



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar

TDK dolgozat

Petrovszki Gergő

**CHIPMÉRETŰ ALKATRÉSZEK
GÉPI BEÜLTETÉSÉNEK
PONTOSSÁG MÉRÉSE**

KONZULENS

Bátorfi Réka

BUDAPEST, 2015

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
Abstract	5
2. Irodalmi áttekintés	6
2.1. A lézeres megmunkálások fizikai alapjai [1]	6
2.2. Lézertechnológiák az anyagmegmunkálásban [2]	7
2.3. Lézergravírozás [3]	7
2.4. Felületszerelési technológia	8
2.4.1. Forrasanyagok	9
2.4.2. Stencilnyomtatás	10
2.4.3. Alkatrész beültetés	11
2.4.4. Forrasztás	14
2.4.5. Gőzfázisú hőközlési technika	15
2.4.6. Ellenőrzés	16
3. Önálló munka	18
3.1. A mérősablon elkészítése	18
3.2. Alkatrész beültetés	19
3.3. Mérések	24
4. Összefoglalás	28
Irodalomjegyzék	29

1. Bevezetés

Napjainkban a termékfejlesztők igyekeznek egyre kisebb méretű elektronikai készülékeket készíteni, főleg a hordozható eszközök terén, például laptop, mobil- illetve okostelefon. Elsősorban úgy csökkenthető az egyes elektronikai áramkörök mérete, ha kisebb alkotó elemekből építjük fel, tehát kisebb alkatrészeket használunk fel. Ezeket speciális gépek ültetik be a már felpasztázott áramköri hordozó lemezre. Ha a beültetési pontosság nem elég nagy, azaz az alkatrész nem pontosan a megfelelő helyre kerül, akkor a gyártás forrasztási fázisa folyamán rosszul vagy egyáltalán nem forradnak be az elektronikai alkatrészek. Az új forrasztási technológiák (például a gőzfázisú forrasztás) és új forrasztóvözetek forrasztás közbeni viselkedése miatt a felületszerelt áramkörök egyre érzékenyebbek a beültetési pontosságra, azaz egyre kisebb beültetési hiba is már problémát okoz a kész áramkörön. Például a sárga effektus (tombstoning) hibának az egyik leggyakoribb oka a beültetési pontatlanság. Minél kisebb méretű, illetve minél sűrűbb raszterosztású kivezetőkkel rendelkező alkatrészekről van szó, annál kisebb pontatlanság engedhető meg.

A kómersz elektronikai készülékek mellett léteznek a nagymegbízhatóságú áramköröket igénylő iparágak, úgy, mint járműelektronika (autó, repülő, űrjármű, a biztonsági berendezések minden esetben), orvosi elektronika, hadiipar valamint minden egyéb olyan alkalmazás, melynek emberi élet lehet a tétje. A megbízhatóság azt jelenti, milyen hosszú ideig őrzi meg az adott termék a meghatározott tulajdonságait (jó működőképességét), meghatározott üzemeltetési feltételek mellett. A nagymegbízhatóságú termékek esetén a javítások nem megengedettek, mert onnantól kezdve nem lenne meghatározható az áramkör élettartama, mivel a javítással különböző behatások érték a javított és a nem javított alkatrészeket. Az egyedi javítások nagy bizonytalanságot vinnének a rendszerbe. Tehát ha akár csak egyetlen forrasztás is rosszul sikerül egy ilyen áramkörön, akkor az egész áramkör a selejtbe kerül. Ez is jelzi a téma fontosságát, mert az alkatrész beültetése az egyik legnagyobb darabszámban folytatott egyedi technológiai lépés a gyártás során, így alacsony hibaszázalék is jelentős problémát okoz.

Kísérleteim során az Elektronikai Technológia tanszéken levő TWS alkatrész beültető gép beültetési pontosságát vizsgáltam kisméretű alkatrészek beültetése esetén. A mérésekhez chipméretű 0402 (1000×500 μm) és 0201-es (600×300 μm) méretkódú ellenállásokat és kondenzátorokat használtam. A 0201-es méretkódú alkatrészek beültetése azért is szolgál

hasznos adatokkal, mert ennek a méretnek a kezelése a gépkönyv szerint is a berendezés tudásának határán túl van.

Abstract

Examining Placement Accuracy of Automatically Assembled Chip Size Components

Product designers are aiming to construct smaller and smaller sized electronic appliances nowadays, especially in the portable domain: mobile and smartphones, laptops, etc. The size of electronic circuits can be miniaturized mainly by using smaller electronic components thus increasing circuit density.

