt.

$$F_{hidro} = \int_{A_{alkatrész}} \rho \cdot g \cdot h \cdot dA \quad (7)$$

Ahol $A_{alkatrész}$ az alkatrész fémezésének felülete, ρ az olvadt forrasz sűrűsége, h az éppen aktuális magasság.

3.2.3 Viskozitásból adódó fékező erő [22]

A dinamikus súrlódás az olvadt forrasz és az alkatrész szilárd részei között fékezi az alkatrész mozgását. Ennélfogva egy folyadék dinamikus súrlódása valójában a folyadék viszkozitása. Az ebből adódó erőt leírhatjuk a Newton-egyenlettel.

$$F = \eta \cdot A \cdot \frac{dv}{dz} \quad (8)$$

Ahol η a folyadék viszkozitása, A az alkatrész fémezésének felszíne, $\frac{dv}{dz}$ hányados a nyírási sebesség, ahol dv a sebesség, illetve dz a két szilárd lemez közötti távolság.

3.3 Eddigi profilszámítás

Az előző fejezetből összefoglalva és általánosítva, az alkatrészre ható erők az alábbi egyenlettel írható le (9).

$$\vec{F}_{sum} = \vec{F}_{felületi_fesz} + \vec{F}_{hidrosztatikus} - \vec{F}_{viszkozitás} + \vec{F}_{gravitációs} \quad (9)$$

Ezt kifejtve a (10) egyenlet adódik.

$$F_{sum} = \sum_i^{LS, LG, SG} \int_v \gamma_i d\vec{l} + \int_{A_{alkatrész}} \rho \cdot g \cdot h d\vec{A} + \int_{A_{alkatrész}} \gamma_{LG} \cdot \frac{1}{r_1} \cdot d\vec{A} - \int_{A_{alkatrész}} \eta \cdot \frac{dv}{dz} d\vec{A} + \int_{V_{alkatrész}} \rho_{alk} \cdot g \cdot dV \quad (10)$$

Ahol γ a felületi feszültség, ρ a forrasz sűrűsége, g a gravitációs gyorsulás, illetve η a viszkozitás [22].

A forraszprofil számítása napjainkban elég nehézkes. Vannak speciális szoftverek, amik tudnak ilyen számításokat végrehajtani. Ilyen például az úgynevezett Surface Evolver program, amit K. A. Brakke készített 1999-ben [23], azóta széles körben használják ezt a megoldó-programot [24][25][26]. A profilszámítás alapja a felületen lévő energia minimalizálása, különböző peremfeltételek mellett. Nagyon speciális bemenetet vár, illetve nagy szaktudást és gyakorlatot igényel a használata. Természetesen modernebb programokkal is lehet számoltatni [27], ilyen például az ANSYS, ahol még különböző számításokat is el tudunk végezni. Ehhez is megfelelő gyakorlat kell, illetve a modellek pontos ismerete.

4. Irodalmi összefoglaló

Az irodalmazás során bemutattam az elektronika gyártás technológiájában alkalmazott újraömllesztés forrasztás technológiai lépéseit. A forraszpaszta tulajdonságait, az alkatrészre ható erők elméleti hátterét, illetve a jelenleg használt profilszámítás módszereit.

Elmondható, hogy az alkatrészek mozgását elsősorban a helyrehúzóadás szempontjából vizsgálja a szakirodalom. Jelenleg a profilszámítás nehézkes, különböző célszoftverek alkalmazása szükséges, amik speciális bemeneteket várnak, így oldva meg a végső alakot. Ezért célom a profilszámítás olyan, analitikus megoldása, amely lehetővé teszi a forraszprofil gyors számítását az alkatrészmozgásokat vizsgáló dinamikus modellekben.

5. Önálló munka

Saját munkám részeként bemutatok egy geometriai megközelítésekre alapuló profilszámítási módszert. Majd e módszer segítségével, egy nagyméretű SMD kondenzátort ($10 \times 9 \times 5.5$ mm; szélesség, mélység, magasság) vizsgálva bemutatom az újraömllesztési forrasztás közben létrejövő fellépő erőket, illetve az alkatrész mozgását. Munkám során a forrasztás/forrasztásosztá különböző állapotait veszem figyelembe. Egyrészt az alkatrész egyik oldalán már olvad állapotú a forrasztás, míg a másik oldalán még szilárd, pasztos állapotú. Másrészt a forrasztásosztá két állapota szerint is vizsgálom a fellépő erőket, miszerint a pasztos friss állapotú (a viszkozitása fékezi az alkatrészmozgást), illetve már kiszáradt állapotú (a súrlódás fékezi az alkatrészt), pl. a gyártósor leállása miatt.

5.1 Profilszámítás

Ahhoz, hogy ki tudjuk számolni a különböző erőket, először az alkatrész kivezetésén létrejövő forrasztásprofil különböző paramétereit kell kiszámolni. Ilyen tulajdonságok például a forrasztásanyag mennyisége, illetve a nedvesítési magasság. Ha mindez megvan, akkor tudjuk számolni az erőket, illetve ennek hatására kialakult mozgást.

5.1.1 Forrasztásanyag mennyiségének számítása

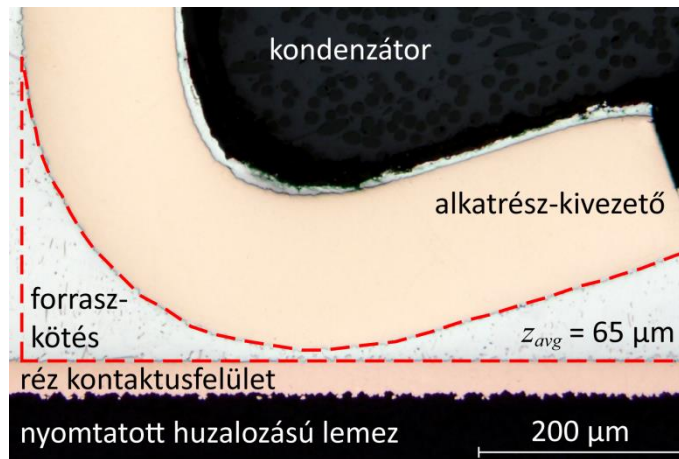
Az alkatrész, illetve a forrasztási felület dimenziója adott, így meglehetősen könnyen ki lehet számolni, mind a forrasztásosztá, mind a forrasztásanyag térfogatát. A dimenziók a következők: stencil vastagsága $125 \mu\text{m}$; a forrasztási felület $10 \times 2,5$ mm; forrasztásosztá zsugorodási tényezője $0,5$.

