



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

2013/2014 tanév, 1. félév

Tudományos Diákköri Konferencia

Új módszer Pin-in-paste technológiához szükséges forraszpaszta mennyiségének meghatározására

Készítette: Varga Bertalan (NISWBI)

Konzulens: Dr. Krammer Olivér

BUDAPEST

2013

Tartalomjegyzék:

1. Bevezetés	3
2. Az újraömllesztés forrasztási technológia.....	4
2.1. Az újraömllesztés forrasztási technológia forrasanyagai	4
2.1.1. Forrasztótvözetek	4
2.1.2. A forraszpaszta	5
2.2. A stencilnyomtatás	6
2.3. Alkatrész beültetés.....	7
2.4. A forrasztási folyamat	8
3. A Pin-in-Paste technológia.....	10
3.1. A technológia leírása	10
3.2. Forraszpaszta mennyiségének meghatározása.....	12
4. Önálló munka	20
4.1. A forrasztott kötések modelljei	21
4.2. Térfogatszámítás a modell segítségével	23
4.3. A modell ellenörzése	27
4.3.1. Az ellenörzésnél használt alkatrész, előformázott forrasz és szerelőlemez.....	28
4.3.2. Az ellenörzés folyamatparaméterei	30
4.4. Eredmények.....	33
4.5. Összefoglalás	38
Irodalomjegyzék:.....	39
Ábrajegyzék:.....	41
Táblázatjegyzék:.....	41
I. Függelék.....	43
II. Függelék	45

1. Bevezetés

A felületszerelt alkatrészek gyors elterjedése miatt egyre kevesebb furatszerelt alkatrészt használunk a szerelőlemezeken. Ugyanakkor vannak olyan áramköri elemek, amik csak furatszerelt formában állnak rendelkezésre (pl.: csatlakozók). Ez a legfőbb oka, a Pin-in-Paste technológia (furatszerelt alkatrészek forrasztása újraömllesztéses technikával) folyamatos fejlesztésének. Ahhoz hogy a folyamat hibamentes legyen legfontosabb a megfelelő térfogatú forraszpaszta fölville a hordozóra. A túl sok vagy túl kevés mennyiség különféle forrasztási hibákat okozhat, úgymint a forrasz elrepedése vagy a forraszgolyó képződés. Ám a hibák elkerülése érdekében nem elég a stencil apertúrákat és a nyomtatási folyamatot pontosan tervezni és szabályozni, hanem a szükséges paszta térfogat pontos számítása is elengedhetetlen. Az elterjedt irodalmi képlet azonban igen nagy közelítésekkel él a forrasz meniszkusz térfogatának számítása közben. Például: a meniszkusz alakját negyed körívnek veszi, így a nedvesítési szöget 0° -nak. Ez a megközelítés alulról becsüli a szükséges térfogatot, ezért határoztam el, hogy fölülvizsgálom az irodalmi explicit összefüggést.

A dolgozatban új módszer kerül bemutatásra, aminek segítségével a Pin-in-Paste technológiához szükséges forraszpaszta térfogatát lehet meghatározni furatszerelt alkatrészekhez. Az így kapott eredményeket összehasonlítottam az iparban széles körűen alkalmazott térfogatszámításra vonatkozó irodalmi képlet eredményivel. A Surface Evolver nevű folyadékprofil-modellező programmal készítettem el az ideális forrasztás alakját a furatszerelt alkatrészek számára. A profilra az alábbi feltételek érvényesek: a forrasz végignedvesíti a forrasztási felületet; és az érintkezési szög megegyezik a statikus nedvesítési szöggel.

A kísérlet során két különböző geometriájú kivezetéssel rendelkező alkatrészt használtam, egy négyzet és egy kör keresztmetszetűt. Az első vizsgálatban a fémezett falú furat alkatrész kivezetéshez képesti relatív sugarát növeltem $+100\ \mu\text{m}$ -tól $+375\ \mu\text{m}$ -ig. A második vizsgálatban változatlan furatátmérőhöz a forrasztási felület szélességét növeltem $100\ \mu\text{m}$ -ról $500\ \mu\text{m}$ -ig. Az így kapott térfogatokat és az elméleti képlet eredményeit összehasonlítva korrekciós tényezőt állapítottam meg a szükséges pasztatérfogat meghatározására.

2. Az újraömllesztéses forrasztási technológia

Az újraömllesztéses forrasztás forrasztott kötések létrehozására szolgáló technológia, amikor a forrasztóanyag paszta formájában kerül föl a hordozóra, majd az alkatrészek elhelyezése után a forrasztóanyagot melegítéssel megömllesztve alakítják ki a forrasztott kötések. Három lépésből áll, ezek következnek részletesen bemutatva. [1]

2.1. Az újraömllesztéses forrasztási technológia forrasztóanyagai

Régebben minden a mikroelektronikában összekötésre használt forrasztóanyag ón-ólom tartalmú volt. A legszélesebb körben használt az eutektikus SnPb forrasztó. Világszerte föltörekvő környezetvédelmi előírások a környezetszennyező ólom tartalmú forrasztók kiküszöbölésére törekednek. [2] EU előírás szerint 2006. július 1-től a hagyományos ólomtartalmú forrasztók csak speciális esetekben engedélyezettek, így legtöbbször ólommentes forrasztót használunk. [1] Emiatt fontos feladat napjainkban a megbízható ólommentes forrasztóanyagok előállításának.

2.1.1. Forrasztóötvözetek

Az ónnak (Sn) az a képessége, hogy a forrasztási felületek széles skáláját jól nedvesíti, okozta, hogy az ólommentes forrasztóötvözetek legfőbb komponensévé vált. Hátránya, hogy hajlamos whisker növesztésére, ami függ a környezeti hatásoktól és a forrasztási felület anyagától is és már 51 °C-on gyorsan növekszik. A whiskerek nem befolyásolják a forrasztás minőségét, azonban egy hosszabb whisker szál rövidzárat okozhat a finom raszterosztású alkatrészek kivezetései között. [2]

Az eutektikus ón-ólom forrasztóötvözet olvadáspontja 183 °C, ezért azt célszerű olyan ólommentes forrasztóval helyettesíteni, aminek az olvadás pontja is hasonló, ellenkező esetben le kell cserélni a gyártóberendezéseket, ami magas kiadásokkal jár. A mai ólommentes forrasztóknak nagyjából 220 °C az olvadáspontjuk, ami miatt emelni kellett az újraömllesztési folyamat csúcshőmérsékletét ($\geq 235^\circ\text{C}$), viszont a műanyag alkatrésztokozások 260 °C körül már sérülni kezdenek, ezért kritikus a hőprofil megtervezése. [2]

Ötvözet rendszereknél két fontos hőmérsékletet különböztetünk meg. Az a hőmérséklet, ami alatt az ötvözet csak szilárd halmazállapotban létezik a szolidusz hőmérséklet. E fölött megkezdődik az olvadás, így keverednek a szilárd és folyékony fázisok. Amikor az ötvözet elérte a likvidusz hőmérsékletet, már csak olvadék fázis van jelen. Eutektikus ötvözet esetén ez a két hőmérséklet egybe esik, ezért nincs kétfázisú állapota. [3]

Az alábbi táblázatban szerepelnek a leggyakrabban használt forrasztóötvözetek szolidusz (T_s), likvidusz (T_l) vagy eutektikus (T_e) hőmérsékletei.

1. táblázat. A leggyakrabban használt forrasztóötvözetek olvadáspontjai [2,4]

Ötvözet összetétele	T_s (°C)	T_l (°C)	T_e (°C)
Sn-37Pb			183
Sn-40Pb	183	187	
Sn-3,5Ag			211
Sn-0,7Cu			227
Bi-42Sn			139
Bi-43Sn			139
Sn-3Ag-0,5Cu	217	221	
Sn-3,8Ag-0,7Cu			217

Az ólommentes forrasztóötvözetek használata miatt magasabb hőmérsékleten kell az újraömlesztést elvégezni, ezért a megfelelő alkatrészek kiválasztása nagyobb figyelmet igényel. A leggyakrabban használt ólommentes ötvözet (ón, ezüst, réz), újraömlesztési hőmérséklete 217 °C és 221 °C között van.[5] Ez az 1. táblázat alapján jóval magasabb, mint bármely ólom tartalmú ötvözeté.

2.1.2. A forraszpaszta

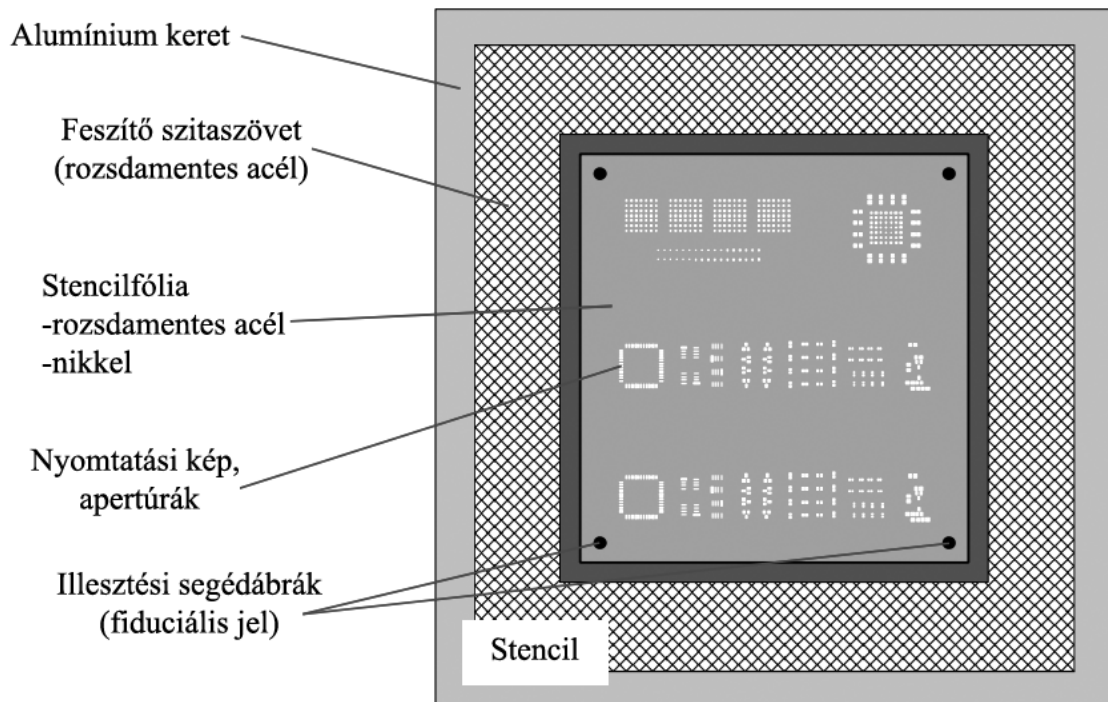
A forraszpaszta (solder paste) folyasztószer (flux) és forrasz szemcsék szuszpenziója, ahol a szemcsék tipikus átmérője 20-45 μm és a paszta fémtartalma 89-91 tömegszázalék. [6] A pasztákat eltérő viszkozitással gyártják, attól függően, hogy azok cseppadagolással, vagy stencilnyomtatással kerülnek-e fölhordásra a hordozóra. A fluxok, környezetvédelmi okokból, illékony szerves vegyületeket (VOC) nem tartalmaznak, ezen kívül halogénmentesek is. [1]

A forraszpaszta kiválasztásának legmeghatározóbb szempontja a szerelőlemezen tervezett legkisebb raszter távolság. A minél magasabb fémtartalom kedvezőbb a finom raszterosztású és a furatszerelt alkatrészek esetében is. Előnyös még, ha kevés folyasztószer maradványt tartalmaz a paszta, mert elkerülhető a tisztítás. [5]

További követelmény, hogy az újraömlesztés közben a pasztának ne legyen jelentős a megrogyása. A ma használt legtöbb paszta ennek a követelménynek eleget tesz.[5]

2.2. A stencilnyomtatás

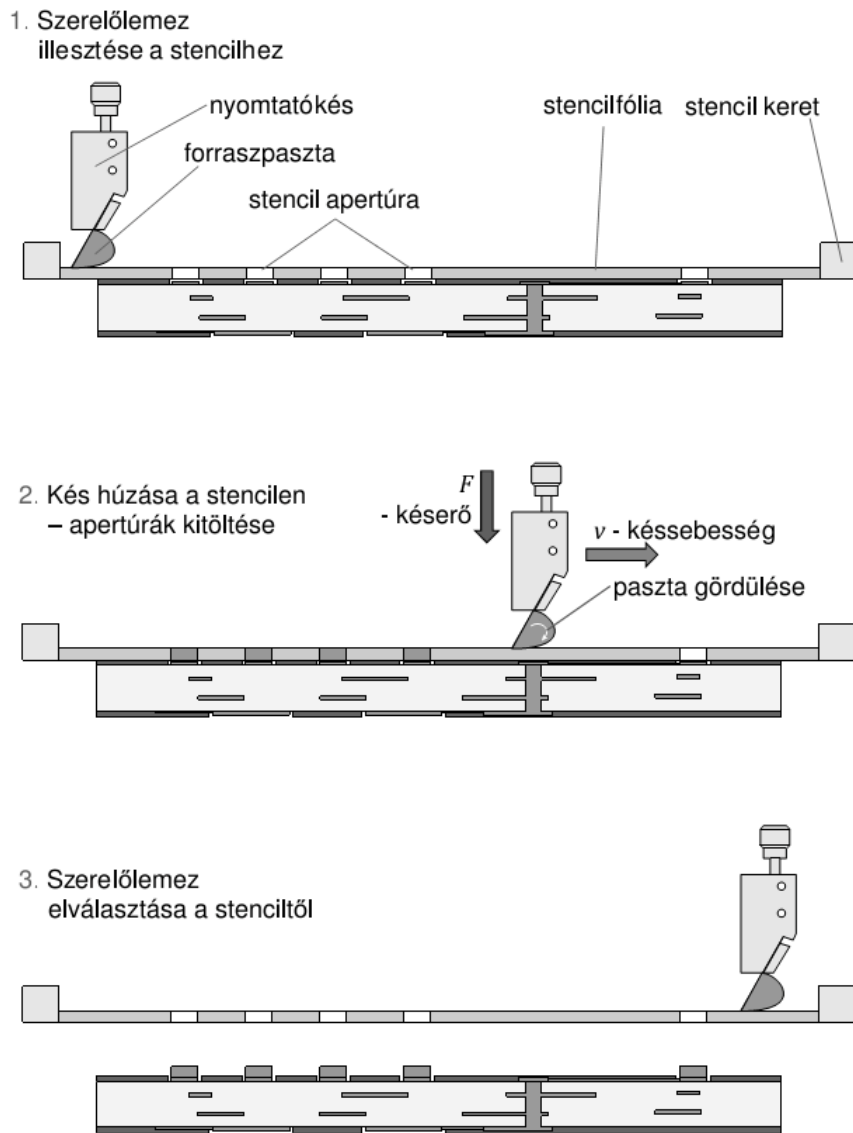
A stencilnyomtatás másik fontos kelléke maga a stencil. A stencilek használata lehetővé teszi a meghatározott alakú és mennyiségű forraszpaszta fölvitelét forrasztási felületekre (és máshova nem). A stencil keretre feszített vékony fémfólia, amelyen apertúrákat (forrasztási felületeknek megfelelő ablakok) alakítanak ki. A forraszpaszta nyomtatásához használt stencilek általában 75–200 μm vastagok. [6]



1. ábra. A stencilek fölépítése [6]

Stencilnyomtatás során a szerelőlemezt a stencilnyomtató berendezés először rögzíti, hogy ne tudjon elmozdulni a nyomtatás közben. Ezután a szerelőlemezen kialakított fiduciális (illesztést segítő) jelek segítségével biztosítjuk azt, hogy az apertúrák ténylegesen a kontaktusfelületek fölött helyezkedjenek el. A szerelőlemez pozicionálása után a nyomtatógép közvetlenül a stencil alsó felületéhez emeli a lemezt, majd a kést a stencil felső felületére helyezi. A kés (squeegee) a nyomtatás során maga előtt tolva átréseli a forraszpasztát, a stencil apertúrákon, és egyúttal a fölösleges pasztamennyiséget le is húzza stencil felületéről. A kés műanyagból vagy fémből készül. A nyomtatás akkor lesz megfelelő, ha a nyomtatókés és a stencil felülete által bezárt szög 45° és 60° között van. Utolsó lépésként a nyomtató gép elválasztja a hordozót a stenciltől és a paszta a hordozóra tapad. [6]

A stencilnyomtatás legfontosabb folyamatparaméterei: késerő; késsebesség; elválasztási sebesség. [6]



2. ábra. A stencilnyomtatás folyamata [7]

2.3. Alkatrész beültetés

A hagyományos felületszerelt alkatrészek beültetése megoldható egy átlagos pick-and-place beültető géppel. Kis mennyiségben mind az aktív és passzív alkatrészek ugyanazzal a géppel kerülnek beültetésre. Egyébként több beültetőt használnak. [5]