Electronic components are assembled onto the solder pasted printed circuit boards (PCBs) by special machines. If the positioning accuracy is not high enough, i.e. a component is not placed to the suitable position, soldering defects will occur during the soldering process. New soldering technologies like vapor phase soldering and the use of novel solder alloys are causing higher sensitivity to the assembling inaccuracies by their different dynamic properties. This means that even small misplacements will result in defects on the final electronic assembly. For example, the main reason of the tomb stone effect is the positioning inaccuracy. The smaller the size and the pitch of the components, the lower the inaccuracy is allowed.

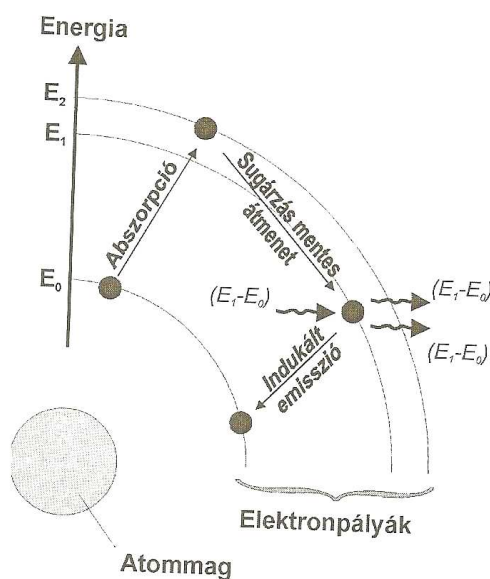
Beside commercial electronics assemblies, exist branches in the electronics industry which require high reliability: vehicle electronics (all the safety electronics of automotive, aerospace etc. applications), biomedical electronics, military uses, and all the applications where human lives depend on. Reliability is the ability of a system (here the assembly) to function (function well) under stated conditions for a specified period of time. At high reliability electronic circuits, rework is not allowed, as with doing some mending, the untouched and the reworked components become liable to different effects. Individual repairing would bring very high uncertainties into the system. So it means that if even one solder joint is faulty, the whole assembly become reject. This indicates the importance of the topic, as the component placement is one of the processes carried out in the highest number. so even a low fault percentage causes a significant problem in the technological line.

The target of my work was to define the placement accuracy of the TWS surface mounting placement machine for small chip size components. In my experiment, I used 0402 (approximately $1000 \times 500 \mu\text{m}$) and 0201 ($600 \times 300 \mu\text{m}$) chip size resistors and capacitors. Testing the placement accuracy of 0201 sized components provides useful information about the assembling machine, because according to its manual, this is beyond the limit that it can reliably handle.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A lézeres megmunkálások fizikai alapjai [1]

A lézer a jelenség angol kifejezésének kezdőbetűiből képzett betűszó (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), melynek magyar jelentése: fényerősítés a sugárzás indukált emissziójával. Ahhoz, hogy megértsük a lézerefény keletkezésének elvét, három alapfogalommal kell tisztában lennünk: abszorpció, indukált emisszió, és populáció inverzió. Abszorpciónak nevezzük, ha egy, az atommag körül keringő elektron energiát nyel el, és ezáltal egy nagyobb energiaszinttel jellemzett pályára kerül (1. ábra). Ekkor az atom gerjesztett állapotban van, ebből az állapotából spontán emisszióval, azaz fotonkissugárzással kerül vissza alapállapotába. Ekkor az elnyelt fotont időbeli késéssel adja le.



1. ábra Az abszorpció és az indukált emisszió [1]

Az indukált emisszió az abszorpció fordított folyamata, olyan kényszerített energiacsökkenéssel járó átmenet, ahol az emissziót egy foton ütközése váltja ki, de ez a foton nem nyelődik el, hanem hatására egy újabb foton lép ki a gerjesztett anyagból. Ehhez a folyamathoz az szükséges, hogy egy tetszőleges foton 50%-nál nagyobb valószínűséggel gerjesztett részecskével ütközzön, azaz, hogy a lézérátmenetet adó részecskék több mint 50%-a gerjesztett állapotban legyen. Az ilyen mértékben gerjesztett állapotot nevezzük populáció inverzióknak. A lézer sugárforrásban az aktív anyagot gerjesztjük, azaz az aktív atomokon, ionokon, molekulákon populáció inverziót hozunk létre. Emiatt, ha egy foton kilép a

közbenső energiaszintről (E2), akkor ez bizonyos (50%-nál nagyobb) valószínűséggel egy újabb fotont gerjeszt, azaz ütközésével kikényszeríti az aktív anyagból a foton kibocsátást. A kibocsátott foton hullámhossza, energiája, fázisa megegyezik az első fotonéval. Mindegyik foton új fotonok emisszióját képes indukálni.