Ebből a három adatból a forrasztásosztá térfogata (11), illetve a forrasztásanyag térfogata (12) meghatározható. Mivel ezek a számolás folyamán fix értékűek, ezért itt megjelenítem a pontos értékeket is, nemcsak a számolás módját.

$$V_{\text{pasztos}} = Z_{\text{stencil}} \cdot X_{\text{pad}} \cdot Y_{\text{pad}} = 0,125 \text{ mm} \cdot 9 \text{ mm} \cdot 2,5 \text{ mm} = 2,8125 \text{ mm}^3 \quad (11)$$

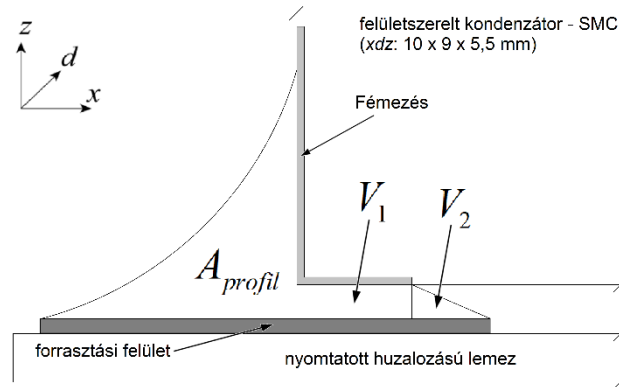
$$V_{\text{forrasztás}} = S \cdot V_{\text{pasztos}} = 0,5 \cdot 2,8125 \text{ mm}^3 = 1,40625 \text{ mm}^3 \quad (12)$$

A következő mérendő paraméter az alkatrész távolsága a szerelőlemeztől. Egy keresztcsiszolati (11. ábra) képről olvashatjuk le ezt az adatot. Mivel a kondenzátor alja nem teljesen sík, ezért átlagolni kell, így az átlagos távolság $65\ \mu\text{m}$ -re jött ki (11. ábra).



11. ábra – Keresztmetszeti csiszolat a nagyméretű kondenzátorról

Az eddigi eredmények alapján kiszámolható a profilszámításhoz szükséges forraszanyag térfogata (2,5 dimenziós modell esetén az egységnyi hosszra vett felülete). A teljes forraszmennyiségből ki kell vonni viszont még először azt a mennyiséget, ami az alkatrész alatt helyezkedik el. Ezen térfogatok közelítése két részből áll. Először is, ami az alsó oldali fémzés alatt van, azt egy egyszerű téglalappal lehet közelíteni (12. ábra – V_1). A másik térfogat az alsó oldali fémzés szélétől a forrasztási felület széléig terjedő mennyiség. Ezt egy derékszögű háromszög keresztmetszetű hasábbal érdemes közelíteni (12. ábra – V_2). A második közelítésnél már megjelenik az alkatrész pozíciója, így ez a mozgás folyamán dinamikusan változik. A forraszprofil felületét a (13) - (16) kifejezések segítségével kaphatjuk meg.



12. ábra - Levonandó forrasztérfogatok (V_1 és V_2) az alkatrész alatt

Az alsó oldali fémzés hossza (d_{af}) ezen alkatrésznél 500 μm .

$$V_1 = Z_{\text{átl.távolság}} \cdot d_{af} \cdot Y_{\text{alkatrész}} = 65 \mu\text{m} \cdot 500 \mu\text{m} \cdot 9 \text{ mm} = 0,2925 \text{ mm}^3 \quad (13)$$

$$V_2 = \frac{(X_{pad} - \text{Alk.poz.} - d_{af}) \cdot Z_{\text{átl.távolság}}}{2} \quad (14)$$

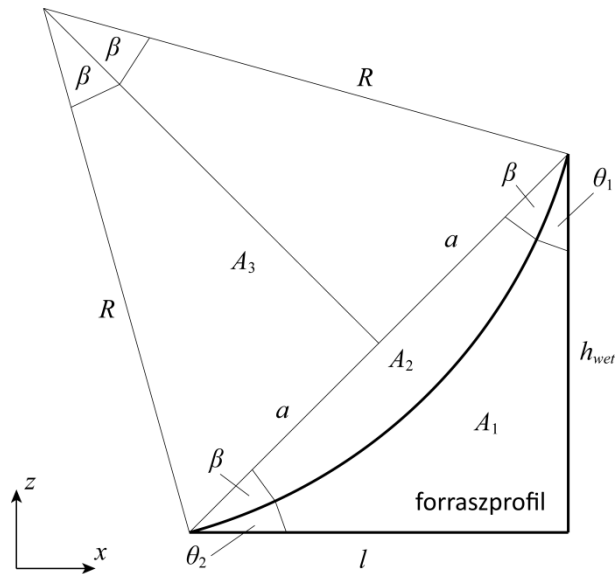
$$V_{\text{meniszkusz}} = V_{\text{forrasz}} - V_1 - V_2 \quad (15)$$

$$A_{profil} = \frac{V_{\text{meniszkusz}}}{Y_{pad}} \quad (16)$$

Ezen számítások után megvan a meniszkusz pontos felülete, amire a későbbiekben szükségünk lesz.

5.1.2 Geometriai megfontolások

A profilszámítás legfontosabb paramétere az alkatrészre ható erők szempontjából a nedvesítési magasság. Ennek a segítségével tudjuk számolni a hidrosztatikus nyomásból adódó, illetve a felületi feszültségből adódó erőket, amik kritikus pontjai a mozgást létrehozó erőknek.



13. ábra - Geometriai megközelítés

A forrasz oldalnézeti profilja egy R sugarú körrel közelíthető. A θ_1 , illetve a θ_2 szög a SAC305 forraszanyag használatakor előforduló 22° -os nedvesítési szög (#TODO# CIKK keresése). A β szögre így $45^\circ - 22^\circ = 23^\circ$ jön ki. A középponti és kerületi szögek tételének felhasználásával, így az R sugarú kör az ábrán jelölt középponti szöge $2 \cdot 23^\circ = 46^\circ$. Az A_1 terület az előző fejezetben tárgyalt számításokat követően kiszámolt felület.