Általánosságban az alkatrészek beültetési folyamata a következő. A beültetőfej a tálcában található alkatrészeket vákuumpipettájával (nozzle) megfogja és kiemeli a tálcából. A pipettán lévő alkatrész nem feltétlenül áll a beültetésnek megfelelően, ezért szükség van a pozíciójának meghatározására, ami kamera vagy lézernyaláb segítségével történhet, majd pedig a megfelelő orientációba forgatására és a szöghibájának korrekciójára kerül sor. Ezután a beültetőfej a szerelőlemezen lévő forrasztási felületnek megfelelően pozicionálja az

alkatrészt, belenyomja a kontaktusfelületen lévő pasztába, majd a vákuum kikapcsolásával elengedi.[6]

Az alkatrész beültető gépeket csoportosíthatjuk automatizáltság foka szerint. Ebben az esetben lehet: kézi vezérlésű; automata; félautomata. A másik csoportosítási mód pedig a beültető fej kialakítása szerint történik, ekkor megkülönböztetünk pick-and-place (megfog és beültet) és collect-and-place (összegyűjt és beültet) típusú gépeket. [6]

A pick-and-place típusú beültetők az alkatrészeket egyesével veszik fel a tárából és egyesével ültetik be azokat a szerelőlemezre. Az alkatrész beültetés sebessége körülbelül 14.000 darab óránként. Ezek a fejek lassúak a revolver fejes gépekhez képest, viszont az alkatrész beültetési pontosságuk jobb, így finom raszterosztású integrált áramkörök beültetéséhez remekül használható.[6]

A collect-and-place beültetőfejek egy munkafolyamat során az alkatrésztárolókból egymás után több alkatrészt vesznek föl, így megspórolják azt az időt, ami a tálcához és a szerelőlemezhez minden egyes alkatrésztért való megtett úthoz kell, ezért gyorsabbak, mint a pick-and-place gépek. Az összegyűjtött alkatrészeket a megfelelő pozícióba való mozgatás és forgatás után ülteti be a fej. Az alkatrész beültetés sebessége elérheti a 40.000–90.000 darabot óránként. A gyorsaság viszont a beültetési pontosság rovására megy, így ezt a módszert kisméretű, (főleg passzív) felületszerelt alkatrészek beültetésére használják. [1,6]

2.4. A forrasztási folyamat

Az alkatrész beültetés után a szerelőlemezt egy újraömlesztő kemencébe helyezik. Ezek a kemencék fölépítésük szerint lehetnek tálcás, vagy szállítószalagos alagútkemencék. A tálcás kivitelű kemencék nem illeszthetőek gyártósorba, alacsony termelékenység jellemzi, kis darabszámú szériákhoz, vagy labormunkákhoz ajánlott. A tömeggyártásban az alagútkemencéket használják, mert gyártósorba illeszthetőek, több fűtőzónát tartalmaznak (amik hőmérséklete külön-külön szabályozható) és pontosabb hőprofil szabályozás valósul meg. [6]

A fűtés típusa szerint megkülönböztetünk infrasugaras, kényszerkonvekciós és vegyes fűtésű kemencéket. Infrasugaras kemencénél infrasugárzó csövek biztosítják a hőmennyiséget, ami a csövek teljesítményének állításával szabályozható. Kényszerkonvekciós esetben a hőátadást forró gáz áramoltatásával biztosítják. [6]

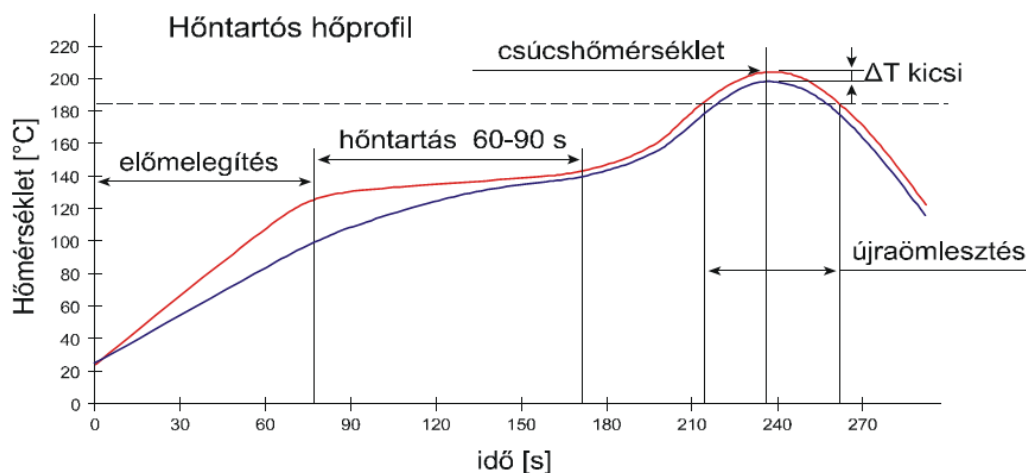
A hőmérsékletek, az előmelegítés, az atmoszféra meghatározása mind a folyamatmérnök feladata, amikor az újraömlésztéses forrasztás hőprofilját beállítja. A hőprofil egyes fázisai, úgymint előmelegítés, hűntartás, újraömlésztés, hűtés, az alagútkemence zónáiban állíthatók be, meghatározott sorrendben. [5]

Amikor a szerelőlemez bekerül az újraömlésztő kemencébe, akkor a környezeti hőmérséklet 18-20 °C körül van. Erről indul az előmelegítés (preheat) fázis. A hőmérséklet emelése a kemence beállításaitól és a hordozó hőigényétől függ (1-2 °C másodpercenként [6]). Előmelegítés közben az illékony anyagok távoznak a forrasztásból. Ennek a fázisnak 80 °C és 150 °C között lehet a vége. [5]

Következik a hűntartás (soak), aminek során a hordozó felületén egyenletes hőmérséklet alakul ki, ami elkerülhetetlen, mert az előmelegítés során lehetnek olyan alkatrészek, amik gyorsabban fölmelegedtek. [5]

Az újraömlésztés fázis közben a lemez hőmérséklete a forrasztás olvadáspontja fölé emelkedik, így a paszta megömlik létrehozva a forrasztott kötést. A cél az, hogy a lehető legrövidebb idő alatt sikerüljön megbízható kötést kialakítani, ami általában 30 másodperc alatt valósul meg, a folyamat csúcshőmérséklete ólommentes forrasznál 240°C körül van. [5]

Ha az összes kötés elkészült és a hordozó kijött a fűtő zónákból, akkor automatikusan hűlni kezd, és a kötések megszilárdulnak. Ezt a folyamatot meg lehet gyorsítani befűvással, vagy az utóbbi időben egyre inkább elterjedő nitrogénhűtő rendszerekkel. [5]



3. ábra. Újraömlésztéses forrasztás hőprofilja és annak szakaszai [8]

3. A Pin-in-Paste technológia

Napjainkban csak néhány elektromos alkatrész található meg kizárólag furatszerelt formában (ezek többnyire csatlakozók és tápegységek), a legtöbb felületszerelt alkatrész (SMD). Amióta gyors és pontos gyártósorok érhetőek el felületszerelt alkatrészek beültetéséhez, azóta egyre szükségesebb, hogy legyen egy olyan folyamat, amivel a két alkatrész típust egyszerre lehet forrasztani. Az eljárást, ami megoldást jelent a problémára Pin-in-Paste (PiP) technológiának nevezzük. [9]

3.1. A technológia leírása

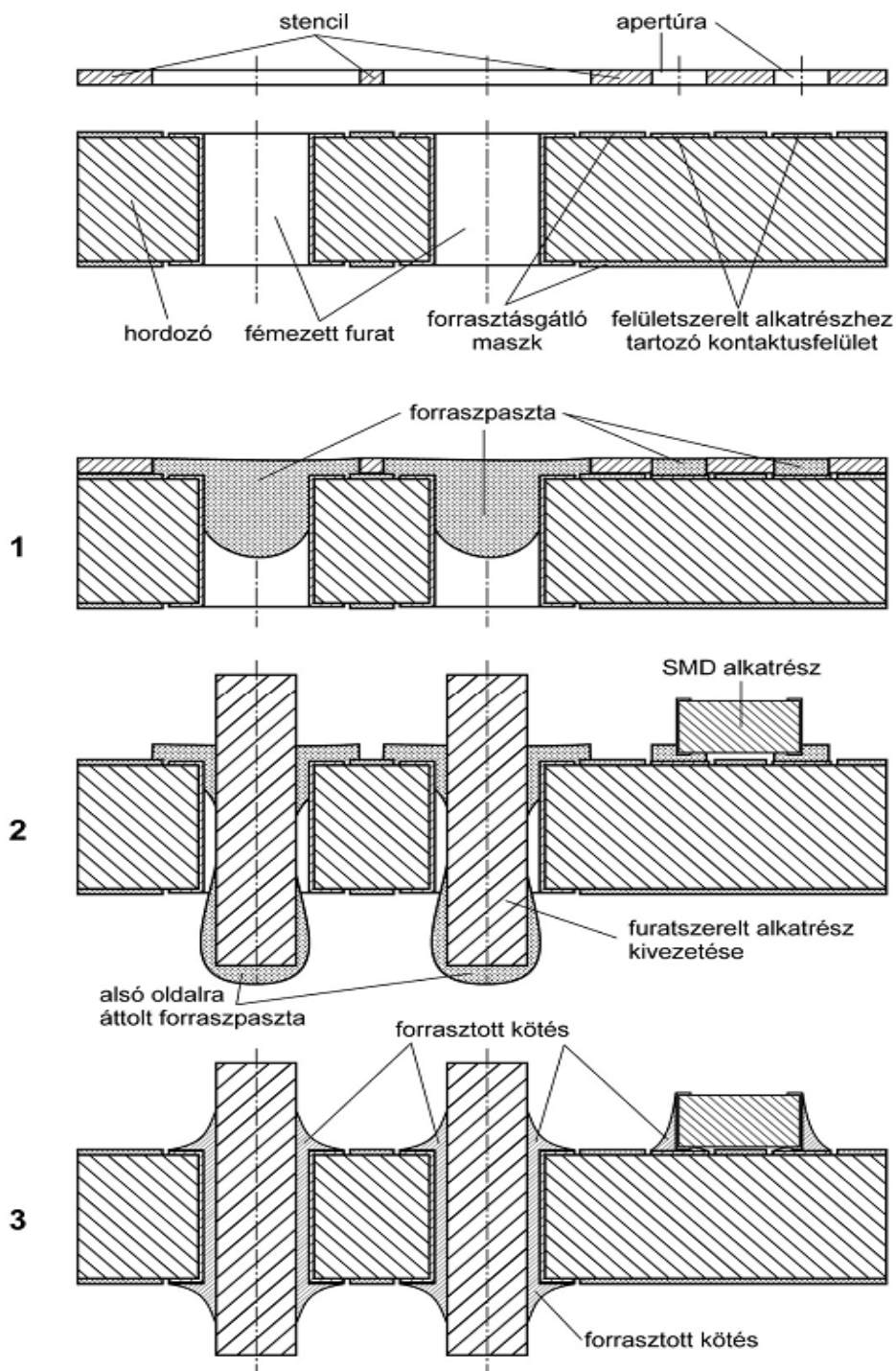
A PiP technológia lényege, hogy a felület és furatszerelt alkatrészek egyszerre, újraömllesztéses forrasztással kerülnek beszerelésre. Ennek következtében a folyamat lépései megegyeznek a felületszerelésnél használt újraömllesztéses forrasztás lépéseivel (4. ábra). Az első lépés a forraszpaszta fölvitel, ami történhet stencilnyomtatással, vagy diszpenzálassal. A második lépés az alkatrészek beültetése, ahol a furatszerelt alkatrészeket fémezett falu furatba ültetik. Végül a paszta újraömllesztése következik a kemencében. [9]

Az újraömllesztéses hőprofil készítésekor meg kell bizonyosodni arról, hogy a paszta hőmérséklete a hordozó mind a két oldalán meghaladja az olvadáspontot, amikor a hőprofil eléri a csúcértékét. Ekkor lesz az alsó oldali forrasztási felületek nedvesítése is megfelelő. [9]

A PiP technológia során használt eszközök meg kell, hogy feleljenek az alábbi követelményeknek:

- Az alkatrészeket olyan módon kell tokozni, hogy azokat a beültető gépek képesek legyenek kezelni.
- Az alkatrészeknek ki kell bírniuk az újraömllesztés csúcértékét 45 másodpercig, ami ≤ 250 °C ólommentes forrasztásnál. [9]

A Pin-in-Paste technológia előnyei, hogy kiküszöböli a drága kézi és az energiaigényes hullámforrasztást, kompatibilis a jelenlegi összeszerelési eljárással, hiszen semmilyen új eszközt nem kell beszerezni hozzá. A legalacsonyabb kivitelezési költséggel rendelkezik és lehetőség van még az automatizálás növelésére is. A szelektív vagy hullámforrasztási berendezések elhagyásával a munkavégzés területe is csökkenthető. [9]



4. ábra. A PiP technológia lépései [9]

Természetesen a technológiának megvannak a hátrányai is. A furatszerelt alkatrészek hőmérséklet tűrésének megfelelőnek kell lennie, ezért kulcsfontosságú a hőprofil megtervezése. Az alkatrész-kivezetések hosszát is előre definiálni kell, mert nagy hatással vannak az összeszerelési folyamatra, minél kisebb a forrasztási oldali túllógásuk, annál kevésbé befolyásolják a kötés megbízhatóságát. A stencileken apertúrákat kell nyitni a furatszerelt alkatrészekhez is, ráadásul több pasztát kell fölvenni, mint a felületszerelt alkatrészekhez, ami megnehezíti a stencilnyomtatási folyamatot. Összességében egy

furatszerelt kötés erőssége és megbízhatósága jobb, mint bármilyen felületszerelt kötésé, még akkor is, ha a furatkitöltés nem 100 %. [5]

3.2. Forraszpaszta mennyiségének meghatározása

Az egyik legelső forrasz térfogat meghatározási módszer szerint elég, ha tudjuk az alkatrész kivezetés méreteit, a stencil vastagságát és egy vizsgálati tényezőt (inspection factor). Ekkor a furat átmérőjét a kivezetés átmérője alapján határozhatjuk meg. Kör geometriájú kivezetésnél a furat, a kivezetés átmérőjénél 0,3048 mm-rel (1,2 mil), téglalap keresztmetszetű kivezetés esetén pedig a téglalap átlójánál 0,254 mm-rel (1 mil) legyen nagyobb. [10]

Ezek után a furat térfogatát (HV) egy henger térfogati számításával határozzuk meg: [10]

$$HV = \pi \cdot \left(\frac{H}{2}\right)^2 \cdot T \quad (1)$$

A kör keresztmetszetű kivezetés térfogatát (LV) hasonlóképpen: [10]

$$LV = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot T \quad (2)$$

A téglalap keresztmetszetű (LV) kivezetés térfogatát pedig: [10]

$$LV = L \cdot W \cdot T \quad (3)$$

Ahol: [10]

- H a furat átmérője
- D a kör geometriájú alkatrész átmérője
- L a téglalap geometriájú alkatrész hossza
- W a téglalap geometriájú alkatrész szélessége
- T a hordozó vastagsága

Az (1) és (2) vagy (3) egyenletet használva megkapjuk a szükséges forraszpaszta térfogatot (SV): [10]

$$SV = HV - LV \quad (4)$$

Amennyiben számításba vesszük a paszta újraömlesztés során végbemenő zsugorodását is, amit általában 50%-nak tekintünk, akkor eljutunk a szükséges nyomtatandó paszta térfogathoz (PV): [10]

$$PV = 2 \cdot SV \quad (5)$$

Végül a módszer szerint csak most kell számításba vennünk a meniszkuszt, amit az apertúra méretének (PA) változtatásával állíthatunk be a megfelelő méretűre: [10]

$$PA = F \cdot \frac{PV}{ST} \quad (6)$$

Ahol: [10]

- F a vizsgálati tényező
- ST a stencilfólia vastagsága

A vizsgálati tényező egy konstans, ami az apertúra térfogatát utólag módosítja, annak megfelelően, hogy milyen meniszkuszt szeretnénk kapni. Ez alapján a vizsgálati tényezőt választhatjuk [10]:

- 0,7-nek, ha egyáltalán nem akarunk meniszkuszt
- 0,8-nek, ha csak a felső oldalra szeretnénk meniszkuszt
- 0,9-nek, ha a szerelőlemez mind a két oldalára szeretnénk meniszkuszt
- 1-nek, ha nagy térfogatú meniszkuszt szeretnénk a szerelőlemez mind a két oldalán

Végiggondolva ezt a módszert beláthatjuk, hogy helyenként nagy közelítésekkel, vagy elhanyagolásokkal él, a meniszkusz térfogatának tényleges meghatározására nemhogy nem tesz kísérletet, hanem meg sem említi, ezért szükség van pontosabb eredményt adó módszerre.