2.2. Lézertechnológiák az anyagmegmunkálásban [2]

A lézerek alkalmazásának lehetőségei nemcsak a napi életvitelben, hanem az anyagmegmunkálásokban is igen széles körűek. A fő megmunkálási módok szinte mindegyike megoldható lézeres technológia alkalmazásával. A költségek nagysága ellenére sok esetben az teszi gazdaságossá, hogy az adott gyártási folyamat más technológiával nem, illetve nem olyan pontossággal valósítható meg, vagy nem érdemes olyan kis darabszámnál azt alkalmazni. A lézeres anyagtechnológiák legfontosabb felhasználási területei, közöttük legelterjedtebbnek a vágás, a hegesztés és a felületkezelés tekinthető, melyek igen nagy energiasűrűséget igényelnek.

2.3. Lézergravírozás [3]

A lézergravírozás során egy koncentrált lézersugár hatására az anyag elpárolog vagy elég. Ezzel rendkívül tartós, jól látható és olvasható felirat, logó, kép, sorszám vagy akár vonalkód készíthető, szinte bármilyen anyagra. Felhasználási módja rendkívül széles körű. Leggyakrabban személyre szóló ajándéktárgyakat készítenek, de ipari körökben gravírozással történhet a különböző eszközök márkanevével történő ellátása, szerszámok, vagy alkatrészek sorszámozása. A lézersugár tulajdonságainak köszönhetően apró felületekre is nagy pontossággal lehet gravírozni.

Az ún. YAG (yttrium-aluminium-garnet) lézer, egy változtatható frekvenciájú és erősségű lézerfényvel, melynek mozgását egy tükör irányítja. Mikrométer pontossággal égeti bele a gravírozandó ábrát a felületbe. A változtatható frekvenciának és erősségnek köszönhetően, rendkívül sokféle anyagot képes megjelölni: fémet, műanyagot, pácolt fát, bőrt és műbőrt egyaránt. A gravírozás során fontos, hogy a felület sima és egyenes legyen, mivel a lézer fókusztávolsága a fel-le irányú tengelyen egyetlen pontba történik.

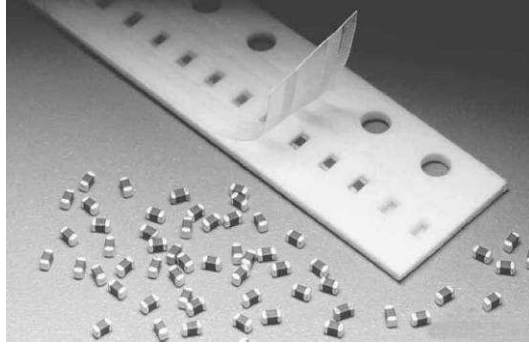
Az üvegbe való gravírozással különböző dísz tárgyakat is lehet készíteni. Ebben az esetben nem csak egy síkban, hanem térben változtatják a fókusztávolságot.



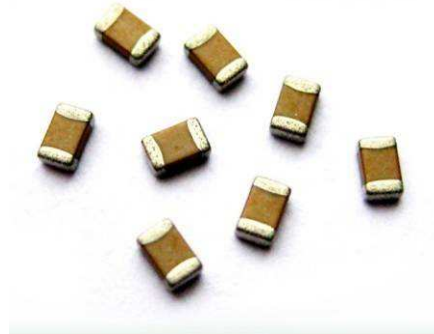
2. ábra A koffein molekula üvegbe gravírozva [4]