Az A_3 körcikk területe a következőképpen számolandó (7):

$$A_3 = \frac{R^2 \cdot \pi \cdot 2\beta [^\circ]}{360^\circ} = \frac{R^2 \cdot \pi \cdot 2\beta [\text{rad}]}{2\pi} \quad (17)$$

Az R oldalú egyenlőszárú háromszög területe a következő (8):

$$T_\Delta = \frac{R^2 \cdot \sin 2\beta}{2} \quad (18)$$

Ezen két egyenlet felhasználásával az 13. ábra jelölt A_2 területet a következőképpen fejezhetjük ki a (17), illetve a (18) egyenlet felhasználásával (19).

$$A_2 = A_3 - T_\Delta = \frac{R^2 \cdot \pi \cdot 2\beta [\text{rad}]}{2\pi} - \frac{R^2 \cdot \sin 2\beta}{2} \quad (19)$$

Ezen körcikk területe egy másik módszerrel is kifejezhető, annak érdekében, hogy a kör sugarának kiszámításához szükséges egyenletrendszer teljes legyen. Ezt a következőképpen lehet megtenni (20).

$$A_2 = \frac{h_{wet}^2}{2} - A_1 \quad (20)$$

Az A_1 felület az előző fejezetben kiszámolt felület. A koszinusztétel és a Pitagorasztétel felhasználásával a segédegyenletek a következők (21).

$$2 \cdot h_{wet}^2 = (2a)^2 \quad \text{és} \quad (2a)^2 = R^2 + R^2 - 2R^2 \cos 2\beta \quad (21)$$

A h_{wet}^2 kifejezhető az R sugár segítségével (22).

$$h_{wet}^2 = \frac{R^2 + R^2 - 2R^2 \cos 2\beta}{2} \quad (22)$$

A (22) egyenlet a (20) egyenletbe való behelyettesítésébe a következőképpen alakul.

$$A_2 = \frac{R^2 + R^2 - 2R^2 \cos 2\beta}{4} - A_1 \quad (23)$$

Így kész a lineáris egyenletrendszerünk. Mivel a (23) egyenlet egyenlő a (19) egyenlettel, ezért a következő egyenlet (24) alakul ki.

$$\frac{R^2 \cdot \pi \cdot 2\beta [\text{rad}]}{2\pi} - \frac{R^2 \cdot \sin 2\beta}{2} = \frac{R^2 + R^2 - 2R^2 \cos 2\beta}{4} - A_1 \quad (24)$$

Ebben az egyenletben mind az A_1 , mind a β szög ismert, így R -re rendezve megkapjuk a meniszkuszra illeszthető kör sugarát (25).

$$R = \pm \sqrt{\frac{-2A_1}{2\beta - \sin(2\beta) + \cos(2\beta) - 1}} \quad (25)$$

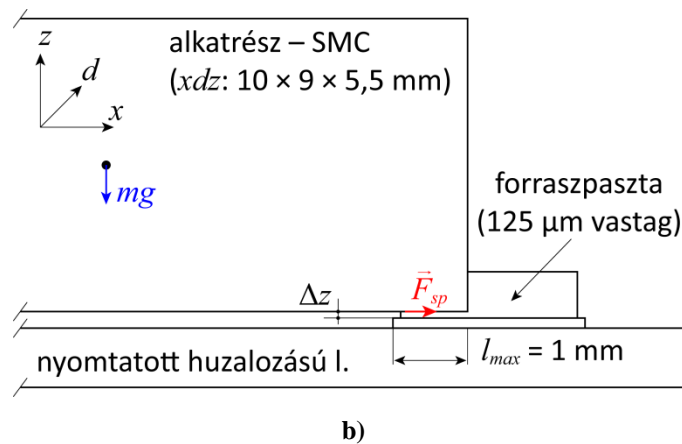
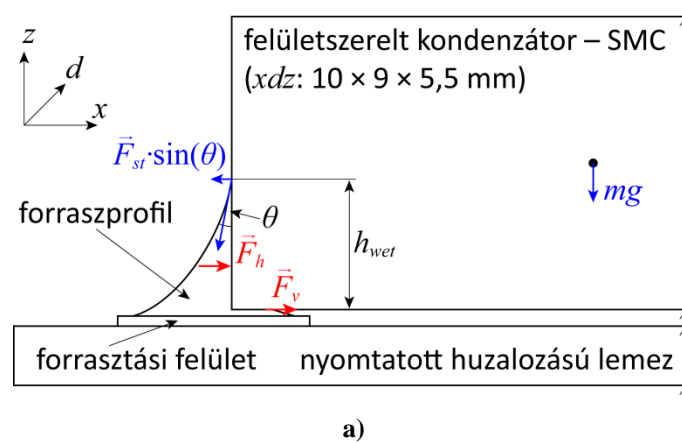
Ezen a ponton ismert R , illetve ismert még a β szög, így a nedvesítési magasság kiszámítása maradt hátra. Ezt a következő egyenletek (26) felhasználásával tudjuk megtenni.

$$a = R \cdot \sin \beta; \quad h_{wet} = \frac{2a}{\sqrt{2}} \rightarrow h_{wet} = \frac{2R \cdot \sin \beta}{\sqrt{2}} \quad (26)$$

Az analitikus megoldásnak köszönhetően a nedvesítési magasság számolása nem erőforrás-igényes, nem növeli a számítás idejét számottevően.

5.2 Alkatrészre ható erők számítása

Az alkatrészre ható erőket az alábbi ábra összegzi. Az 14. ábra a) azt az oldalt mutatja, ahol a forrasz olvadt állapotú; az 14. ábra b) pedig a másik kivezetést mutatja meg, ahol még a forrasz paszta állapotú.