Az IPC-7525 szabvány javasolja a meniszkusz térfogat figyelembe vételét, de nem ad rá összefüggést. A szabvány ide vonatkozó részlete szerint a térfogatot egy egyszerű képlettel tudjuk meghatározni: [11]

$$V = T_s \cdot (L_o \cdot W_o) = \frac{1}{S} \cdot [T_B \cdot (A_H - A_P) + (F_T + F_B) + V_P] - V_H \quad (7)$$

Ahol (5. ábra): [11]

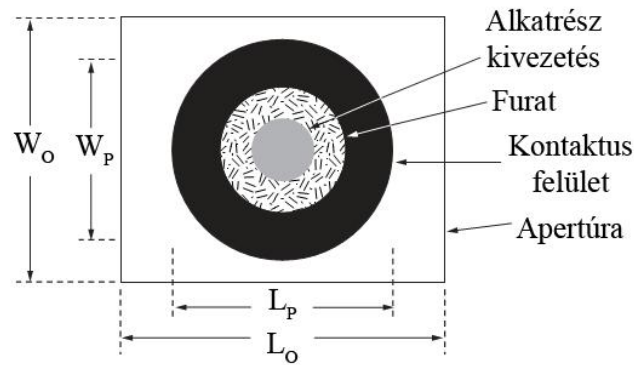
- V a forrasztáshoz szükséges paszta térfogata
- V_P az a paszta térfogat, ami az alsó és a felső forrasztási felületen marad
- S a forraszpasztá zsugorodási tényezője, a shrinkage factor
- A_H a keresztmetszeti területe a furatnak
- A_P a keresztmetszeti területe a furatszerelt alkatrész kivezetésének
- T_B a hordozó vastagsága
- $F_T + F_B$ a teljes furatkitöltéshez szükséges mennyiség
- T_S a stencilfólia vastagsága
- L_O a stencil apertúra hossza
- L_P a forrasztási felület hossza
- W_O a stencil apertúra szélessége
- W_P a forrasztási felület szélessége
- V_H a stencilnyomtatás közben a furatba került paszta térfogata

Az egyenletben a paraméterek nincsenek kifejtve, úgy kezeli a szabvány a különböző változókat, mintha azok ismertek lennének és azokból csak a nyomtatandó pasztatérfogatot szeretnénk meghatározni.

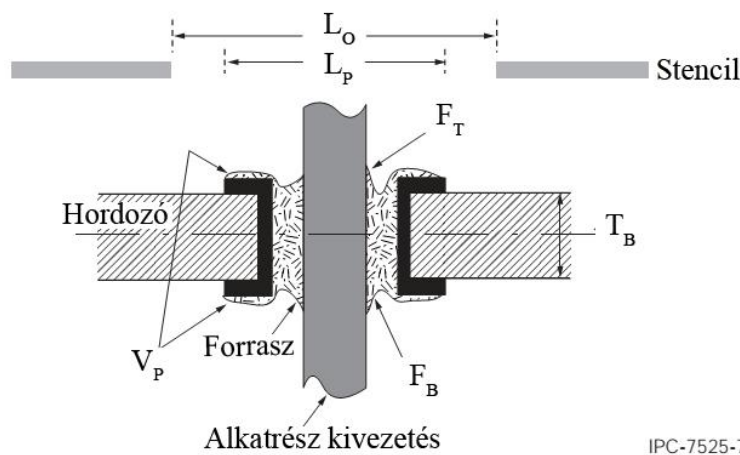
A szabvány megjegyzi, hogy célszerű a lehető legkisebb réz kontaktusgyűrűket használni az egyes furatokhoz, továbbá, hogy az alkatrész kivezetés és a furat átmérőjének a különbsége és a kivezetés hossza is minél kisebb legyen. Ezt figyelembe véve kevesebb térfogatú forraszpasztára lesz szükségünk a forrasztáshoz. [11]

A forraszpasztá furatkitöltése a nyomtatási beállításoktól függően 0 és 100 % között változhat. Zárt nyomtatófej alkalmazásánál érhetünk el 100%-hoz közeli furatkitöltést, míg ha fém kést használunk, úgy, hogy a kés és a stencilfólia által bezárt szög és a nyomtatási sebesség nagy, akkor tudunk kisebb furatkitöltést elérni. [11]

Felülnézet



Keresztmetszeti nézet



IPC-7525-7

5. ábra. A szükséges forraszpaszta mennyiségének meghatározása [11]

Ezen a tudományterületen széleskörűen elterjedt, [12,13,14] a forraszpaszta térfogatának meghatározására szolgáló eljárás szerint ahhoz, hogy meghatározzuk a paszta térfogatának mennyiségét, egy ideális, tömör, fém forrasztott kötést kell vizsgálnunk. Az ideális kötés jellemzői, hogy a furatkitöltése 100 % és a szerelőlemez mind a két oldalán homorú meniszkusz alakul ki. [15]

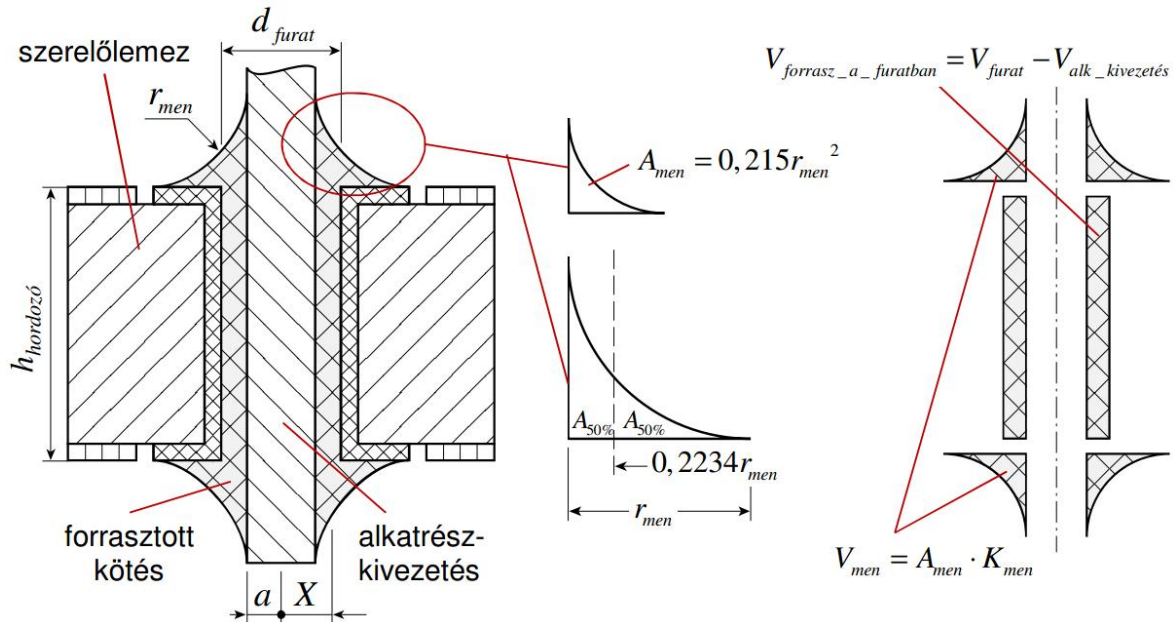
Mivel meniszkusz a hordozó mindkét oldalán van, így kétszer kell számolnunk. A furatba nem csak a paszta kerül, hanem a furatszerelt alkatrész kivezetése is, ezért a furat térfogatából azt le kell vonnunk. Ha fémezett falú furattal dolgozunk, akkor a szerelőlemez tervezésekor számolnunk kell azzal is, hogy a fémezés következtében a furat átmérője ~100 µm-rel csökken. Az eddig meghatározott térfogat: [6,14]

$$V_{paszta} = V_{forrasz_a_furatban} + 2 \cdot V_{men} \quad (8)$$

Figyelembe kell vennünk a pasztamennyiség meghatározása során, hogy a paszta térfogata forrasztás közben a zsugorodik, ezért bevezetünk egy zsugorodási együtthatót (shrinkage factor – S), amit általában 0,5-nek veszünk, föltételezve, hogy a zsugorodás 50%.

Az egyenlet így módosul: [7,14]

$$V_{paszta} = \frac{1}{S} (V_{forrasz_a_furatban} + 2 \cdot V_{men}) \quad (9)$$



6. ábra. A forrasztott kötés térfogatának meghatározása [7]

A meniszkusz térfogatának kiszámításához fölteszük, hogy egyenlő távolság van a forrasz függőleges és vízszintes nedvesítése (r_{men}) között. A meniszkusz keresztmetszetének felületét úgy határozzuk meg, hogy egy r_{men} sugarú, negyed körív területét (A_k) kivonunk egy r_{men} oldalú négyzet területéből (A_n):

$$A_n = r_{men}^2 \quad (10)$$

$$A_k = \frac{r_{men}^2 \cdot \pi}{4} \quad (11)$$

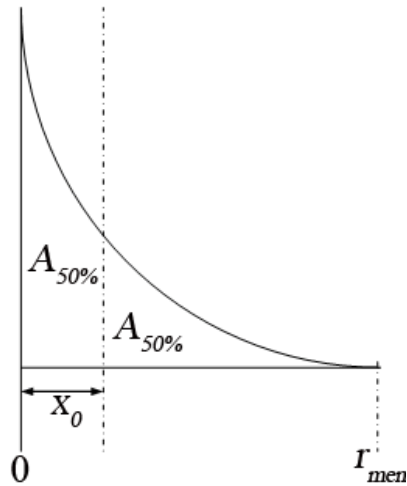
$$A_{men} = A_n - A_k = r_{men}^2 - \frac{r_{men}^2 \cdot \pi}{4} = \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \cdot r_{men}^2 = 0,2146 \cdot r_{men}^2 \approx 0,215 \cdot r_{men}^2 \quad (12)$$

Amennyiben a meniszkuszt forgástestként kezeljük, annak kerülete:

$$K_{men} = 2 \cdot \pi \cdot X \quad (13)$$

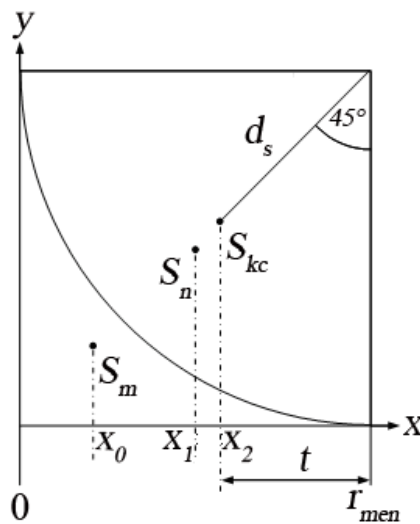
Ahol X az alkatrész kivezetés középpontjának és a forrasz meniszkusz súlyvonalának távolsága. Ennek meghatározására szükségünk van a kivezetés sugarára (a) és a kivezetés pereme és a meniszkusz súlyvonalának távolságára (x_0) [16]:

$$X = x_0 + a \quad (14)$$



7. ábra. A meniszkusz gravitációs középpontjának távolsága az alkatrész kivezetéstől [16]

Az x_0 -t legegyszerűbben az r_{men} oldalú négyzet, és az r_{men} sugarú 90° -os körcikk gravitációs középpontja segítségével számolhatjuk ki. Ehhez a síkidomokat derékszögű Descartes-koordinátarendszerbe kell elhelyezni a 8. ábrán látható módon. [16]



8. ábra. A meniszkusz súlypontjának számításához szükséges mennyiségek [16]

A számítás szempontjából csak az x-koordináták lényegesek. A 8. ábra jelölései [16]:

- S_{kc} : a körcikk gravitációs középpontja, x-koordinátája: x_2
- S_n : a négyzet gravitációs középpontja, x-koordinátája: x_1
- S_m : a meniszkusz gravitációs középpontja, x-koordinátája: x_0
- d_s : a körcikk gravitációs középpontjának távolsága a kör középpontjától
- t : S_{kc} x-koordinátájának számításához szükséges segédmennyiség

Az x_0 kiszámításához szükséges összefüggés [17]:

$$x_0 = \frac{A_n \cdot x_1 - A_k \cdot x_2}{A_n - A_k} \quad (15)$$

A négyzet gravitációs középpontjának x-koordinátája az oldalhosszúság fele, azaz: [16]

$$x_1 = \frac{r_{men}}{2} \quad (16)$$

A körcikk gravitációs középpontjának x-koordinátája kiszámításához szükséges összefüggések: [16]

$$x_2 = r_{men} - t \quad (17)$$

$$t = d_s \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (18)$$

Egy negyed körcikk súlypontja és az origó távolsága [18]:

$$d_s = \sqrt{2} \cdot \frac{4}{3 \cdot \pi} \cdot r_{men} \quad (19)$$

Mivel negyed körcikkről beszélünk ezért $\alpha = 90^\circ$ (radiánban $\pi/2$), ezt behelyettesítve: [16]

$$d_s = 0,6002 \cdot r_{men} \quad (20)$$

A (20) kifejezés értékét behelyettesítve a (18) összefüggésbe, és annak eredményét behelyettesítve a (17) összefüggésbe megkapjuk x_2 értékét. [16]

$$x_2 = 0,5756 \cdot r_{men} \quad (21)$$

A (10),(11),(16),(21) kifejezéseket behelyettesítve a (15) kifejezésbe megkapjuk x_0 értékét: [16]

$$x_0 = 0,2234 \cdot r_{men} \quad (22)$$

A (22) egyenletet a (14) egyenletbe helyettesítve adódik: [14]

$$X = 0,2234 \cdot r_{men} + a \quad (23)$$

Már ismerjük a meniszkusznak a területét és a kerületét is, így a forrasz meniszkusz térfogatát e kettő szorzatával kaphatjuk meg: [14]

$$V_{men} = A_{men} \cdot K_{men} = 0,215 \cdot r_{men}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot (0,2234 \cdot r_{men} + a) \quad (24)$$

A furatba kerülő paszta térfogatát lényegesen egyszerűbb kiszámolni. Ebben az esetben egy cső térfogatát határozzuk meg, ahol a cső hossza ($h_{hordozó}$) a hordozó vastagságának felel meg: [14]

$$V_{forrasz_a_furatban} = V_{furat} - V_{alk_kivezetés} = h_{hordozó} \cdot (\pi \cdot r_{furat}^2 - \pi \cdot a^2) \quad (25)$$

Végül a (9) képletbe behelyettesítve a (24), (25)-t megkapjuk a forrasztáshoz szükséges paszta mennyiséget: [2,7,14,19]

$$V_{paszta} = \frac{1}{0,5} \cdot \left((\pi \cdot r_{furat}^2 - \pi \cdot a^2) \cdot h_{hordozó} + 2 \cdot 0.215 \cdot r_{men}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot (0,2234 \cdot r_{men} + a) \right) \quad (26)$$

4. Önálló munka

Az önálló munkám során új módszert dolgoztam ki a Pin-in-Paste technológiához szükséges forraszpaszta mennyiségének meghatározására és ennek az eredményeit összehasonlítottam az irodalmi képlet használatával kapott eredményekkel. Először meghatároztam a vizsgálni kívánt furatok méreteit, majd kiszámoltam a hozzájuk tartozó forraszpaszta térfogatot az explicit képlettel. Ezután elkészítettem a geometriai modelljét mind kör, mind pedig négyzet keresztmetszetű alkatrész kivezetés esetére, a Surface Evolver nevű programmal. Írtam egy kódot, ami addig közelíti a modell térfogatát, amíg az ideális forrasztott kötés profilját előállítja.

A forraszprofil alakját a gravitációs energia és a megolvadt forrasz felületi feszültségéből származó energia határozza meg. Ha a paszta térfogata túl kevés, akkor a forrasz nem nedvesít végig a forrasztási felületen, de az érintkezési szög (φ) megegyezik az ideális nedvesítési szöggel (θ), amit a Young egyenlet definiál (27). Ebben az esetben a kötés mechanikai szilárdsága kisebb lesz. [8]

$$\varphi = \theta = \arccos\left(\frac{\gamma_{SG} - \gamma_{LS}}{\gamma_{LG}}\right) \quad (27)$$

Ahol γ_{SG} , γ_{LS} , γ_{LG} felületi feszültség együtthatói a szilárd-légnemű (SG), folyékony-szilárd (LS) és a folyékony-légnemű (LG) határoknak megfelelően.

Ha a paszta mennyisége túl sok, akkor a forrasz végignedvesít ugyan a forrasztási felületen, de az érintkezési szög nagyobb, mint az ideális nedvesítési szög. Ennek következményeként akkor tekintjük optimálisnak a forrasz profilját, ha az éppen eléri a kontaktusgyűrű külső peremét és a nedvesítési szög megegyezik az érintkezési szöggel. Ekkor a forrasz térfogata ideális.