2.4. Felületszerelési technológia

A felületszerelési technológia (surface-mount technology, SMT) [12] olyan technológia, melynek során láb nélküli alkatrészeket (BGA (ball grid array), SMD (surface mount device) ellenállás, SMD kondenzátor, stb), illetve rövid lábú IC-eket, csatlakozókat közvetlenül a nyomtatott huzalozású lemez felületére forrasztanak. Az eljárás során nincs szükség az alkatrészkivezetők beforgasztásának céljából létrehozott furatokra a hordozó felületén. Ezt a technológiát az 1960-as években találták fel, de csak az 1980-as évek vége óta vált igazán elterjedtté az iparban. A felületi szereléstechológia nagy előnye az alkatrészek és ebből adódóan az áramkörök miniaturizálásában van, mely a XX. század robbanásszerű elektronikai fejlődésének következménye és hajtóereje egyben. Jelentősége, hogy az automatizált gépsorok sokkal gyorsabban tudják elhelyezni ezeket az alkatrészeket a hordozón, mint a lábakkal rendelkező, furatszerelt alkatrészeket, ezzel növelve a gyártás hatékonyságát. A korábbi, furatszerelési technológiában csipeszekkel, karmokkal, pofákkal és hasonló mechanikus megfogószerkezetekkel tudták az automaták megragadni az alkatrészeket; formázni, hajlítani a huzalkivezetéseiket, majd a beültetés után megfelelően meghajlítani azokat. Az így beültetett áramkörök esetén hullámforrasztással hozták létre a kötéseket. A felületszerelés ezzel szemben szabványosított alkatrészméreteket és alkatrésztokozás kialakításokat követelt, mellyel az egyre jobb minőségű és nagyobb sebességű tömeggyártás lehetővé vált. A felületszerelt alkatrészek teteje az esetek 95%-ában sík, mivel vákuumpipettákkal fogja meg az alkatrészeket a beültetőgép. A felületszerelés elterjedésével megjelent az újraömlesztéses forrasztási technológia is, mely szintén elősegítette a minél finomabb rajzolatú, nagyobb áramkörösűrűségű elektronikai moduláramkörök gyors és jó minőségű tömeggyártását.



3. ábra 0402-es kondenzátorok 8mm-es szalagtárban [6]



4. ábra 0805-ös SMD kondenzátorok

2.4.1. Forraszanyagok

Az újraömllesztéses technológiához szükséges alapanyag a forraszpaszta, melyben a forraszfém lehet ólomtartalmú, vagy ólommentes [9]. Az ólommentes forrasztás előrelépését segítik a kormányok által preferált környezetvédelmi törvények is, mint az EU-s RoHS direktíva [21]. Emiatt 2006-ban a bevezetőben említett nagymegbízhatóságú termékek kivételével kötelező az ólommentes forraszanyagok használata, még ha ezek rosszabb mechanikai és nedvesítési tulajdonságokkal rendelkeznek is. Ezen kívül az ólommentes forraszok nagyobb felületi feszültséggel is rendelkeznek, mint az ólomtartalmúak, így a beültetés hibái nagyobb százalékban okoznak alkatrész elcsúszást, elfordulást és sírkő effektus is gyakrabban lép fel adott felület, kerület és alkatrésztömeg esetén. A fellépő erők nagyobbak, és erő egyenlőtlenség esetén kisebb az esély az alkatrészek forrasztás közben fellépő, ideális pozícióba történő visszarendeződésére (ez az úgynevezett self alignment hatás).

Az ólommentes forraszanyagok leggyakoribb összetevői általában az ón, réz és az ezüst. Emiatt használják a SAC rövidítést, mely a Sn-Ag-Cu anyagok kezdőbetűiből áll össze. Találkozhatunk még a TSC rövidítéssel is, mely a tin-silver-copper angol szavak kezdőbetűiből adódik. A gyártók más-más összetételű forraszpasztákat készítenek a különböző hőközlési módú újraömllesztéses forrasztási technológiákhoz, mint például a konvekciós, az infrasugaras vagy a gőzfázisú technikákhoz. A forraszpaszta a különböző

fémötvözeteken kívül tartalmaz folyasztószert is. A folyasztószer, más néven flux, fontos szerepet tölt be, hiszen ez az enyhén savas anyag felelős a forrasztási felületek tisztításáért, illetve a jobb nedvesítésért.



5. ábra SAC305-ös forraszpaszta [8]