14. ábra - Alkatrészre ható erők összegzése: a) az a kivezetés, ahol a forrasz olvadt állapotú; b) az a kivezetés, ahol a forrasz paszta állapotú

Az alkatrészre ható gyorsító erők összegzése a következőkből áll össze (27).

$$\vec{F}_{\text{húzó}} = \vec{F}_{\text{statikus}} - \vec{F}_{\text{olvadt_viszkozitás}} - \vec{F}_{\text{fékező}} \quad (27)$$

A felületi feszültségből származó erő az alábbi (28) egyenlet szemlélteti.

$$\vec{F}_{\text{felületi_fesz}} = \gamma \cdot W_c \cdot \sin(\theta) \quad (28)$$

Ahol γ a felületi feszültség, jelen esetben $544,9 \frac{mN}{m}$ [28], W_c az alkatrész szélessége, θ a nedvesítési szög. A hidrosztatikus nyomás által létrehozott fékező erőt a következő egyenlet (29) írja le.

$$\vec{F}_{\text{hidrosztatikus}} = \frac{h_{\text{wet}} \rho g}{2} A_{\text{fémzés}} \quad (29)$$

$A_{\text{fémzés}}$ az alkatrész alsó oldali fémzésének a felülete, h_{wet} a nedvesítési magasság, ρ a forraszanyag sűrűsége, illetve g az alkatrészre ható gravitációs erő. Így a statikusan ható erők összessége leírható az alábbiak (30) szerint.

$$\vec{F}_{\text{statikus}} = \gamma \cdot W_c \cdot \sin(\theta) - \frac{h_{\text{wet}} \rho g}{2} A_{\text{fémzés}} \quad (30)$$

Az olvadt forraszanyag is rendelkezik viszkozitással, ez egy fékező erőként jelenik meg az alkatrészre ható erők összegzésénél. Ennek kiszámolási módja a következő

$$\vec{F}_{\text{olvadt_viszkozitás}} = \eta_{\text{forrasz}} \cdot A_{\text{alsó_oldali_fémzés}} \cdot \frac{\partial v}{\partial z} \quad (31)$$

Ahol η_{forrasz} az olvadt forrasz viszkozitása, az $A_{\text{alsó_oldali_fémzés}}$ az alkatrész alsó oldali fémzésének területe és $\frac{\partial v}{\partial z}$ a nyírási ráta, más néven a sebesség-gradiens az alkatrész mozgásából számítva.

Ezen erők összegzéséből adódik az alkatrész egyik oldalán létrejövő erők összessége. Az ellenkező oldalon, ahol a forraszpaszta még nem olvadt meg, az alkatrész mozgása két peremfeltételre is vizsgáltam. Az első, amikor a stencilnyomtatás után a paszta még friss állapotú, így a fékező erő a forraszpaszta dinamikus viszkozitásából adódóan jön létre (32). A másik peremfeltétel, amikor a paszta már kiszáradt, ilyen eset előfordulhat például a gyártósor megállásánál. Ebben az esetben, a forraszpaszta súrlódási együtthatójából, az alkatrész tömege és a gravitációs gyorsulás által adott fékezőerőből adódó fékezéssel számol a megvalósított szimuláció (33).

$$\vec{F}_{\text{fékező_friss}} = \eta_{\text{paszta}} \cdot A_{\text{alsó_fémzés}} \cdot \frac{\partial v}{\partial z} \quad (32)$$

$$\vec{F}_{\text{fékező_száraz}} = \mu_{fr} mg \quad (33)$$

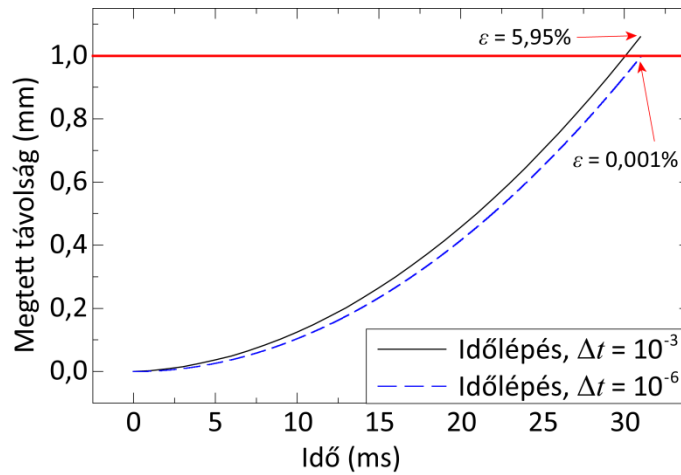
Ahol μ_{fr} a paszta súrlódási együtthatója, m az alkatrész tömege, g az alkatrészre ható gravitációs gyorsulás, az η_{paszta} a paszta dinamikus viszkozitása, ami függ a nyírási rátától is, így ez a viszkozitás a Carreau-Yasuda modell (1) alapján lett számolva minden egyes időlépésre. A modell paraméterei a következők [29].

$$\eta_0 = 10560 \text{ Pa} \cdot \text{s}, \quad \eta_\infty = 24 \text{ Pa} \cdot \text{s}, \quad \lambda = 340 \text{ s}, \quad n = 0,36, \quad CY = 7$$

A kalkulációkat saját fejlesztésű MATLAB kóddal valósítottam meg (I. függelék). Az alkatrész pozíciója 1500 μm , és 500 μm között változhat. Amint az alkatrész eléri az 500 μm pozíciót (megtett távolság 1 mm), a számolás leáll, majd összegzi az eredményeket, amit kiír a felhasználói felületre.

5.3 Időfüggés vizsgálata

A számítás során használt időlépés egy kritikus pontja a helyes eredmények meghatározásának. Ha túl kicsit ez az időosztás az eredmény nem lesz helyes, ha túl nagy, akkor a számítási idő növekszik meg. Az 15. ábra mutatja a különböző időosztások használatának hatását az eredményre.



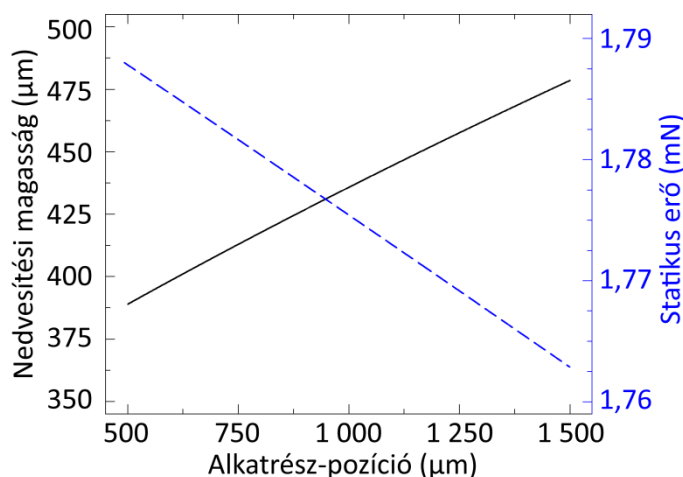
15. ábra - A kalkuláció eredményének időlépés-függése

Látható, hogy 1 ms-os időfelbontásnál a megtett távolság 1.06 mm, ami az eredeti 1 mm-hez képest 5.95%-os eltérésnek felel meg. Ha az időosztást 1 μ s-ra csökkentjük, akkor ez az eltérés már elhanyagolható, ráadásul a számítási idő is elfogadható (néhány másodperc).