Az így kapott térfogatokat összehasonlítottam az explicit képlettel meghatározottakkal és megállapítottam egy korrekciós tényezőt. A modell ellenőrzéséhez szerelőlemezt terveztem és előformázott forraszok segítségével meghatározott térfogatú meniszkuszokat hoztam létre, amit keresztcsiszolás után összehasonlítottam a modell által kapott meniszkusz alakjával.

4.1. A forrasztott kötések modelljei

A kötések geometriáit a Surface Evolver nevű folyadékprofil-modellező program segítségével készítettem el. Ez a program egy előre megírt adatfile-ban lévő alakzat geometriáját jeleníti meg háromszög alakú elemi felületekből, úgynevezett fazettákból (facet) összeállítva, majd a különböző energiák (felületi feszültség, gravitációs energia) hatására a felszínt csökkenti az energia minimalizálás érdekében, gradiens csökkentő módszerrel (gradient descent method), míg a számunkra megfelelő görbületet meg nem kapjuk.

A modellezés során az adatfile-ban elsőként a fizikai jellemzőket adtam meg: a forrasztóanyag sűrűségét, és a felületi feszültséget. Mivel az elméleti összefüggés sem veszi figyelembe a gravitációs erő hatását, így azt a modellben 1-nek vettem, ami az Evolver alapbeállításának felel meg. Ezután a geometriai paraméterek következnek. Az elnevezés mind a két geometria esetén azonos. A lényeges paraméterek:

2. táblázat. A forrasztóanyagra vonatkozó paraméterek

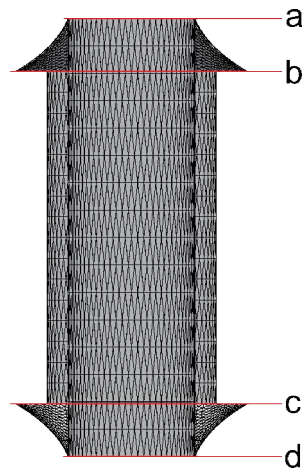
Sűrűség (<i>dens</i>) [kg/m ³]	Felületi feszültség (<i>tens</i>) [mJ/m ²]
7360	550

3. táblázat. A geometriára vonatkozó paraméterek

NYHL vastagság (<i>pcb_height</i>) [mm]	Kivezetés (<i>radius_pin</i>) [mm]		A fémezett falú furat sugara (<i>radius_hole</i>)	A meniszkusz sugara (<i>height_top</i>)	A kontaktusgyűrű külső sugara (<i>radius_ring</i>)
1,57	kör sugara	négyzet oldalának fele	változó (0,4-0,675)	változó (0,2-0,6)	változó (0,5-0,96)
	0,3	0,32			

Ezeket a paramétereket olyanak választottam, amik megfelelnek az ideális kötésre vonatkozó, explicit képlettel való térfogat meghatározása közben használt értékekkel. Az I. Függelékben található a geometriára vonatkozó teljes paraméterter a változók értékeivel.

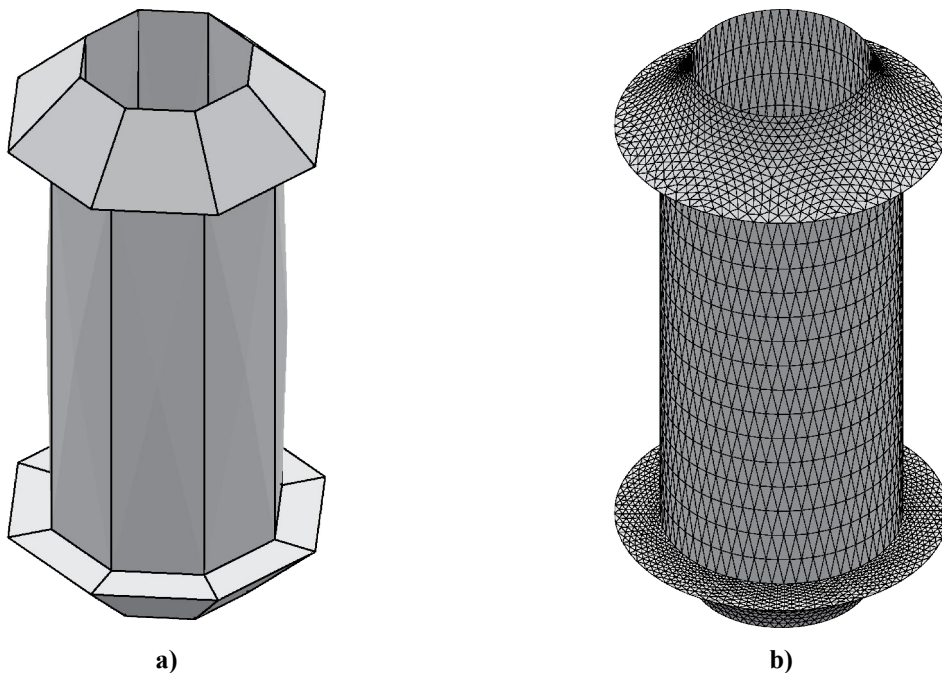
A modellnek négy kitüntetett síkja van (9. ábra), ezeket kényszerek alkalmazásával rögzítettem. Két sík a kontaktus gyűrű síkja a felső (b) és az alsó (c) oldalon és két sík (a és d) a nedvesítési magasság síkja. Ezeken a síkokon lévő pontok fixek, így a profilszámítás közben sem lépnek ki a síkból.



9. ábra. A modell síkjai

A kör keresztmetszetű kivezetéshez a modellt úgy készítettem el, hogy az adatfile-ban a kör alakú részeket nyolcszöggel helyettesítettem és az élekre olyan kényszert alkalmaztam, ami a profilszámítás során körré alakítja a nyolcszöveget (10. ábra.).

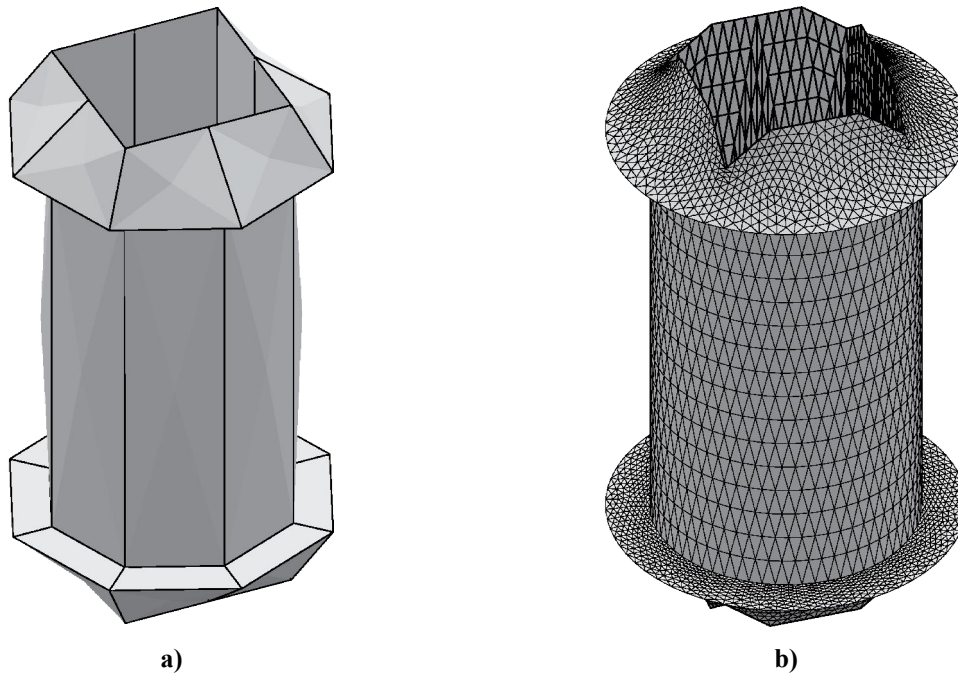
Első esetben a furat sugara volt az egyetlen változó paraméter, aminek módosítása hatással volt a többi paraméter értékére is. A második esetben a kontaktusgyűrű szélességét változtattam, ami csak a meniszkusz sugár hosszára volt hatással.



10. ábra. Modell kör keresztmetszetű alkatrészhez: a) profilszámítás előtt b) profilszámítás után

A négyzet keresztmetszetű alkatrész kivezetés modellezésekor figyelembe kellett venni, hogy a forraszprofil belső alakja egy hasáb, aminek élénél nem nedvesít azonos magasságig a forrasz. Az oldaléleken a nedvesítési magasság felénél rögzítettem a hozzá tartozó pontot. Itt a profil belső része a profilszámítás után is négyzet keresztmetszetű marad.

A paraméterek meghatározása ugyanúgy történt, mint a kör keresztmetszetű kivezetés esetén, azzal a különbséggel, hogy az explicit képletben ekvivalens kör keresztmetszetű kivezetéssel dolgoztam, ezért az ehhez tartozó furatsugarat állítottam be a modellben is. Fölmerülő probléma lehet, hogy az ekvivalens kivezetés olyan furatba is belefér, amibe a valódi alkatrész kivezetése nem, ezt ellenőriztem és az általam használt legkisebb relatív nagyság esetében sem fordult elő.



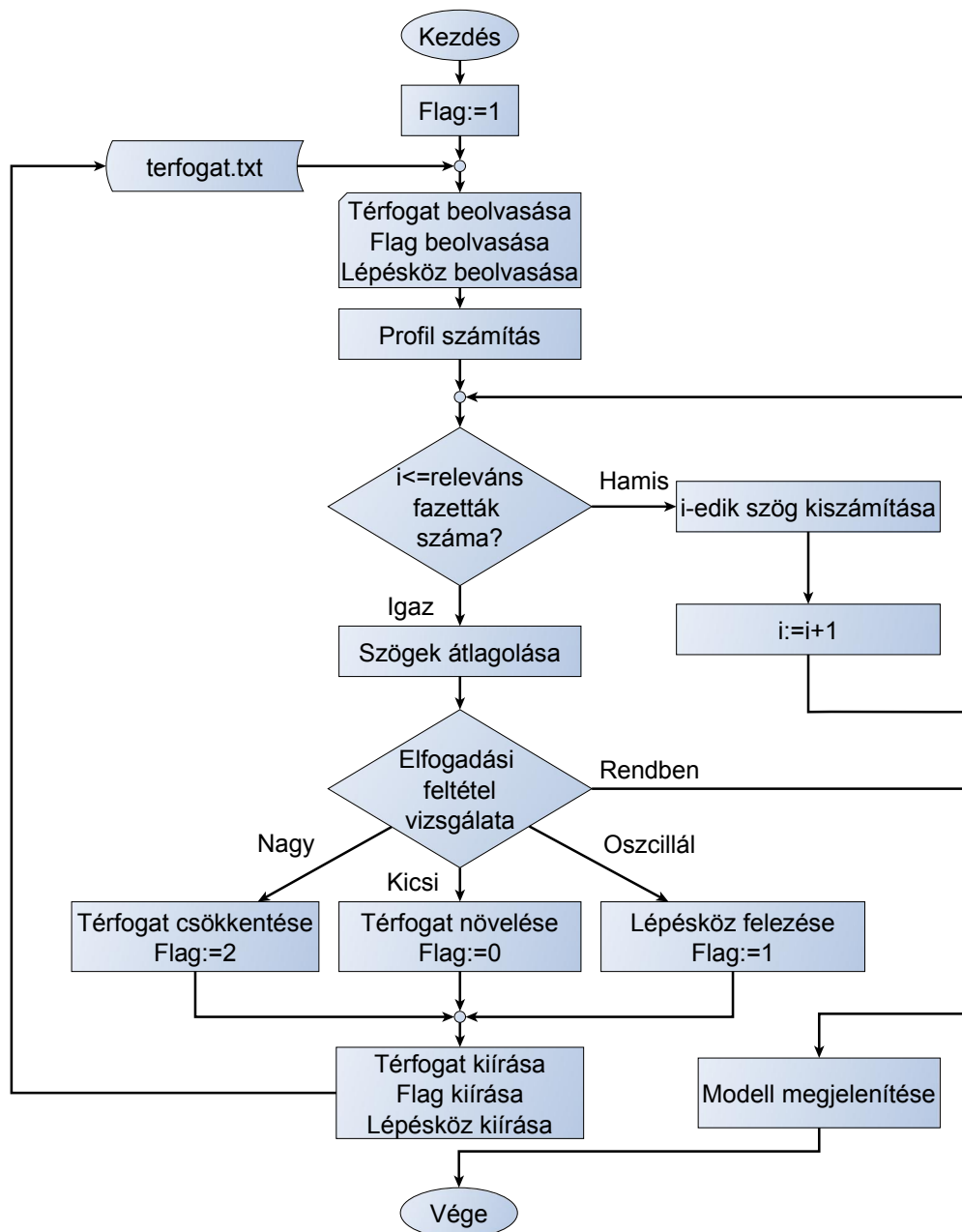
11. ábra. Modell négyzet keresztmetszetű alkatrészhez: a) profilszámítás előtt b) profilszámítás után

4.2. Térfogatszámítás a modell segítségével

A legnagyobb kihívás a térfogatszámításkor, a modell esetében is, a meniszkusz alakjának meghatározása. Az ideális forrasztott kötés nedvesítési szöge SnAgCu ötvözeteknél 22° , ezt közelíti a modell folyamatos térfogat állítással. A modellezés során jobbsodrású Descartes-koordináta rendszert használtam, úgy, hogy az x-tengely a papír síkjából kifelé, az y-tengely jobbra, a z-tengely pedig fölfelé mutat.

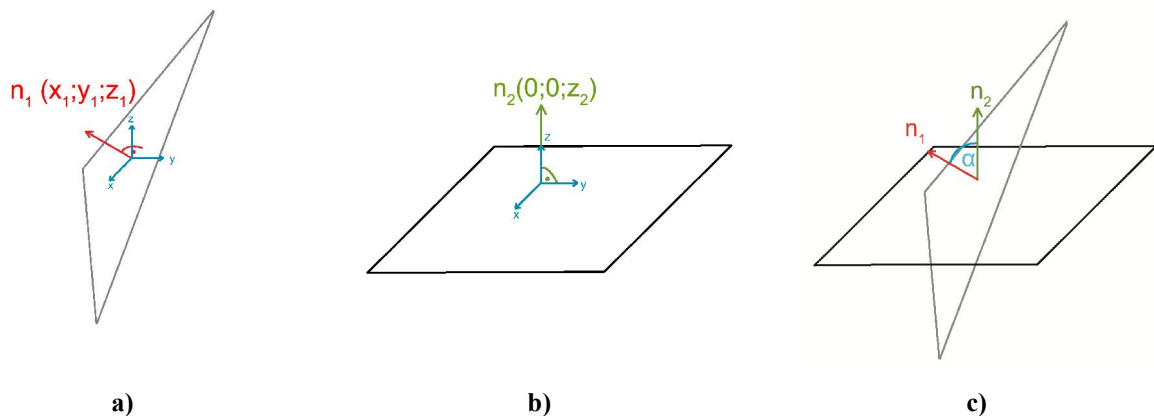
4. táblázat. A térfogatszámító scripthez használt paraméterek

Az elfogadási tartomány alsó határa (<i>interval_low</i>) [°]	Az elfogadási tartomány felső határa (<i>interval_high</i>) [°]	A térfogat módosítására szolgáló lépésköz (<i>interval_mod</i>) [mm ³]	Fazetta azonosítója (<i>fac_num</i>)	Az elfogadási intervallum közelítésének iránya (<i>flag</i>)
21,98	22,02	0,0001	változó	változó



12. ábra. Az ideális térfogat meghatározásának folyamatábrája

Egy külső file-ban lévő térfogatot beolvasva megvizsgálom a profilszámítás után, hogy a kontaktusgyűrű külső élével szomszédos fazetták milyen szöget zárnak be a kontaktusgyűrű síkjával. Ezt a szöget úgy határozom meg, hogy egy releváns fazetta normálvektora (13/a. ábra) és az x-y sík normálvektora (13/b. ábra) által bezárt szöget vizsgálom (13/c. ábra). A releváns fazetta normálvektorának koordinátái megtudhatóak az Evolverből. Az x-y sík normálvektorának csak z irányú koordinátája van, amit úgy választok meg (a későbbi egyszerűsítés érdekében), hogy egyenlő legyen a releváns fazetta normálvektorának hosszával. A releváns háromszög alakú felületelemek egy síkot feszítenek ki, ezt kihasználva az érintkezési szöget két sík által bezárt szögnek tekinthetem.



13. ábra. Az érintkezési szög kiszámításának magyarázata: a) releváns fazetta, b) x-y sík, c) a két normálvektor által bezárt szög

Összefüggés két sík által bezárt szögre:

$$\cos \alpha = \frac{\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2}{|\vec{n}_1| \cdot |\vec{n}_2|} \quad (28)$$

A képlet számlálója két vektor skalári szorzatát tartalmazza, ami a vektorok azonos koordinátáinak szorzatösszegét jelenti. Ebben az esetben csak a két z-koordináta szorzata van a számlálóban, hiszen az x-y sík normálvektorának a többi koordinátája nulla. A nevezőben a két normálvektor hossza szerepel, amit egyenlőnek választottam, mivel a sík normálvektorának hossza nem befolyásolja a bezárt szöget. Ugyanakkor az x-y sík normálvektorának z_2 koordinátája is megegyezik a normálvektorok hosszával. A leegyszerűsödött egyenlet a bezárt szögre rendezve:

$$\alpha = \arccos \frac{z_1}{|\vec{n}_1|} \quad (29)$$

A működést leíró script:

```
calc_angle := {
  angl := acos(facet[fac_num].z) / (sqrt(facet[fac_num].x^2 + facet[fac_num].y^2 +
  facet[fac_num].z^2)) * 180 / pi;
}
```

Ezt a műveletet minden háromszög alakú elemi felületre, aminek közös éle van a kontaktusgyűrűvel, elvégzem. Az Evolverben színek használatával lehet hatékonyan szelektálni az egyes felületelemek között, ezért a meniszkusz teljes felületét kéknek, a kontaktusgyűrű külső élét pedig cián színűnek állítottam be a modell készítése közben. A profilszámítás után elsőként megszámlolom, hogy hány fazetta van, ami a kontaktusgyűrű

külső élével szomszédos. Ezek egyik éle cián színű, így ez alapján határozom meg a releváns fazetták számát. Ezután ugyanezt a feltételt használva egy vektorba gyűjtöm a cián színű élek azonosítóját. Amelyik fazetta kék és rendelkezik az előbb kigyűjtött azonosítójú élek valamelyikével, annak magenta színt állítok be, ezzel kiválasztva a releváns fazettát.

A magenta színű fazetták azonosítóját, színük alapján vektorba gyűjtöm és az összes vektorban tárolt azonosítóval rendelkező releváns elemi felületre elvégzem a érintkezési szögének kiszámítását, és az így kapott szögeket ismét vektorba gyűjtöm. Végül az összes szöget összeadom, majd elosztom a releváns fazetták számával, így megkapom az átlagos érintkezési szöget. A működést leíró script:

```
facet_include := {
  iter := 1;
  summ := 0;
  foreach edge where color == cyan do summ:= summ+1;
  define edg_id integer[summ];
  foreach edge where color == cyan do {
    edg_id[iter] := id;
    iter := iter+1;
  };
  for (iter := 1 ; iter < summ+1 ; iter++) {
    set edge[edg_id[iter]].facets color magenta where color = blue;
  };
  iter := 1;
  define ar_id integer[summ];
  foreach facet where color == magenta do {
    ar_id[iter] := id;
    iter := iter+1;
  };
  define angs real[summ];
  for (iter := 1 ; iter < summ+1 ; iter++) {
    fac_num := ar_id[iter];
    calc_angle;
    angs[iter] := angl;
  };
  summ_angl := 0;
  for (iter := 1 ; iter < summ+1 ; iter++) {
    summ_angl := summ_angl+angs[iter];
  };
  angl_avg := summ_angl/summ;
}
```

Az így kapott átlagszöget megvizsgálom, hogy az elfogadási határon belül van-e. Ha igen akkor megkaptam az ideális forraszprofil térfogatát, amit kiírok, és a profilt megjelenítem a képernyőn grafikusán.

Ha az átlagszög értéke kevesebb, mint az intervallum alsó határa, akkor a térfogatot növelem és kiírom egy file-ba, ahova még szintén beleírom, hogy milyen irányból közelítem az intervallumot és a módosító lépésközt. Ha az intervallum szűk vagy a módosító lépésköz túl nagy, akkor a program oszcillálni kezdene két érték között. Ezt egyetlen változó segítségével kiküszöbölöm. Ha $flag = 1$, akkor alap állapotból indul a program, ha $flag = 0$,

akkor alulról, ha $flag = 2$, akkor pedig fölülről közelítem az intervallumot. Amennyiben egymás után két nem egyező irányból próbálom az elfogadási intervallumot elérni, akkor a script az aktuális térfogatot meghagyja és a módosítási lépésközt csökkenti a felére, majd folytatja a profilszámítást.

A program minden profilszámításkor újratölti az eredetileg megírt adatfile-t, a belső változóit nem tárolja el, ezért van szükség, hogy egy külső file-ba indítás előtt beírjunk egy térfogatot, ahonnan a közelítés kezdődik, egy módosítási lépésközt és a $flag$ változót egyre állítsuk. A profilszámítás után a script fölülírja ezt a file-t és minden számítás előtt ebből olvassa be a szükséges adatokat. Az ideális profil elérése után a külső file tartalmazza az ideális térfogatot, a használt lépésközt és a $flag$ változót egyes értékkel.

```
tester := {
  if(arc_avg<interval_low && (flag==1 || flag==0)) then {
    printf "\n NEM JO! KEVES!\n Atlagszog: %g\n Terfogat:\n",arc_avg;
    v;
    body[1].target := body[1].target + interval_mod;
    printf "body[1].target := %g;\nflag := 0;\ninterval_mod := %g;",
body[1].target,interval_mod >>> "terfogat.txt";
    load "pip_round_1.fe";
  };
  if(arc_avg>interval_high && (flag==1 || flag==2)) then {
    printf "\n NEM JO! SOK!\n Atlagszog: %g\n Terfogat:\n",arc_avg;
    v;
    body[1].target := body[1].target - interval_mod;
    printf "body[1].target := %g;\nflag := 2;\ninterval_mod := %g;",
body[1].target,interval_mod >>> "terfogat.txt";
    load "pip_round_1.fe";
  };
  if(arc_avg<interval_low || arc_avg>interval_high) then {
    printf "body[1].target := %g;\nflag := 1;\ninterval_mod := %g/2;",
body[1].target,interval_mod >>> "terfogat.txt";
    load "pip_round_1.fe";
  }
  else {
    printf "body[1].target := %g;\nflag := 1;\ninterval_mod := %g;",
body[1].target,interval_mod >>> "terfogat.txt";
    printf "\n OKE!!!\n Atlagszog: %g\n Terfogat:\n",arc_avg;
    v;s;
  };
}
```

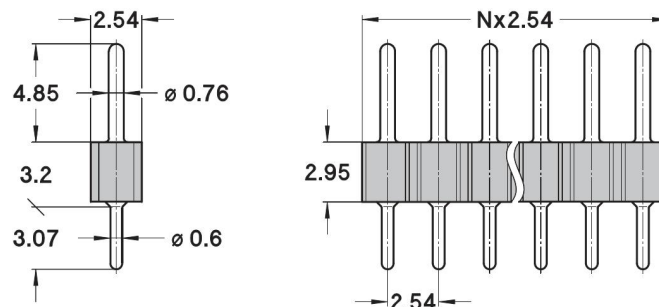
A teljes programkód megtalálható a II. Függelékben.

4.3. A modell ellenőrzése

Az ellenőrzésnél abból indultam ki, hogy a furatba került forrasz térfogatával nem kell foglalkoznom, mert azt a furat és az alkatrész kivezetés átmérőjéből pontosan meg lehet határozni, ezen kívül a modellezett és az explicit képlettel számolt térfogatok közötti eltérés csak a meniszkuszok térfogatának különbségéből adódik. Ezért az ellenőrzést úgy végeztem, hogy ismert térfogatú forrasz meniszkuszokat állítottam elő. A meniszkuszokról keresztmetszeti csiszolatot készítettem, majd ezeken megmértem a profilok paramétereit. A mért értékeket beállítottam a modell megfelelő paramétereinek és elvégeztem a profilszámítást. Ezután a valódi és a modell által kiszámolt profilok peremszögét és alakját összehasonlítottam.

4.3.1. Az ellenőrzésnél használt alkatrész, előformázott forrasz és szerelőlemez

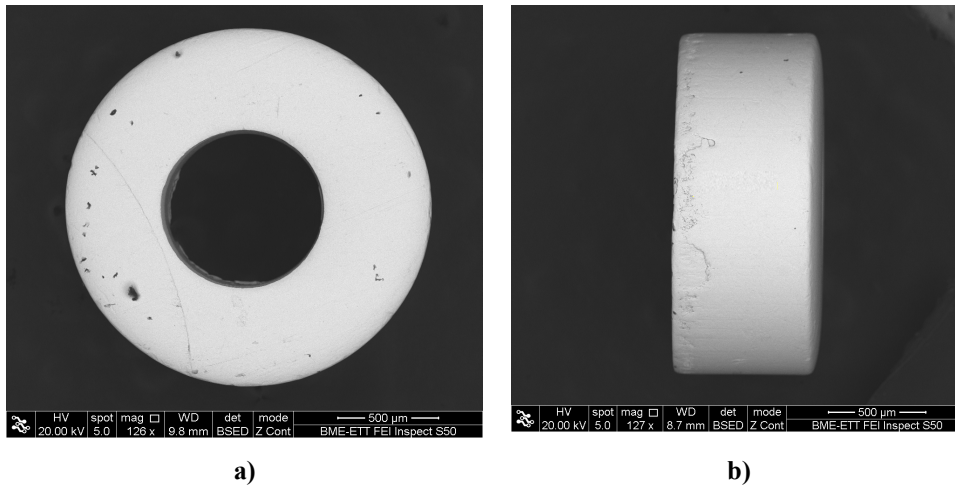
A modell ellenőrzésére egy tűskesor kontaktus részét használtam. A Preci-dip által gyártott tűskesor 2,54 mm-es raszter osztású, kör keresztmetszetű kivezetéssel rendelkezik. Egy tűske átmérője 0,76 mm, felületén 0,25 μm vastag arany réteggel vonták be. Az alkatrész az UL 94V-0 gyúlékonysági osztályba tartozik, ami annyit jelent, hogy egy függőleges mintában 10 s alatt abbamarad az égés. [20]



14. ábra. A kör kivezetésű alkatrész geometriai jellemzői [20]

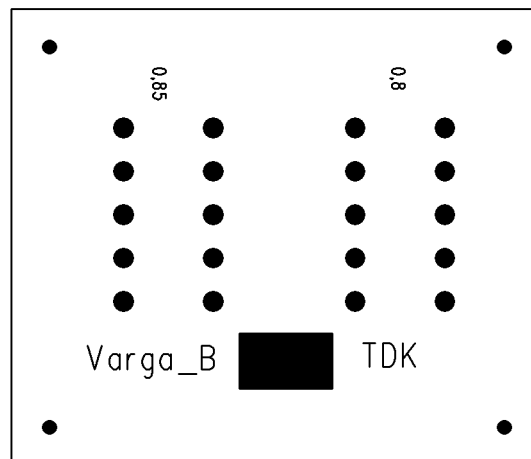
Szükség volt meghatározott térfogatú előformázott forraszra, amit az Alpha kft. bocsátott rendelkezésemre. Az általuk washer-nek elnevezett előformázott forraszfajta egy cső volt, aminek az összetételét elektronmikroszkópos méréssel SAC 305-nek és térfogatát 1,508 mm^3 -nek állapítottam meg.

Az előformázott forrasz összetételének és paramétereinek mérését a FEI Inspect S50 nevű pásztázó elektronmikroszkóppal végeztem. A berendezés nagy nagyítású képalkotásra és mérésre alkalmas, ezen kívül mikrométer méretű térfogatok anyagösszetételét is képes meghatározni energia-diszperziós röntgen spektroszkópiával. Az eszközzel mérhető legkisebb távolság 5 nm körül van, vagyis a most használt előformázott forraszt pontosan lehet mérni.



15. ábra. Az előformázott forrasz visszazórt elektronképe: a) fölülnézet, b) oldalnézet

A szerelőlemez kétoldalas, 1,5 mm vastag, 61,2 mm×71,4 mm területű, FR4 hordozó, immerziós ezüst bevonattal, ami ~50 µm-es csökkenést jelent furatátmérőben. A lemezen két blokk található, amik a bennük lévő furatok fémezés nélküli átmérője alapján lettek elnevezve (0,8 és 0,85 µm), ez fölirat formájában föl van tüntetve. Egy blokkon belül 2×5 darab azonos átmérőjű fémezett falú furat van, ahogy az a 16. ábrán látszik.



16. ábra. A szerelőlemez mintázata

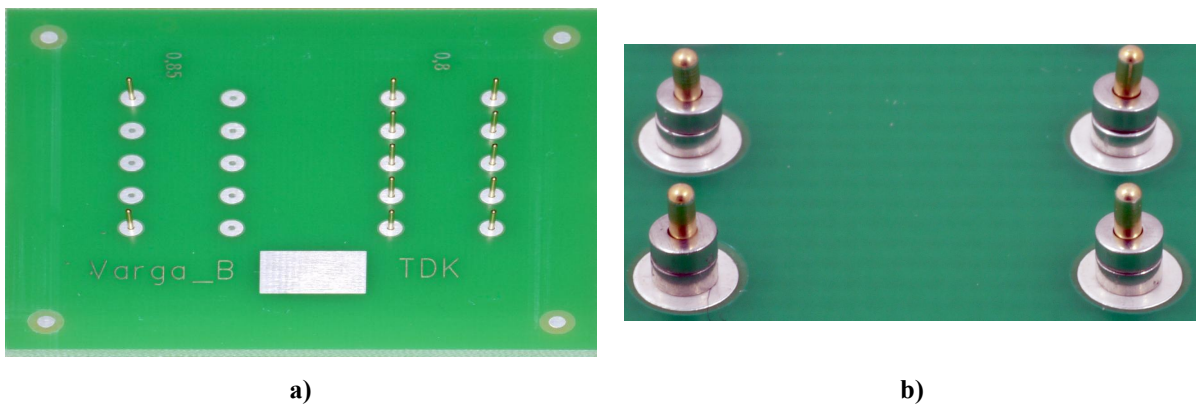
A furatátmérőt úgy határoztam meg, hogy a tűske átmérőjénél ne legyen sokkal nagyobb, azért, hogy tűske beleszoruljon a furatba, ezáltal megakadályozva azt, hogy újraömlés közben a forrasz a furatba kerüljön, ami csökkentené a meniszkusz térfogata. A lemezen használt összes furathoz tartozó réz kontaktusgyűrű külső átmérője 2,8 mm, a forrasztásgátló maszk ablak átmérője pedig 3,05 volt.

A szerelőlemezen még van négy darab, illesztést segítő ábra, amelyek átmérője 2 mm és a hozzájuk tartozó forrasztásgátló maszk ablak, ami ennek a duplája, 4 mm, és egy szabadon hagyott réz téglalap, ami a lemez azonosítására szolgál.

4.3.2. Az ellenőrzés folyamatparamétere

Az ellenőrzés folyamata az alkatrész beültetéssel kezdődött, mert a meniszkusz létrehozásához, csak az előformázott forraszt használtam, így nem volt szükség stencilnyomatásra. A furatot olyan szűkre méreteztem, hogy a tűske szoruljon és az újraömlés során lehető legkevesebb forraszt nedvesítsen a furatba. Azért került két különböző átmérővel rendelkező furat a lemezre, mert a tűskék átmérőjének nagy szórása nem tette egyértelművé, hogy melyik furat lesz a megfelelő (17/a. ábra.).

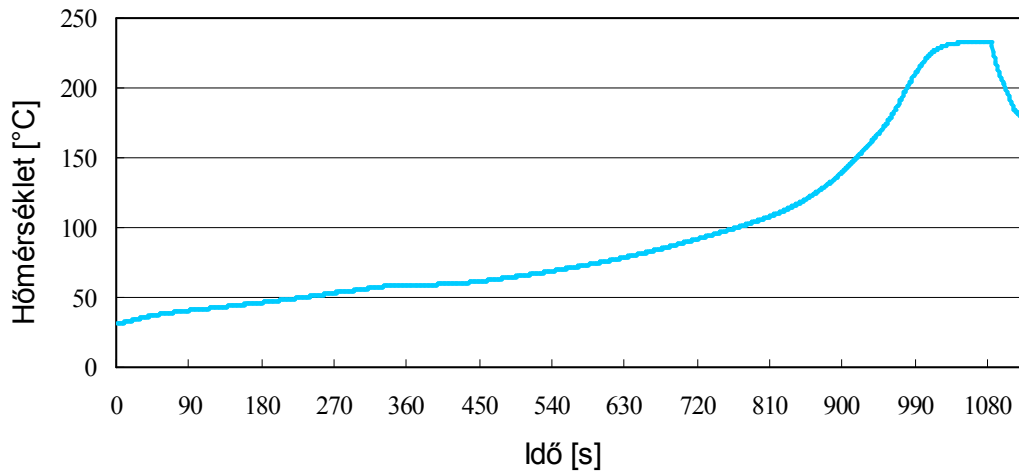
Ezután kézi cseppadagolással folyasztószert vittem föl a forrasztási felületre. Végül minden tűskére két darab előreformázott SAC 305-ös forraszt helyeztem a 17/b. ábrán látható módon.