6. Eredmények

6.1 Nedvesítési magasság és statikus erők számítása

Legelőször a nedvesítési magasságot, illetve ez alapján a statikus erőket kell kiszámolni. A számítás elején az alkatrész 1500 μm -es pozícióból indul, ami az a pont, ahol az alkatrész még a beültetési pozíciójából nem tolódott el. A számítás egészen az alkatrész 500 μm -es pozíciójáig tart, ez jelenti azt a mértékű elmozdulást, ahol az alkatrész már „lecsúszik” a szerelőlemezen lévő forrasztási felületről. Az 16. ábra mutatja az elmozdulás függvényében számolt statikus erőket (30), illetve a nedvesítési magasságot (26).



16. ábra - A nedvesítési magasság, illetve a statikus erők az alkatrész pozíciójának függvényében

Látható, hogy ahogy tolódik el az alkatrész, a nedvesítési magasság csökken, mivel egyre több folyékony halmazállapotú forrasztó van jelen az alkatrész alatt (12. ábra V_2 nő), így kisebb lesz a térfogata az alkatrész oldalát nedvesítő forrasztóanyagnak. Mivel kisebb a volumen, így kisebb nedvesítési magasság is alakul ki. Ezzel szemben a statikus erő nő. Ebbe az erőbe tartozik a felületi feszültségből (28), illetve a hidrosztatikus nyomásból származó (29) erők különbsége. Értelmszerűen, minél kisebb a nedvesítési magasság, annál kisebb lesz a hidrosztatikus nyomásból származó erő, így kisebb érték vonódik le a felületi feszültségből származó erőből. A felületi feszültségből származó erő nem függ az alkatrész pozíciójától.

6.2 Friss állapotban lévő paszta

Következőleg a frissen nyomtatott paszta által meghatározott peremfeltételt vizsgáltam. Ebben az esetben a statikus erők mellett, az olvadt forraszanyag viszkozitásából (31) adódó fékezőerő, illetve a dinamikusan számolt paszta viszkozitásából (32) adódó erő is bele lett véve a szimulációba.

Az eredmények azt mutatták, hogy ennek a peremfeltételnek az alkalmazása közben az alkatrész nem mozdul el, vagy csak nagyon kis mértékben (1–2 nm), ami annyira kicsi, hogy a szimuláció bizonytalansága is okozhatja ezt az elmozdulást.

Az eredményt alátámasztja, hogy az IPC-TM-650/2.2.44 szabvány leírja, hogy az általános tapadása a frissen nyomtatott forraszpasztának 25–50 g, ami hozzávetőleg $10\text{--}20 \frac{\text{mN}}{\text{mm}^2}$ tapadóságnak felel meg. Az alkatrész és a forraszpaszta érintkezési felülete nagyjából $4,5 \text{ mm}^2$, így ebből a tapadóságból származó erő számbeli értéke 45 mN és 90 mN közé tehető.

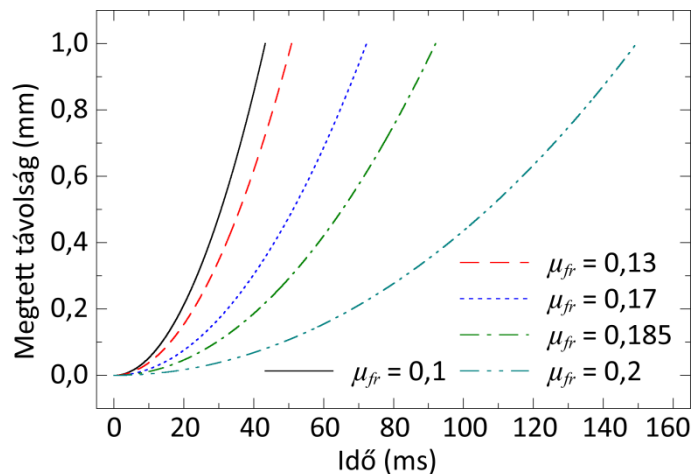
Ha az előző fejezetből kijött összesített gyorsítási erőt ($\sim 1,76\text{--}1,79 \text{ mN}$) vizsgáljuk, akkor látszik, hogy a tapadóságból származó erő szinte 2 nagyságrenddel nagyobb, mint az olvadt forraszanyag felületi feszültségéből származó erő. Ez azt jelenti, hogy a statikus erő nem képes kiszakítani az alkatrészt az ellenkező oldalon lévő forraszpasztából. A paszta viszkozitásából származó fékezőerő pedig 47,52 mN, így az alkatrész mozdulatlan marad.

A forraszpasztá addig pontosan a helyén tartja az alkatrészt, amíg mind a két kivezetésnél meg nem olvad a forraszanyag. Amikor ez megtörténik a két oldalon lévő erők kioltják egymást, így az alkatrész továbbra is a helyén marad, egészen a forrasztás végéig. Így elmondható, hogy a frissen nyomtatott forraszpasztáknál az alkatrész olyan mértékű eltolódása - ami akár nyitott kötést is eredményezhet – nem jöhet létre. Meg kell azonban jegyezni, hogy a statikus erő közel lineárisan csökken az alkatrészméretök csökkenésével ($\vec{F}_{\text{felületi_fesz}}$ lineárisan arányos az alkatrész szélességével), míg a fékezőerő pedig nemlineárisan, mivel az a fémezés felületétől függ. Így létezik olyan alkatrészméret, ahol kritikussá válik az, ha a két ellentétes oldalon nem azonos időpontban olvad meg a forrasz.

6.3 Kiszáradt állapotú forraszpaszta

A másik vizsgálat tárgya olyan forraszpaszta, amely valamilyen okból kifolyólag kiszárad. Ez például történhet a gyártósor leállásakor, amikor a szerelőlemezekre a paszta már felkerül stencilnyomtatással, viszont az újraömllesztéses forrasztás még nem történt meg.

Ennek a peremfeltételnek a vizsgálatokor a fékezőerő a paszta súrlódási együtthatójából származtatott (33) egyenlet megoldásával számol a szimuláció. Az ön súrlódási együtthatója 0,1 és 0,2 közötti. Ezen súrlódási együttható-tartományon az 17. ábra mutatott eredményeket kaptam. A vizsgált alkatrész tömege 0,861 g.



17. ábra – Alkatrész-elmozdulás különböző súrlódási együtthatók esetére

A legkisebb vizsgált súrlódási együtthatónál a kritikus 1 mm-t 43,3 ms alatt tette meg az alkatrész. Ezt azt jelenti, hogy amint megolvad a forraszanyag az egyik oldalon, az alkatrész pontosan ennyi idő alatt húzódik le a szerelőlemezen lévő forrasztási felületről.

A legnagyobb vizsgált súrlódási együttható 0,2-es értékkel került alkalmazásra. Az alkatrész lehúzódása ennél az értéknél 149,5 ms alatt történt meg. Megvizsgáltam azt is, hogyha a súrlódási együttható nagyobb, mint 0,2. Ekkor az alkatrész már ugyanúgy nem mozdult el az eredeti, beültetési pozícióból, mint a friss állapotú forraszpasztát vizsgáló esetben, mivel a súrlódásból adódó fékezőerő (18,5 mN) nagyobb volt, mint az olvadt forraszanyagot tartalmazó oldalon létrejövő gyorsító erő.

Még a legnagyobb súrlódási együtthatónál számolt idő (149.5 ms), is lényegesen kisebb, mint a forraszanyag olvadás lehetséges időkülönbsége a nagyméretű alkatrészek kivezetései között. Ez az érték egy nagyméretű FET-nél, akár 300–400 ms is lehet [30]. Így elmondható, hogyha az alkatrészre ható erők összességének sikerül megmozdítania az alkatrészt, akkor a lehúzóadás igen gyorsan megvalósul; még mielőtt mindkét oldalon megolvadna a forraszanyag, ami kiegyenlítené az alkatrészre ható erőket.

7. Összefoglalás

Dolgozatom legfőbb kérdése, hogy a nagyméretű alkatrészek kivezetései között fellépő hőmérsékletkülönbségből adódó forrasztóanyag megolvadásának időkülönbsége miatt az alkatrész elmozdulhat-e a beültetési pozícióból.

Eredményeim alapján kijelenthető, hogy ha az alkatrészre ható erők összessége képes megmozdítani az alkatrészt (pl. mert a forrasztás kiszárad a szerelés során), akkor az olyan kis idő alatt lecsúszik a szembe oldali forrasztási felületről, hogy akár nyílt kötés is létrejöhet, ami a végén gyártási hibához is vezethet. Ha az ellenőrzése e gyártmányoknak nem megfelelő, a termék piacra kikerülve mind anyagi, mind emberélet kockáztatásával járhat.

Az alkatrészek elmozdulásának kockázata jelentősen csökkenthető azzal, hogy a mai – gyártás akár 4 órás állási idejét is megengedő – szabályozásokat felülvizsgálják, és a megengedhető állásidőt a lehető legkisebbre csökkentik az elektronikai gyártási folyamatokért felelős mérnökök.

Irodalomjegyzék

- [1] X. Bao, N.-C. Lee, R. B. Raj, K. P. Rangan, és A. Maria, „Engineering solder paste performance through controlled stress rheology analysis”, *Soldering & Surface Mount Technology*, 1998 aug. .
- [2] Suresh G. Advani: „Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing”, Elsevier, 10 .kötet, 9–45. o., 1994
- [3] Lajos Tamás: „Az áramlástan alapjai”, 4. átdolgozott és bővített kiadás; Műegyetemi Kiadó, Budapest; 2008
- [4] M. Stadler, „Numerical Simulation of Reflow Soldering”, in 2019 20th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), 2019, 1–6 o.
- [5] O. Krammer, B. Varga, O. Krammer, és D. Bušek, „Investigating the effect of solder paste viscosity change on the pressure during stencil printing”, in 2016 IEEE 22nd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2016, 36–39 o.
- [6] K. J. Vachaparambil, G. Mårtensson, és L. Essén, „Rheological characterization of non-Brownian suspensions based on structure kinetics”, *Soldering & Surface Mount Technology*, 2018 febr.
- [7] J. Boyd, J. M. Buick, és S. Green, „Analysis of the Casson and Carreau-Yasuda non-Newtonian blood models in steady and oscillatory flows using the lattice Boltzmann method”, *Physics of Fluids*, 19. köt., 9. sz., 093103 o., 2007 szept.
- [8] G. Carty, S. Chatpun, és D. M. Espino, „Modeling Blood Flow Through Intracranial Aneurysms: A Comparison of Newtonian and Non-Newtonian Viscosity”, *J. Med. Biol. Eng.*, 36. köt., 3. sz., 396–409 o., 2016 jún..
- [9] N. Zhao, X. M. Pan, D. Q. Yu, H. T. Ma, és L. Wang, „Viscosity and Surface Tension of Liquid Sn-Cu Lead-Free Solders”, *Journal of Elec Materi*, 38 köt., 6. sz., 828–833 o., 2009. jún.
- [10] Jianbiao Pan, G. L. Tonkay, R. H. Storer, R. M. Sallade, és D. J. Leandri, „Critical variables of solder paste stencil printing for micro-BGA and fine-pitch QFP”, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 27. köt. , 2. sz., 125-132 o., 2004. ápr.
- [11] Harsányi Gábor: „Elektronikai Technológia”; BME Viking ZRt., Budapest, Azonosító: VI202-010, 2013