17. ábra. A forrasztás előkészítése: a) beültetés; b) előformázott forraszt fölville

A forrasztást az Ascon Quicky-450 gőzfázisú forrasztó berendezéssel végeztem el. A berendezést speciális alkalmazásokhoz és laboratóriumi munkákra fejlesztették ki. Különösen alkalmas próbaforrasztásra, forrasztási folyamat minősítésére vagy kísérleti szerelőlemez forrasztására. A munkafolyadék 235 °C forráspontú Galden márkájú. A forrasztás 7-15 perc alatt megy végbe a folyamatparaméterektől függően.

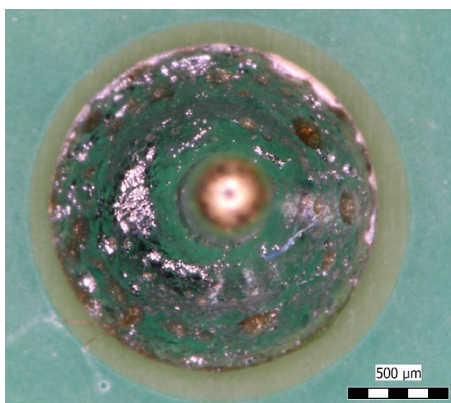
A gőzfázisú forrasztó berendezés fölfűtési meredekségét 60 %-ra, az ASB-t (Automatic Solder Break) 140 °C-ra és a hordozó kiemelésének a késleltetését 0 s-ra állítottam.



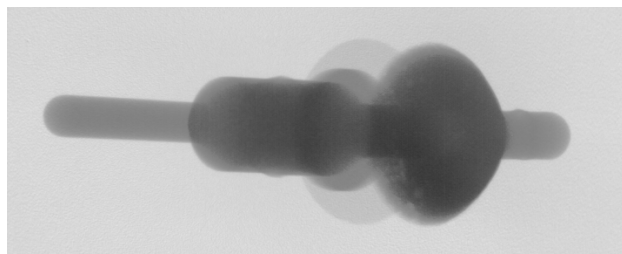
18. ábra. A kísérlethez használt hőprofil

A furatba került forrasz mennyiségének vizsgálatát a Dage XiDat XD6600-as röntgenmikroszkóp segítségével végeztem. A cél, hogy a forrasztás után minél kevesebb forrasz legyen a furatban.

Optikai vizsgálattal meniszkuszok térfogata hasonlóknak tűnt (19/a. ábra.), ami egyik jele annak, hogy nem került sok forrasz a furatba. A röntgenberendezéssel készített fölvételek pedig ezt még jobban alá támasztják (19/b. ábra.). A röntgenfölvételeken az látszik, hogy a tűske vastagsága közel megegyezik a furatban és ott, ahol biztosan nem nedvesíthette forrasz. Az eltérés a furatfémezés miatt adódhat. Megfigyelhető a tűskék felső részének deformálódása, ami annak tudható be, hogy a fémezett falu furatot szándékosan a lehető legszűkebbre méreteztem, így csak nagyobb erő alkalmazásával tudtam a beültetést elvégezni. Az érvényesítéshez és annak megállapításához, hogy került-e ténylegesen valamennyi forrasz a furatba keresztcsiszolatokat is kellett készíteni.



a)

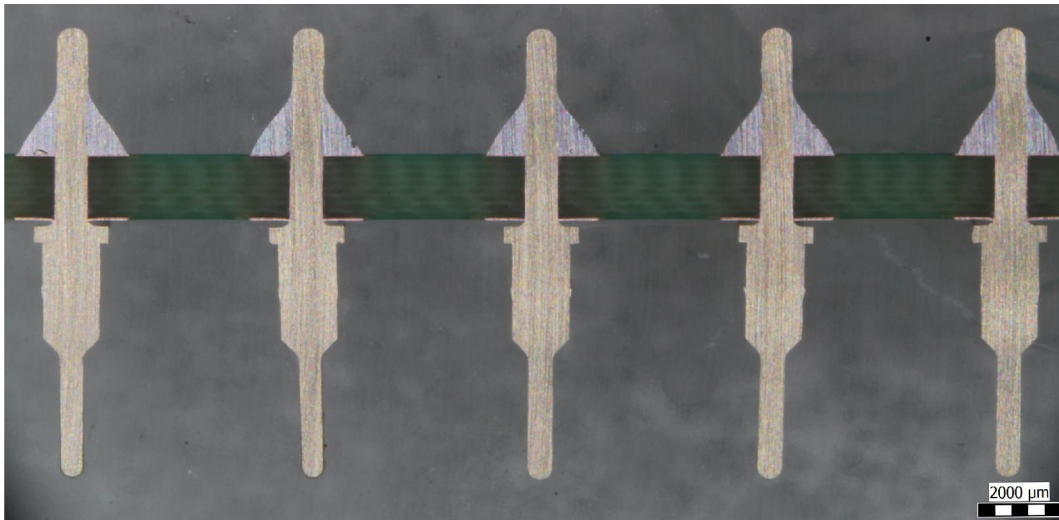


b)

19. ábra. Forrasztás utáni kötés: a) optikai b) röntgen vizsgálattal

A mintákról készült keresztcsiszolatokat 40 mm átmérőjű pogácsákban csináltam. Kiöntőanyagként kétfázisú Technovit 4006-at, 2:1 (por, folyadék) keverési aránnyal használtam.

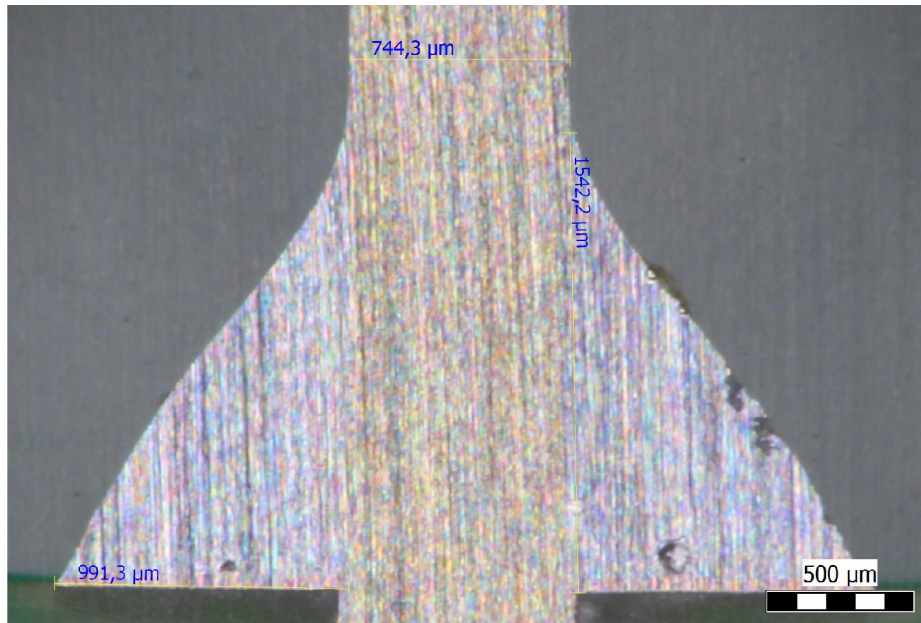
Az elkészült csiszolatokról az Olympus SX9 sztereo-mikroszkóppal készítettem fölvételeket, különböző nagyítás és megvilágítás mellett. Ahogy a 20. ábrán látszik valóban nem került forrasz a furatba.



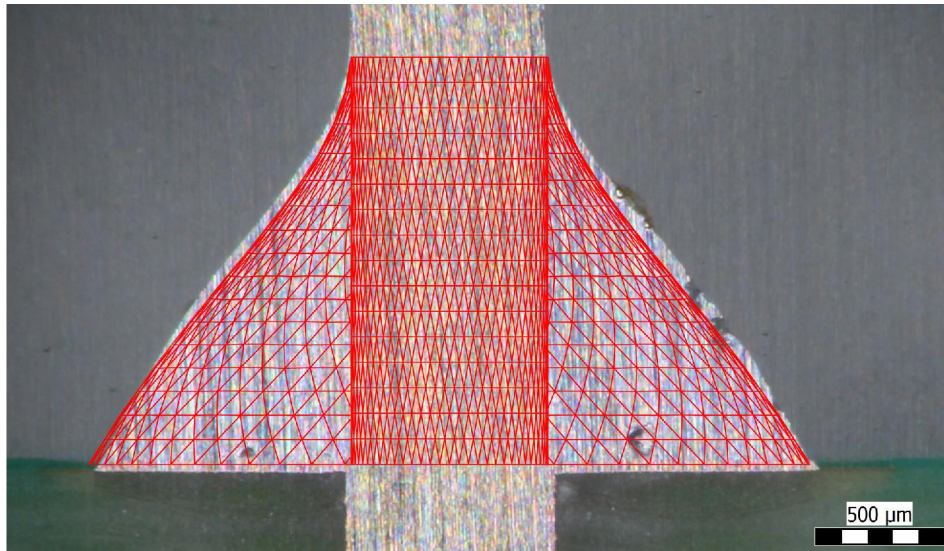
20. ábra. Keresztmetszeti csiszolat

A modell akkor tekinthető érvényesnek, ha a valódi meniszkuszok keresztmetszeti profiljai hasonló képet mutatnak, mint modellezés közben kapott profilok. Ezt úgy vizsgáltam meg, hogy a valós meniszkuszok paramétereit megmértem (21/a. ábra.), úgymint a kontaktusgyűrű szélessége ($991,3 \mu\text{m}$), alkatrész kivezetés átmérője ($744,3 \mu\text{m}$), nedvesítési magasság ($1542,2 \mu\text{m}$), majd ezeket beállítottam a modellben. Ebben az esetben tudom a meniszkusz térfogatát, mert az megegyezik a két előformázott forrasz térfogatával, ami $3,017 \text{ mm}^2$, ezért volt fontos, hogy ne folyjon forrasz a furatba. Az adatfile-t annyiban módosítottam, hogy csak a felső oldali meniszkusszal dolgozzon (21/b. ábra.). Az így kapott két meniszkusz profilt a nedvesítési szögek alapján hasonlítottam össze. A modellnek a szögét kiírtam a scripttel ($59,1^\circ$), a valódi meniszkusz szögét pedig megmértem ($57,3^\circ$).

Mivel a nedvesítési szögekben kicsi az eltérés, ami adódhat abból is, hogy nem sikerült pontosan a meniszkusz közepéig csiszolnom a mintákat, vagy nem nedvesített a forrasz a kontaktusgyűrű pereméig, és a profilok alakja is hasonló, ezért a modellt alkalmasnak találtam az ideális forraszprofil meghatározásához.



a)



b)

21. ábra. A meniszkuszok keresztmetszetének összehasonlítása: a) valódi, b) modellezett meniszkusz

4.4. Eredmények

Az explicit képlet használatakor ugyanannak a két paraméternek a változtatásával határoztam meg a különböző alkatrész kivezetésekhez tartozó a forraszpaszta térfogatokat, mint a modell segítségével. Egyik esetben a furat sugarát növeltem, a másikban változatlan furatátmérő mellett a kontaktusgyűrű szélességét változtattam. A hordozó vastagságát 1,57 mm-nek vettem minden esetben, amibe beleszámoltam az alsó és felső oldali kontaktusgyűrű vastagságát, 35 μm -t.

Kör keresztmetszetű alkatrész kivezetés számításakor a kivezetés sugarát 0,3 mm-nek számoltam, valóságos kivezetés méret alapján. Abban az esetben, amikor a furat sugarát növeltem a kontaktusgyűrű szélessége mindig 0,15 mm volt. Azért, hogy a kör és a négyzet keresztmetszetű kivezetésnél kapott térfogati értékek általánosíthatóak legyenek, bevezettem a relatív nagyságot, ami azt adja meg, hogy mennyivel nagyobb a furat sugara az alkatrész kivezetésének sugaránál. Az explicit képlettel és a modellezés során meghatározott térfogatok, és eltérésük:

5. táblázat. Térfogatok kör keresztmetszetű kivezetéshez, ha a furat sugár változik

Relatív nagyság	Furat sugár [mm]	Képlettel számított térfogat [mm ³]	Modellből meghatározott térfogat [mm ³]	Eltérés [%]
+100 μm	0,40000	0,405	0,4389	7,64
+125 μm	0,42500	0,521	0,5614	7,23
+150 μm	0,45000	0,644	0,6920	6,92
+175 μm	0,47500	0,775	0,8314	6,75
+200 μm	0,50000	0,914	0,9793	6,63
+225 μm	0,52500	1,061	1,1357	6,55
+275 μm	0,57500	1,380	1,4742	6,42
+325 μm	0,62500	1,730	1,8472	6,33
+375 μm	0,67500	2,114	2,2545	6,23

Amikor a kontaktusgyűrű szélességét növeltem, a furat sugara minden esetben 0,4 mm volt, azaz 0,1 mm-rel nagyobb, mint a kivezetés sugara. Fontos megjegyezni, hogy a kontaktusgyűrű szélességének 0,5 mm-re választásakor a modellezett forrasz nem nedvesített az előre beállított magasságig, ezért az ekkor kapott eredmény nem ábrázoltam. Az így kapott térfogatok:

6. táblázat. Térfogatok kör keresztmetszetű kivezetéshez, ha a kontaktusgyűrű szélessége változik

Kontaktusgyűrű szélesség [mm]	Képlettel számított térfogat [mm ³]	Modellből meghatározott térfogat [mm ³]	Eltérés [%]
0,1	0,383	0,40365	5,24
0,15	0,405	0,43890	7,64
0,2	0,435	0,48250	9,95
0,25	0,470	0,53570	12,18
0,3	0,514	0,59810	14,13
0,4	0,623	0,75110	17,01
0,5	0,767	0,94090	18,44

Négyzet keresztmetszetű alkatrész kivezetésekhez tartozó térfogatok kiszámításánál először, az ipari szokásoknak megfelelően, a négyzethez tartozó ekvivalens kör keresztmetszetet határoztam meg, így egy a négyzet keresztmetszetű kivezetéssel megegyező térfogatú, kör keresztmetszetű kivezetéssel számolok. Ennek hátránya, hogy így nem veszem figyelembe a profil deformálódását, ami a kivezetés oldaléleinél lép föl.

Ekvivalens kör keresztmetszet meghatározásánál, abból indultam ki, hogy a négyzet és a kör területe megegyezik és a hordozó vastagsága szintén megegyezik, így elég csak a területekkel számolni. A négyzet oldala a (0,64 mm), a kör sugara r .

$$A_{\text{négyzet}} = A_{\text{kör}} \quad (30)$$

$$a^2 = r^2 \cdot \pi \quad (31)$$

A (31)–et r -re rendezve:

$$r = \frac{a}{\sqrt{\pi}} \quad (32)$$

Így az ekvivalens kör sugarát 0,36 mm-nek határoztam meg. Ezzel a sugárral végigszámoltam az explicit képletet, hasonlóképpen, mint az első esetben, megvizsgáltam még, hogy az így meghatározott furatokba a valódi alkatrész kivezetés belefér-e és azt állapítottam meg, hogy a legkisebb átmérőjű furatba is belefér a kivezetés. A hordozó vastagság és a kontaktusgyűrű szélesség megegyezett a kör keresztmetszetűnél használt értékekkel.