- [12] BME ETT TFM mérési útmutató
- [13] T.-N. Tsai, „Modeling and optimization of stencil printing operations: A comparison study”, *Computers & Industrial Engineering*, 54. köt. , 3. sz., 374–389 o. ,2008. ápr.
- [14] S. Lu, X. Zhang, és Y. Kuang, „An Integrated Inspection Method based on Machine Vision for Solder Paste Depositing”, in 2007 IEEE International Conference on Control and Automation, 2007, 137–141. o.
- [15] M. Ayob és G. Kendall, „A survey of surface mount device placement machine optimisation: Machine classification”, *European Journal of Operational Research*, 186 köt.,3 sz.,893–914 o., 2008 máj..
- [16] T.-N. Tsai, „Development of a soldering quality classifier system using a hybrid data mining approach”, *Expert Systems with Applications*, 39. köt.,5727–5738 o., 2012. máj.
- [17] P. M. A. Vitoriano, Tito. G. Amaral, és O. P. Dias, „Automatic Optical Inspection for Surface Mounting Devices with IPC-A-610D compliance”, in 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2011, 1–7. o.
- [18] J. R. Ellis és G. Y. Masada, „Dynamic behavior of SMT chip capacitors during solder reflow”, *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 13 köt., 3 sz., 545–552 o., 1990. szept.
- [19] K. Dušek, M. Novák, és A. Rudajevová, „Study of the components self-alignment in surface mount technology”, in 2012 35th International Spring Seminar on Electronics Technology, 2012, 197–200. o.
- [20] Y. Yuan és T. R. Lee, „Contact Angle and Wetting Properties”, in *Surface Science Techniques*, G. Bracco és B. Holst, Szerk. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, 3–34. o.
- [21] O. Krammer és L. Puskás, „Investigating the effect of nitrogen atmosphere on lead-free solder wetting angle”, 2011 IEEE 17th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 159–162 o., 2011.
- [22] O. Krammer és Z. Illyefalvi-Vitez, „Investigating the self-alignment of chip components during reflow soldering”, *Periodica Polytechnica Electrical Engineering*, 52 köt., 0 2008.
- [23] K. A. Brakke, "Surface Evolver Manual", Verzió 2.14,48. o., 1999
- [24] Renzhe Zhao, Yun Zhang, R. W. Johnson, és D. K. Harris, „A study of normal, restoring, and fillet forces and solder bump geometry during reflow in concurrent underfill/reflow flip chip assembly”, in 2001 Proceedings. 51st

Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.01CH37220),
2001, 699–703 o..

- [25] X. J. Zhao, C. Wang, G. Wang, G. Zheng, és S. Yang, „An integrated system for prediction and analysis of solder interconnection shapes”, Electronics Packaging Manufacturing, IEEE Transactions on, 23 köt., 87–92 o., 2000 máj..
- [26] Y. H. Tian and C. Q. Wang, "Shape Prediction and Reliability Design of Ball Grid Array Solder Joints ", Key Engineering Materials, 353-358 köt., 2944-2947 o., 2007
- [27] A. M. Najib, M. Z. Abdullah, A. A. Saad, Z. Samsudin, és F. Che Ani, „Numerical simulation of self-alignment of chip resistor components for different silver content during reflow soldering”, Microelectronics Reliability, 79 köt., 69–78 o., 2017.
- [28] K. Dusek és J. Urbánek, „Surface tension measurement of the solders by non-wetting specimen”, 2008 31st International Spring Seminar on Electronics Technology, 354–357 o. , 2008.
- [29] T. I. Al-Ma'aiteh és O. Krammer, „Non-Newtonian numerical modelling of solder paste viscosity measurement”, Soldering & Surface Mount Technology, 2019. jún.
- [30] B. Illés és G. Harsányi, „3D thermal model to investigate component displacement phenomenon during reflow soldering”, Microelectronics Reliability, 48. köt., 7. sz., 1062–1068 o., 2008. júl.

Ábrajegyzék

1. ábra - nem-Newtoni folyadékok folyásgörbéi [2]
2. ábra - Carreau-Yasuda modell illesztése egy forraszpaszta viszkozitás-mérés adataira [6]
3. ábra - Olvadt forrasz viszkozitása különböző hőmérsékleten a) Sn-0,7Cu b) Sn-2Cu
4. ábra - A viszkozitás lineáris függése a hőmérséklettől a) Sn-0.7Cu b) Sn-2Cu
5. ábra – Stencilnyomtatás [12]
6. ábra - Ültetőgépek típusai a) pick and place, b) collect and place [11]
7. ábra - Hőprofil
8. ábra - A Wassink-Verguld modell vázlata
9. ábra - Ellis-Masada modell
10. ábra - Különböző halmazállapotú anyagok közötti felületi feszültség
11. ábra – Keresztmetszeti csiszolat a nagyméretű kondenzátorról
12. ábra - Levonandó forrasztérfogatok (V_1 és V_2) az alkatrész alatt
13. ábra - Geometriai megközelítés
14. ábra - Alkatrészre ható erők összegzése: a) az a kivezetés, ahol a forrasz olvadt állapotú; b) az a kivezetés, ahol a forrasz paszta állapotú
15. ábra - A kalkuláció eredményének időlépés-függése
16. ábra - A nedvesítési magasság, illetve a statikus erők az alkatrész pozíciójának függvényében
17. ábra – Alkatrész-elmozdulás különböző súrlódási együtthatók esetére

I. függelék – Matlab kód

```
% ---- main.m file ----

delta_t = 10 ^ -6;           %időfelbontás
gamma =544.9*10^-3;         %felületi feszültség
theta =22;                  %nedvesítési szög
delta_z=65*10^-6;           %átlagos távolság
component_width=9*10^-3;    %alkatrész szélessége
eta_molten=0.00235;         %olvadt viszkozitás

surface=500*10^-6*component_width; %alsó oldali fémezés
friction = true;            %súrlódási "flag"
slow = true;                %lassítás "flag"

s = [];                     %út placeholder
v=[];                       %sebesség placeholder
t=[];                       %idő placeholder
a=[];                       %gyorulás placeholder

m=0.861*10^-3;             %alkatrész tömege
g=9.81;                    %gravitációs gyorsulás
u=0.2;                      %súrlódási együttható

f_friction=u*m*g;          %súrlódási erő

s(1) = 0;                   %kezdeti megtett út
v(1) = 0;                   %kezdeti sebesség
t(1) = 1*delta_t;          %kezdeti idő
a(1) = 0;                   %kezdeti gyorsulás
cond = true;                %segédváltozó while ciklushoz
i = 2;                      %ciklusváltozó
while (cond)
    %statikus erő számítása
    fsum = static_force(gamma, theta, delta_z, component_width, s(i-1)+0.5*10^-3);
    %ha a lassítás "flag" 1
    if (slow)
        %olvadt forrasz viszkozitásával történő történő lassítás
        fsum = fsum - viscosity_force(surface, eta_molten, v(i-1), delta_z);
        %ha súrlódással számol
        if (friction)
            %súrlódási erővel történő lassítás
            fsum=fsum-f_friction;
        else
            %ha a paszta viszkozitásával számol
            %type IV paszta viszkozitásának számolása adott sebességnél
            eta_paste=type4_vis_cy(v(i-1)/delta_z);
            %friss paszta viszkozitásából eredő erő számolása
            fvis=viscosity_force(surface, eta_paste, v(i-1), delta_z);
            %lassítás
            fsum=fsum-fvis;
        end
    end
end
```

```

%ha meghaladja a fékezőerő a gyorsítási erőt
if(fsum<0)
fsum=0;
error ('Fsum < Ffekezés => nem mozdul')
end

%aktuális gyorsulás/sebesség számítása
a(i)=fsum/m;
v(i)=v(i-1)+a(i)*delta_t;

%aktuális út/idő számítása
s(i)=s(i-1)+v(i)*delta_t+a(i)/2*(delta_t^2);
t(i)=i*delta_t;

%cond változó addig igaz, amíg nem mozdult 1 mm-t az alkatrész
cond=s(i)<=10^-3;
i=i+1;

if(mod(i,1000)==1)
i
end
end

i*delta_t*1000 %ms

% ---- static_force.m file ----

function      ret_stat=static_force(gamma,      theta,      delta_z,
component_width, pos)
%surfacetension-hydrostatic

%felületi feszültségből adódó erő
surf_ten=surface_tension(gamma,component_width,theta);
%meniszkus felülete
men_surf=solder_surface(delta_z,pos);
%h_wet számítása
h=iterate_h(men_surf,pos);
h_wet=h-delta_z;
%hidrosztatikus nyomsából származó erő
hydro=hydrostatic(h_wet,component_width);
ret_stat=surf_ten-hydro;

end

% ---- surface_tension.m file ---

function ret_surf_ten=surface_tension(gamma, component_width,theta)
%theta radiánba
theta=theta*pi/180;
%erő számolása
ret_surf_ten=gamma*component_width*sin(theta);
end

```



```

% ---- solder_surface.m file ----

function ret_surf=solder_surface(delta_z,pos)

sten_x=2.5*10^-3;           %stencil x
sten_d=9*10^-3;           %stencil d
sten_z=125*10^-6;        %stencil vastagság
s=0.5;                    %zsugorodási együttható
paste_volume=sten_x*sten_d*sten_z; %paszta térfogat
solder_volume=paste_volume*s; %forrasz térfogat

bottom_metal=500*10^-6;   %alsó oldali fémezés
component_width=9*10^-3;  %alkatrész szélessége

%V1 térfogat számítása
v1=delta_z*bottom_metal*component_width;

%V2 térfogatá számítása
pad_x=2.5*10^-3;
v2=((pad_x-pos-bottom_metal)*delta_z*component_width)/2;

%meniszkusz térfogat számítása
men_vol=((solder_volume-v1-v2));
ret_surf=men_vol/component_width;

end

% ---- iterate_h.m file ----

function ret_h=iterate_h(men_surf, pos)
%surface m^2, pos m
a=0.1*10^-3; %0.1 mmről indítva
h=0.1*10^-3; %
delta_h=1*10^-6; %1 um "felbontás"
diff=1;

%béta fokba
beta=23*pi/180;

%R számítása
R=- (2*(sqrt(-men_surf*(beta+(cos(beta))^2-cos(beta)*sin(beta)-1)))) / (2*beta+cos(2*beta)-sin(2*beta)-1);
%Kerületi és középponti szögek tételével kijött h magasság
h_kksz=(2*R*sin(beta))/sqrt(2);
%ha ez a h kisebb mint az adott pozíció
if(h_kksz<pos)
    ret_h=h_kksz;
    return
end

%ha nem, akkor nem szimmetrikus, iterálni kell
while(diff>=0)
    alpha=atan(a/h); %rad
    beta=alpha-(22*pi/180); %rad
    g=sqrt(a^2+h^2); %átfogó
    r=(g/2)/sin(beta);
    gamma=2*beta;

```

```

t_korcikk=r^2*beta; %korcikk terület
t_esz3szog=(r^2*sin(gamma))/2;
t_szelet=t_korcikk-t_esz3szog;
t_3szog=a*h/2;
diff=men_surf-(t_3szog-t_szelet);
if (a<=pos) %ha "odafer" akkor mindketto novelese
    a=a+delta_h;
    h=h+delta_h;
else %ha nem fer oda, akkor csak a magassag novelese
    h=h+delta_h;
end
end
ret_h=h-delta_h;
end

% ---- hydrostatic.m file ----

function ret_hyd=hydrostatic(h_wet, component_width)
rho=7320; %kg/m3 forrasz sűrűsége
g=9.81; %m/s2 gravitációs gyorsulás
ret_hyd=(rho*g*h_wet^2*component_width)/2;
end

% ---- viscosity_force.m

function ret_vis_force=viscosity_force(surface,eta,velocity,delta_z)
%viszkozitásból adódó erő számítása
ret_vis_force=surface*eta*velocity/delta_z;
end

% ---- type4_vis_cy.m file ----

%type IV paszta dinamikus viszkozitásának számítása Carreau-Yasuda
modell
%alapján
function ret_viscosity=type4_vis_cy(shear_rate)

eta_inf=24; %végtelen viszkozitás
lambda=110; %időállandó
n=0.36; %hatványtényező
a=7; %CY konstans
eta_null=10560; %0 hoz tartozó viszkozitás
ret_viscosity=viscosity_cy(shear_rate, eta_inf, eta_null, lambda,
n,a);
end

% ---- viscosity_cy.m file ----

function ret_viscosity=viscosity_cy(shear_rate, eta_inf, eta_null,
lambda, n, a)
%CY modell alapján viszkozitás visszaadása
ret_viscosity=eta_inf + (eta_null-
eta_inf)/((1+(lambda*shear_rate)^a)^((1-n)/a));
end

```