7. táblázat. Térfogatok négyzet keresztmetszetű kivezetéshez, ha a furat sugár változik

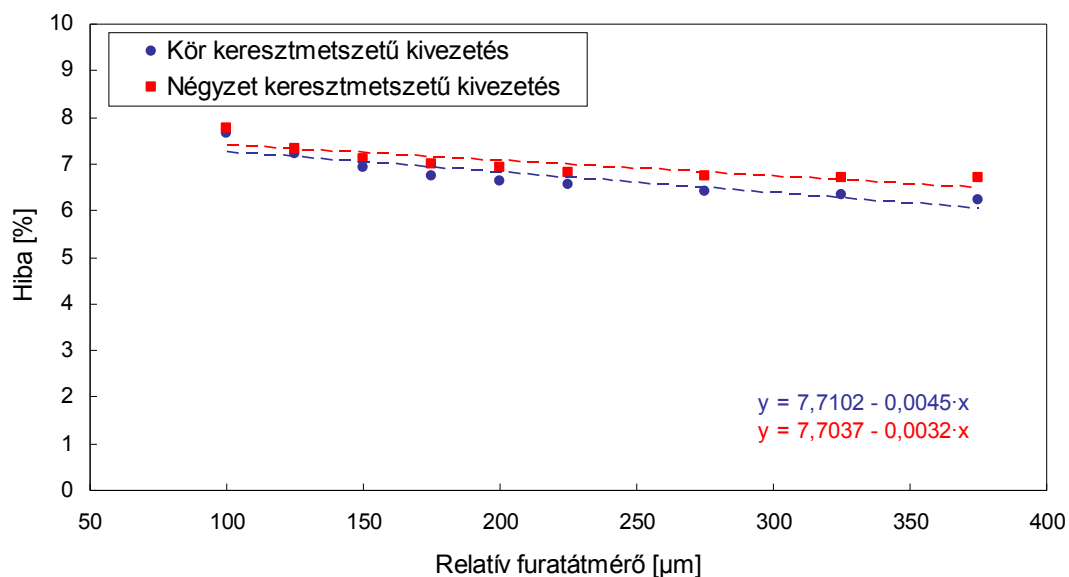
Relatív nagyság	Furat sugár [mm]	Képlettel számított térfogat [mm ³]	Modellből meghatározott térfogat [mm ³]	Eltérés [%]
+100 μm	0,46108	0,4759	0,5159	7,75
+125 μm	0,48608	0,6086	0,6568	7,33
+150 μm	0,51108	0,7494	0,8068	7,12
+175 μm	0,53608	0,8982	0,9656	6,99
+200 μm	0,56108	1,0551	1,1334	6,91
+225 μm	0,58608	1,2201	1,3096	6,83
+275 μm	0,63608	1,5751	1,6889	6,74
+325 μm	0,68608	1,9634	2,1042	6,69
+375 μm	0,73608	2,3856	2,5569	6,70

Amikor a kontaktusgyűrű szélességét növeltem, a furat sugara minden esetben 0,46 mm volt, azaz 0,1 mm-rel nagyobb, mint az ekvivalens kivezetés sugara. Az így kapott térfogatok:

8. táblázat. Térfogatok négyzet keresztmetszetű kivezetéshez, ha a kontaktusgyűrű szélessége változik

Kontaktusgyűrű szélesség [mm]	Képlettel számított térfogat [mm ³]	Modellből meghatározott térfogat [mm ³]	Eltérés [%]
0,1	0,4494	0,00047430	5,26
0,15	0,4759	0,00051590	7,75
0,2	0,5096	0,00056730	10,17
0,25	0,5509	0,00062970	12,51
0,3	0,6002	0,00070180	14,47
0,4	0,7249	0,00088080	17,71
0,5	0,8871	0,00110640	19,82

A különböző geometriájú kivezetésekhez tartozó, a furatátmérők változtatásával kiszámolt hibák a 22. ábrán láthatóak. A pozitív érték azt jelenti, hogy az explicit képlet alulbecsüli a szükséges forraszpaszta térfogatát. A grafikon alapján belátható, hogy a négyzet keresztmetszetű kivezetésnél nagyobb az eltérés mértéke. Ez várható volt, mert az explicit képlet használatakor az ekvivalens kör keresztmetszetre való áttéréskor elhanyagoljuk a profil négyzet keresztmetszetű kivezetés oldaléleinél föllépő egyenetlenségét, viszont a modellezés során ezt figyelembe vettem a minél hitelesebb forraszprofil előállításának érdekében.



22. ábra. A számolt és a modellezett térfogatok eltérése furatsugár változtatásánál

Az így kapott értékekre egyenes illeszthető ($y = y_0 + a \cdot x$), aminek paraméterei kör keresztmetszetű kivezetés esetén: $y_0 = 7,71\%$, $a = -0,0045\%$, így a korrekciós tényező:

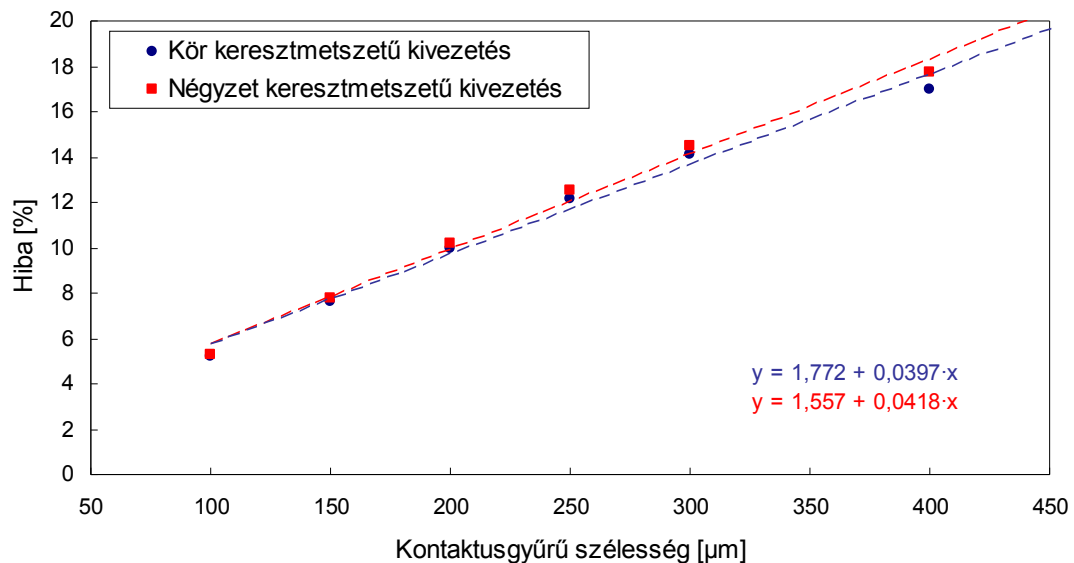
$$C_{KF} = 1 + \frac{7,71 - 0,0045 \cdot RHD}{100} \quad (33)$$

A négyzet keresztmetszetű alkatrész kivezetés esetén az egyenes paraméterei: $y_0 = 7,7\%$, $a = -0,0032\%$, így a korrekciós tényező:

$$C_{NF} = 1 + \frac{7,7 - 0,0032 \cdot RHD}{100} \quad (34)$$

Ahol RHD a relatív furatátmérő.

A különböző geometriájú kivezetésekhez tartozó, a kontaktusgyűrű változtatásával kiszámolt hibák a 23. ábrán láthatóak. Az explicit képlet ekkor is alulbecsüli a szükséges forrasz térfogatát. A kontaktusgyűrű szélességének növelésekor mind a két kivezetés geometriánál monoton növekedést tapasztaltam, ami azt jelenti, hogy minél szélesebb a kontaktusgyűrű, annál nagyobb az explicit képlet hibája. Ami jó közelítéssel lineáris.



23. ábra. A számolt és a modellezett térfogatok eltérése kontaktusgyűrű változtatásánál

Az így kapott értékekre illesztett egyenes paraméterei kör keresztmetszetű kivezetés esetén: $y_0 = 1,77\%$, $a = 0,0397\%$, így a korrekciós tényező:

$$C_{KR} = 1 + \frac{1,772 + 0,0397 \cdot RW}{100} \quad (35)$$

A négyzet keresztmetszetű kivezetés esetén az egyenes paraméterei: $y_0 = 1,56\%$, $a = 0,0418\%$, így a korrekciós tényező:

$$C_{NR} = 1 + \frac{1,557 + 0,0418 \cdot RW}{100} \quad (36)$$

Ahol RW a kontaktusgyűrű szélessége.

4.5. Összefoglalás

A dolgozatban a Surface Evolver nevű folyadékprofil-modellező programmal modellt készítettem a Pin-in-Paste technológiával készült ideális forraszprofil meghatározására. Ellenőriztem a modellt úgy, hogy valóságos forrasz meniszkuszokat állítottam elő és összehasonlítottam a modell által meghatározott meniszkuszokkal.

Kiszámoltam a Pin-in-Paste technológiával készült különböző forrasztott kötések térfogatát kör és négyzet geometriájú alkatrészekhez az irodalmi explicit képlet segítségével, majd összehasonlítottam a modell és az elméleti összefüggés által kapott eredményeket. Így megkaptam az egyes kötésekhez tartozó hibát, amit grafikonon ábrázoltam, az értékekre egyenest illesztettem és ez alapján korrekciós tényezőt határoztam meg. A korrekciós tényezők:

- Kör keresztmetszetű kivezetésnél furatsugár növelések:

$$1 + (7,71 - 0,0045 \cdot RHD) / 100$$

- Négyzet keresztmetszetű kivezetésnél furatsugár növelések:

$$1 + (7,7 - 0,0032 \cdot RHD) / 100$$

- Kör keresztmetszetű kivezetésnél kontaktusgyűrű szélességének növelések:

$$1 + (1,772 + 0,0397 \cdot RW) / 100$$

- Négyzet keresztmetszetű kivezetésnél kontaktusgyűrű szélességének növelések:

$$1 + (1,557 + 0,0418 \cdot RW) / 100$$

Az explicit összefüggést a megfelelő korrekciós tényezővel besorozva megkapjuk a Pin-in-Paste technológiával készült, ideális forrasztott kötés térfogatának legpontosabb értékét.

Irodalomjegyzék:

- [1] dr. Pinkola János „Elektronikai Technológia Laboratórium”,(második kiadás), Budapest, Viking zrt., 2012
- [2] Mulugeta Abteu, Guna Selvaduray, „Lead-free Solders in Microelectronics”, Materials Science and Engineering, Vol. 27., Issue 5-6, 2000, 95–141 o.
- [3] Dr. Prohászka János, „Bevezetés az anyagtudományba I.”, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1997
- [4] Multicore technical datasheet, „96SC and 97SC Alloy”, 2005, february
- [5] Bob Willis „PIHR Technology”, USA, Seaside, BR Publishing, Inc., 2012
- [6] Harsányi Gábor „Elektronikai technológia”,(első kiadás), Budapest, BME Viking zrt., 2012
- [7] dr. Pinkola János „Elektronikai Technológia Laboratórium”,(második kiadás), Budapest, Viking zrt., 2012
- [8] Krammer Olivér, „Felületszerelt passzív alkatrészek forrasztásának modellezése és a kötések mechanikai vizsgálata”, PhD értekezés, 2010, Budapest
- [9] Olivér Krammer, András Nyakó and Balázs Illés: „Measuring Methods of Solder Paste Hole-Filling in Pin-in-Paste Technology”, International Symposium for Design and Technology of Electronic Packages, 13th Edition, Baia Mare, Romania, 2007, 146–150 o.
- [10] Phill Zarrow, „Reflow Soldering of Through-hole Components” Journal of SMT Article, 1999, Vol: 12-4
- [11] IPC-7525 Stencil Design Guidelines, May, 2000
- [12] Application note, „Paste in Hole Printing”, Speedline technologies, Franklin, January 4, 1999
- [13] Application note: „Pin in Paste application note”, Littelfuse
- [14] Mihaly Janoczki, Laszlo Jakab „X-ray solder alloy volume measurement (XSVM) in pin-in-paste technology (PIP)”, Emereald Group Publishing Limited, 26 August 2009
- [15] IPC-A-610D Acceptability of Electronic Assemblies, February, 2005
- [16] Hevesi Bence, Szakdolgozat: „Stencilnyomtatási folyamat hatásának vizsgálata a pin-in-paste technológiával forrasztott alkatrészek kötéseinek minőségére”, BME–ETT, 2009/2010 tanév I. félév
- [17] Sályi István, Pattantyús „Gépész- és villamosmérnökök kézikönyve”, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1961.

- [18] M. Csizmadia Béla, Nándori Ernő „Szilárdságtan - Mechanika mérnököknek”, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002
- [19] William E. Coleman, Denis Jean and Julie Bradbury „Stencil Design for Mixed-technology/SMT Placement & Reflow”, Emerald Publishing, Dec 1, 2000
- [20] Preci-dip swiss world connect, catalog 14.1, 108. o

Ábrajegyzék:

1. ábra. A stencilék fölépítése [6].....	6
2. ábra. A stencilnyomtatás folyamata [7].....	7
3. ábra. Újraömllesztéses forrasztás hőprofilja és annak szakaszai [8].....	9
4. ábra. A PiP technológia lépései [9]	11
5. ábra. A szükséges forraszpaszta mennyiségének meghatározása [11].....	15
6. ábra. A forrasztott kötés térfogatának meghatározása [7].....	16
7. ábra. A meniszkusz gravitációs középpontjának távolsága az alkatrész kivezetéstől [16]..	17
8. ábra. A meniszkusz súlypontjának számításához szükséges mennyiségek [16].....	17
9. ábra. A modell síkjai	22
10. ábra. Modell kör keresztmetszetű alkatrészhez: a) profilszámítás előtt b) profilszámítás után	22
11. ábra. Modell négyzet keresztmetszetű alkatrészhez: a) profilszámítás előtt b) profilszámítás után	23
12. ábra. Az ideális térfogat meghatározásának folyamatábrája.....	24
13. ábra. Az érintkezési szög kiszámításának magyarázata: a) releváns fazetta, b) x-y sík, c) a két normálvektor által bezárt szög.....	25
14. ábra. A kör kivezetésű alkatrész geometriai jellemzői [20].....	28
15. ábra. Az előformázott forrasztás visszaszórt elektronképe: a) fölülnézet, b) oldalnézet.....	29
16. ábra. A szerelőlemez mintázata.....	29
17. ábra. A forrasztás előkészítése: a) beültetés; b) előformázott forrasztás fölville	30
18. ábra. A kísérlethez használt hőprofil.....	31
19. ábra. Forrasztás utáni kötés: a) optikai b) röntgen vizsgálattal	31
20. ábra. Keresztmetszeti csiszolat.....	32
21. ábra. A meniszkuszok keresztmetszetének összehasonlítása: a) valódi, b) modellezett meniszkusz	33
22. ábra. A számolt és a modellezett térfogatok eltérése furatsugár változtatásánál	36
23. ábra. A számolt és a modellezett térfogatok eltérése kontaktusgyűrű változtatásánál.....	37

Táblázatjegyzék:

1. táblázat. A leggyakrabban használt forrasztóanyagok olvadáspontjai [2,4]	5
2. táblázat. A forrasztóanyagra vonatkozó paraméterek	21
3. táblázat. A geometriára vonatkozó paraméterek	21

4. táblázat. A térfogatszámító scripthez használt paraméterek	23
5. táblázat. Térfogatok kör keresztmetszetű kivezetéshez, ha a furat sugár változik.....	34
6. táblázat. Térfogatok kör keresztmetszetű kivezetéshez, ha a kontaktusgyűrű szélessége változik	34
7. táblázat. Térfogatok négyzet keresztmetszetű kivezetéshez, ha a furat sugár változik.....	35
8. táblázat. Térfogatok négyzet keresztmetszetű kivezetéshez, ha a kontaktusgyűrű szélessége változik	36
9. táblázat. Paraméterek kör keresztmetszetű kivezetés forraszprofiljának modellezéséhez a furat sugárának növelésekor	43
10. táblázat. Paraméterek kör keresztmetszetű kivezetés forraszprofiljának modellezéséhez a kontaktusgyűrű szélességének növelésekor	43
11. táblázat. Paraméterek négyzet keresztmetszetű kivezetés forraszprofiljának modellezéséhez a furat sugárának növelésekor.....	43
12. táblázat. Paraméterek négyzet keresztmetszetű kivezetés forraszprofiljának modellezéséhez a kontaktusgyűrű szélességének növelésekor	44

I. Függelék

9. táblázat. Paraméterek kör keresztmetszetű kivezetés forraszprofiljának modellezéséhez a furat sugárának növelésekor

Relatív nagyság/ paraméter	+100 μm	+125 μm	+150 μm	+175 μm	+200 μm	+225 μm	+275 μm	+325 μm	+375 μm
pcb_height[mm]	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57
raduis_pin[mm]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
radius_hole[mm]	0,4	0,425	0,45	0,475	0,5	0,525	0,575	0,625	0,675
height_top[mm]	0,25	0,275	0,3	0,325	0,35	0,375	0,425	0,475	0,525
radius_ring[mm]	0,55	0,575	0,6	0,625	0,65	0,675	0,725	0,775	0,825

10. táblázat. Paraméterek kör keresztmetszetű kivezetés forraszprofiljának modellezéséhez a kontaktusgyűrű szélességének növelésekor

Kontaktusgyűrű szélesség/ paraméter	0,1 mm	0,15 mm	0,2 mm	0,25 mm	0,3 mm	0,4 mm	0,5 mm
pcb_height[mm]	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57
raduis_pin[mm]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
radius_hole[mm]	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
height_top[mm]	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,6
radius_ring[mm]	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,8	0,9

11. táblázat. Paraméterek négyzet keresztmetszetű kivezetés forraszprofiljának modellezéséhez a furat sugárának növelésekor

Relatív nagyság/ paraméter	+100 μm	+125 μm	+150 μm	+175 μm	+200 μm	+225 μm	+275 μm	+325 μm	+375 μm
pcb_height[mm]	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57
raduis_pin[mm]	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
radius_hole[mm]	0,46108	0,48608	0,51108	0,53608	0,56108	0,58608	0,63608	0,68608	0,73608
height_top[mm]	0,25	0,275	0,3	0,325	0,35	0,375	0,425	0,475	0,525
radius_ring[mm]	0,61108	0,63608	0,66108	0,68608	0,71108	0,73608	0,78608	0,83608	0,88608

12. táblázat. Paraméterek négyzet keresztmetszetű kivezetés forraszprofiljának modellezéséhez a kontaktusgyűrű szélességének növelésekor

Kontaktusgyűrű szélesség/ paraméter	0,1 mm	0,15 mm	0,2 mm	0,25 mm	0,3 mm	0,4 mm	0,5 mm
pcb_height[mm]	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57
raduis_pin[mm]	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
radius_hole[mm]	0,46108	0,46108	0,46108	0,46108	0,46108	0,46108	0,46108
height_top[mm]	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,6
radius_ring[mm]	0,56108	0,61108	0,66108	0,71108	0,76108	0,86108	0,96108

II. Függelék

```
// pip_round.fe
// kör keresztmetszetű alkatrészhez

// PARAMÉTEREK
parameter tens = 550 // feszültség
parameter dens = 7.36 // sűrűség
parameter pcb_height = 0.157 // NYHL vastagság + 35 µm kontaktusfelület vastagság
parameter radius_pin = 0.03 // kivezetés sugár

//változók
parameter radius_hole = 0.04 // furat sugár, fémezéssel
parameter height_top = 0.025 // meniszkusz sugár
parameter radius_ring = 0.055 // forrasztási felület sugara, furat sugár fémezés
//nélkül + forrasztási felület vastagság

//script-hez tartozó paraméterek
parameter fac_num = 8663 // az a facet, aminek a normálvektorát számolom
parameter flag = 1 // irány meghatározására
parameter interval_low = 21.99 // vizsgálati tartomány alsó része fokban
parameter interval_high = 22.01 // vizsgálati tartomány felső része fokban
parameter interval_mod = 0.0000001 // a lépésköz, amivel beállítom a térfogatot
// cm^3-ben

// MEGSZORÍTÁSOK
constraint 1 // alkatrész kivezetés hengerhez
formula: x^2 + y^2 = radius_pin^2

constraint 2 // forrasz a furatban hengerhez
formula: x^2 + y^2 = radius_hole^2

constraint 3 // kontaktusfelülethez
formula: x^2 + y^2 = radius_ring^2

constraint 4 // PCB TOP
formula: z = pcb_height/2

constraint 5 // PCB BOT
formula: z = -pcb_height/2

constraint 6 // pin TOP
formula: z = pcb_height/2 + height_top

constraint 7 // pin BOT
formula: z = -pcb_height/2 - height_top
// GEOMETRIA

vertices
//kivezetés
//TOP
1 radius_pin*cos(0*pi/4) radius_pin*sin(0*pi/4) pcb_height/2+height_top constraint
1 6
2 radius_pin*cos(1*pi/4) radius_pin*sin(1*pi/4) pcb_height/2+height_top constraint
1 6
3 radius_pin*cos(2*pi/4) radius_pin*sin(2*pi/4) pcb_height/2+height_top constraint
1 6
4 radius_pin*cos(3*pi/4) radius_pin*sin(3*pi/4) pcb_height/2+height_top constraint
1 6
5 radius_pin*cos(4*pi/4) radius_pin*sin(4*pi/4) pcb_height/2+height_top constraint
1 6
6 radius_pin*cos(5*pi/4) radius_pin*sin(5*pi/4) pcb_height/2+height_top constraint
1 6
7 radius_pin*cos(6*pi/4) radius_pin*sin(6*pi/4) pcb_height/2+height_top constraint
1 6
8 radius_pin*cos(7*pi/4) radius_pin*sin(7*pi/4) pcb_height/2+height_top constraint
1 6
```

```

//BOT
11 radius_pin*cos(0*pi/4) radius_pin*sin(0*pi/4) -(pcb_height/2+height_top)
constraint 1 7
12 radius_pin*cos(1*pi/4) radius_pin*sin(1*pi/4) -(pcb_height/2+height_top)
constraint 1 7
13 radius_pin*cos(2*pi/4) radius_pin*sin(2*pi/4) -(pcb_height/2+height_top)
constraint 1 7
14 radius_pin*cos(3*pi/4) radius_pin*sin(3*pi/4) -(pcb_height/2+height_top)
constraint 1 7
15 radius_pin*cos(4*pi/4) radius_pin*sin(4*pi/4) -(pcb_height/2+height_top)
constraint 1 7
16 radius_pin*cos(5*pi/4) radius_pin*sin(5*pi/4) -(pcb_height/2+height_top)
constraint 1 7
17 radius_pin*cos(6*pi/4) radius_pin*sin(6*pi/4) -(pcb_height/2+height_top)
constraint 1 7
18 radius_pin*cos(7*pi/4) radius_pin*sin(7*pi/4) -(pcb_height/2+height_top)
constraint 1 7

//forrasz a furatban
//TOP
21 radius_hole*cos(0*pi/4) radius_hole*sin(0*pi/4) pcb_height/2 constraint 2 4
22 radius_hole*cos(1*pi/4) radius_hole*sin(1*pi/4) pcb_height/2 constraint 2 4
23 radius_hole*cos(2*pi/4) radius_hole*sin(2*pi/4) pcb_height/2 constraint 2 4
24 radius_hole*cos(3*pi/4) radius_hole*sin(3*pi/4) pcb_height/2 constraint 2 4
25 radius_hole*cos(4*pi/4) radius_hole*sin(4*pi/4) pcb_height/2 constraint 2 4
26 radius_hole*cos(5*pi/4) radius_hole*sin(5*pi/4) pcb_height/2 constraint 2 4
27 radius_hole*cos(6*pi/4) radius_hole*sin(6*pi/4) pcb_height/2 constraint 2 4
28 radius_hole*cos(7*pi/4) radius_hole*sin(7*pi/4) pcb_height/2 constraint 2 4
//BOT
31 radius_hole*cos(0*pi/4) radius_hole*sin(0*pi/4) -pcb_height/2 constraint 2 5
32 radius_hole*cos(1*pi/4) radius_hole*sin(1*pi/4) -pcb_height/2 constraint 2 5
33 radius_hole*cos(2*pi/4) radius_hole*sin(2*pi/4) -pcb_height/2 constraint 2 5
34 radius_hole*cos(3*pi/4) radius_hole*sin(3*pi/4) -pcb_height/2 constraint 2 5
35 radius_hole*cos(4*pi/4) radius_hole*sin(4*pi/4) -pcb_height/2 constraint 2 5
36 radius_hole*cos(5*pi/4) radius_hole*sin(5*pi/4) -pcb_height/2 constraint 2 5
37 radius_hole*cos(6*pi/4) radius_hole*sin(6*pi/4) -pcb_height/2 constraint 2 5
38 radius_hole*cos(7*pi/4) radius_hole*sin(7*pi/4) -pcb_height/2 constraint 2 5

// kontaktusfelület
//TOP
41 radius_ring*cos(0*pi/4) radius_ring*sin(0*pi/4) pcb_height/2 constraint 3 4
42 radius_ring*cos(1*pi/4) radius_ring*sin(1*pi/4) pcb_height/2 constraint 3 4
43 radius_ring*cos(2*pi/4) radius_ring*sin(2*pi/4) pcb_height/2 constraint 3 4
44 radius_ring*cos(3*pi/4) radius_ring*sin(3*pi/4) pcb_height/2 constraint 3 4
45 radius_ring*cos(4*pi/4) radius_ring*sin(4*pi/4) pcb_height/2 constraint 3 4
46 radius_ring*cos(5*pi/4) radius_ring*sin(5*pi/4) pcb_height/2 constraint 3 4
47 radius_ring*cos(6*pi/4) radius_ring*sin(6*pi/4) pcb_height/2 constraint 3 4
48 radius_ring*cos(7*pi/4) radius_ring*sin(7*pi/4) pcb_height/2 constraint 3 4
//BOT
51 radius_ring*cos(0*pi/4) radius_ring*sin(0*pi/4) -pcb_height/2 constraint 3 5
52 radius_ring*cos(1*pi/4) radius_ring*sin(1*pi/4) -pcb_height/2 constraint 3 5
53 radius_ring*cos(2*pi/4) radius_ring*sin(2*pi/4) -pcb_height/2 constraint 3 5
54 radius_ring*cos(3*pi/4) radius_ring*sin(3*pi/4) -pcb_height/2 constraint 3 5
55 radius_ring*cos(4*pi/4) radius_ring*sin(4*pi/4) -pcb_height/2 constraint 3 5
56 radius_ring*cos(5*pi/4) radius_ring*sin(5*pi/4) -pcb_height/2 constraint 3 5
57 radius_ring*cos(6*pi/4) radius_ring*sin(6*pi/4) -pcb_height/2 constraint 3 5
58 radius_ring*cos(7*pi/4) radius_ring*sin(7*pi/4) -pcb_height/2 constraint 3 5

edges
//kivezetés
//oldal
1 1 11 constraint 1
2 2 12 constraint 1
3 3 13 constraint 1
4 4 14 constraint 1
5 5 15 constraint 1
6 6 16 constraint 1
7 7 17 constraint 1

```

```

8 8 18 constraint 1
//TOP
9 1 2 constraint 1 6
10 2 3 constraint 1 6
11 3 4 constraint 1 6
12 4 5 constraint 1 6
13 5 6 constraint 1 6
14 6 7 constraint 1 6
15 7 8 constraint 1 6
16 8 1 constraint 1 6
//BOT
17 11 12 constraint 1 7
18 12 13 constraint 1 7
19 13 14 constraint 1 7
20 14 15 constraint 1 7
21 15 16 constraint 1 7
22 16 17 constraint 1 7
23 17 18 constraint 1 7
24 18 11 constraint 1 7

//forrasz a furatban
//oldal
31 21 31 constraint 2
32 22 32 constraint 2
33 23 33 constraint 2
34 24 34 constraint 2
35 25 35 constraint 2
36 26 36 constraint 2
37 27 37 constraint 2
38 28 38 constraint 2
//TOP
39 21 22 constraint 4 2
40 22 23 constraint 4 2
41 23 24 constraint 4 2
42 24 25 constraint 4 2
43 25 26 constraint 4 2
44 26 27 constraint 4 2
45 27 28 constraint 4 2
46 28 21 constraint 4 2
//BOT
47 31 32 constraint 5 2
48 32 33 constraint 5 2
49 33 34 constraint 5 2
50 34 35 constraint 5 2
51 35 36 constraint 5 2
52 36 37 constraint 5 2
53 37 38 constraint 5 2
54 38 31 constraint 5 2

// kontaktusfelület
//TOP
//keresztbe
61 21 41 constraint 4
62 22 42 constraint 4
63 23 43 constraint 4
64 24 44 constraint 4
65 25 45 constraint 4
66 26 46 constraint 4
67 27 47 constraint 4
68 28 48 constraint 4
//perem
69 41 42 constraint 4 3 color cyan
70 42 43 constraint 4 3 color cyan
71 43 44 constraint 4 3 color cyan
72 44 45 constraint 4 3 color cyan
73 45 46 constraint 4 3 color cyan
74 46 47 constraint 4 3 color cyan
75 47 48 constraint 4 3 color cyan

```

```

76 48 41 constraint 4 3 color cyan
//BOT
//keresztbe
81 31 51 constraint 5
82 32 52 constraint 5
83 33 53 constraint 5
84 34 54 constraint 5
85 35 55 constraint 5
86 36 56 constraint 5
87 37 57 constraint 5
88 38 58 constraint 5
//perem
89 51 52 constraint 5 3
90 52 53 constraint 5 3
91 53 54 constraint 5 3
92 54 55 constraint 5 3
93 55 56 constraint 5 3
94 56 57 constraint 5 3
95 57 58 constraint 5 3
96 58 51 constraint 5 3

//meniszkusz
//TOP
101 1 41
102 2 42
103 3 43
104 4 44
105 5 45
106 6 46
107 7 47
108 8 48
//BOT
111 11 51
112 12 52
113 13 53
114 14 54
115 15 55
116 16 56
117 17 57
118 18 58

faces
//kivezetés oldal
1 -1 9 2 -17 constraint 1 color brown
2 -2 10 3 -18 constraint 1 color brown
3 -3 11 4 -19 constraint 1 color brown
4 -4 12 5 -20 constraint 1 color brown
5 -5 13 6 -21 constraint 1 color brown
6 -6 14 7 -22 constraint 1 color brown
7 -7 15 8 -23 constraint 1 color brown
8 -8 16 1 -24 constraint 1 color brown

//forrasz a furatban
11 31 47 -32 -39 constraint 2
12 32 48 -33 -40 constraint 2
13 33 49 -34 -41 constraint 2
14 34 50 -35 -42 constraint 2
15 35 51 -36 -43 constraint 2
16 36 52 -37 -44 constraint 2
17 37 53 -38 -45 constraint 2
18 38 54 -31 -46 constraint 2

// kontaktusfelület
//TOP
21 -61 39 62 -69 constraint 4
22 -62 40 63 -70 constraint 4
23 -63 41 64 -71 constraint 4
24 -64 42 65 -72 constraint 4

```



```

25 -65 43 66 -73 constraint 4
26 -66 44 67 -74 constraint 4
27 -67 45 68 -75 constraint 4
28 -68 46 61 -76 constraint 4
//BOT
31 81 89 -82 -47 constraint 5
32 82 90 -83 -48 constraint 5
33 83 91 -84 -49 constraint 5
34 84 92 -85 -50 constraint 5
35 85 93 -86 -51 constraint 5
36 86 94 -87 -52 constraint 5
37 87 95 -88 -53 constraint 5
38 88 96 -81 -54 constraint 5

//meniszkusz
//TOP
41 101 69 -102 -9 tension tens color blue
42 102 70 -103 -10 tension tens color blue
43 103 71 -104 -11 tension tens color blue
44 104 72 -105 -12 tension tens color blue
45 105 73 -106 -13 tension tens color blue
46 106 74 -107 -14 tension tens color blue
47 107 75 -108 -15 tension tens color blue
48 108 76 -101 -16 tension tens color blue
//BOT
51 -111 17 112 -89 tension tens
52 -112 18 113 -90 tension tens
53 -113 19 114 -91 tension tens
54 -114 20 115 -92 tension tens
55 -115 21 116 -93 tension tens
56 -116 22 117 -94 tension tens
57 -117 23 118 -95 tension tens
58 -118 24 111 -96 tension tens

bodies
1 1 2 3 4 5 6 7 8 11 12 13 14 15 16 17 18 21 22 23 24 25 26 27 28 31 32 33 34 35 36
37 38 41 42 43 44 45 46 47 48 51 52 53 54 55 56 57 58 density dens

read
// profilszámítás
gogo := {
  r; u; V; u; V; u; V; u; g 20;
  r; u; V; u; V; u; V; u; g 20;
  r; u; V; u; V; u; V; u; g 20;
}

calc_angle := {
  angl := acos(facet[fac_num].z) / (sqrt(facet[fac_num].x^2 + facet[fac_num].y^2 +
facet[fac_num].z^2)) * 180 / pi;
}

facet_include := {
  iter := 1;
  summ := 0;
  foreach edge where color == cyan do summ:= summ+1;
  define edg_id integer[summ];
  foreach edge where color == cyan do {
    edg_id[iter] := id;
    iter := iter+1;
  };
  for (iter := 1 ; iter < summ+1 ; iter++) {
    set edge[edg_id[iter]].facets color magenta where color = blue;
  };
  iter := 1;
  define ar_id integer[summ];
  foreach facet where color == magenta do {
    ar_id[iter] := id;

```

```

        iter := iter+1;
    };
define angls real[summ];
for (iter := 1 ; iter < summ+1 ; iter++) {
    fac_num := ar_id[iter];
    calc_angle;
    angls[iter] := angl;
};
summ_angl := 0;
for (iter := 1 ; iter < summ+1 ; iter++) {
    summ_angl := summ_angl+angls[iter];
};
angl_avg := summ_angl/summ;
}

tester := {
    if(arc_avg<interval_low && (flag==1 || flag==0)) then {
        printf "\n NEM JO! KEVES!\n Atlagszog: %g\n Terfogat:\n",arc_avg;
        v;
        body[1].target := body[1].target + interval_mod;
        printf "body[1].target := %g;\nflag := 0;\ninterval_mod := %g;",
body[1].target,interval_mod >>> "terfogat.txt";
        load "pip_round_1.fe";
    };
    if(arc_avg>interval_high && (flag==1 || flag==2)) then {
        printf "\n NEM JO! SOK!\n Atlagszog: %g\n Terfogat:\n",arc_avg;
        v;
        body[1].target := body[1].target - interval_mod;
        printf "body[1].target := %g;\nflag := 2;\ninterval_mod := %g;",
body[1].target,interval_mod >>> "terfogat.txt";
        load "pip_round_1.fe";
    };
    if(arc_avg<interval_low || arc_avg>interval_high) then {
        printf "body[1].target := %g;\nflag := 1;\ninterval_mod := %g/2;",
body[1].target,interval_mod >>> "terfogat.txt";
        load "pip_round_1.fe";
    }
    else {
        printf "body[1].target := %g;\nflag := 1;\ninterval_mod := %g;",
body[1].target,interval_mod >>> "terfogat.txt";
        printf "\n OKE!!!\n Atlagszog: %g\n Terfogat:\n",arc_avg;
        v;s;
    };
}

start := {
    read "terfogat.txt";
    gogo;
    facet_include;
    tester;
}
start

```