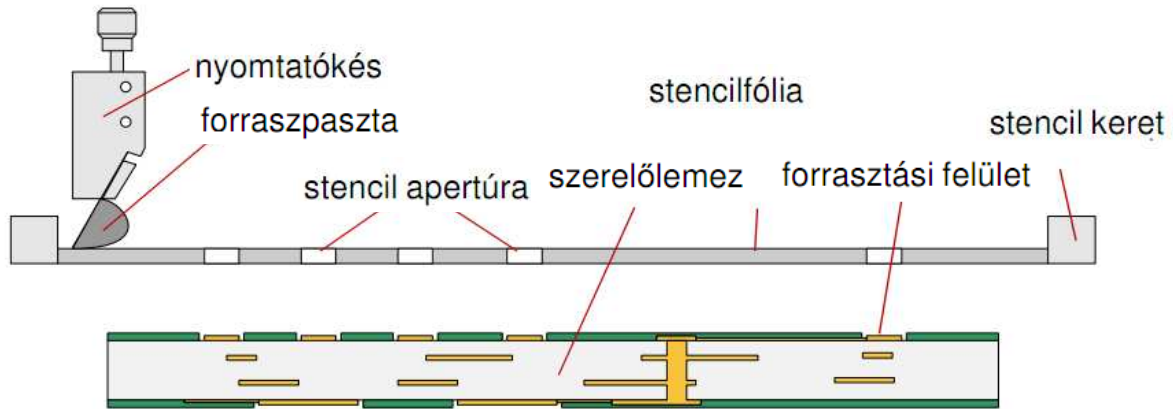
A SAC összetételű forraszpaszták jelölésében található egy szám a SAC felirat után. Ez a szám határozza meg a pontos összetételt tömegszázalék szerint. Például a SAC305 jelentése, hogy 3 tömegszázalék ezüst, 0,5 tömegszázalék réz és a maradék 96,5 tömegszázalék pedig ón a forraszanyagban. Az EU direktívák mellett Japánban is a SAC305 összetételű forraszanyag terjedt el az ólmos forraszanyagok kiváltójaként [10]. Emellett a SAC ötvözeteknek nagyon sok fajtája létezik, a fentiekhez hasonló összetételi arányokkal. Mivel egyik sem az eutektikus ötvözet (Sn-Ag-Cu esetén az eutektikus ötvözet az elektronikai alkalmazáshoz nem megfelelő tulajdonságú kötéseket tud létrehozni), így az egyes ötvözetek a forraszanyag forrasztás közbeni illetve forrasztás utáni funkcióiban és tulajdonságaiban különböznek.

2.4.2. Stencilnyomtatás

Az újraömlésztéses forrasztási technológia első lépése a forraszpaszta felvitele. Ezt a folyamatot többnyire stencilnyomtatással végzik a sorozatgyártásokkor. A stencilnyomtatás során a stencilnyomtató berendezésbe behelyezzük a stencilt, amely általában 75–200 µm vastagságú rozsdamentes acél fólia, melyen a forrasztási felületeknek megfelelően ablakok (apertúrák) találhatók.

A forrasztási felületek mérete általában adott, így a felvitt paszta mennyiségét, térfogatát a stencil vastagsága határozza meg. Az apertúrákba kerül be a forraszpaszta a nyomtatási folyamat során, majd a stencil elválasztása után a forraszpaszta a forrasztási felületeken marad. Ha a panel és a stencil nem megfelelően helyezkedik el egymáshoz képest, akkor a nyomtatás is pontatlan lesz. Kis méretű vagy finom raszterosztású alkatrészeknél már

kis pontatlanság is hibákat okozhat a forrasztás során. Gyakori hiba ilyenkor a kivezetések közötti rövidzár, különösen akkor, ha nincs forrasztásgátló lakkreteg a panelen. Nyomtatás előtt a pozícionálást általában kamerák segítségével végzik. A három legelterjedtebb stencilkészítési technológia a kémiai maratás, a lézerrel vágás és a galvanoplasztika.

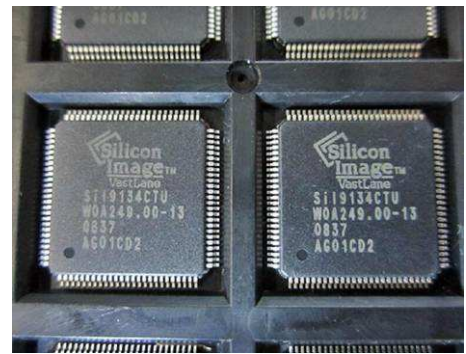


6. ábra Stencilnyomtató keresztmetszeti rajza [14]

2.4.3. Alkatrész beültetés

A stencilnyomtatás után a következő lépés az alkatrészek beültetése. Ebben a folyamatban minden alkatrész a számára megfelelő helyre kerül a hordozón. A beültetést automata beültetőgépekkel végzik. A gép a nyomtatott huzalozású lemezhez tartozó programból nyeri ki a beültetendő alkatrészek típusát, pozícióját és orientációját.

A beültetőgép a programjának megfelelően az előre meghatározott alkatrésztárolóból felveszi az alkatrészt. A felvételhez a tokozás mértétől függően valamilyen vákuumos pipettát (nozzle-t) használ. Ehhez szívja hozzá az alkatrészt és veszi ki a tárolóból. A tárolás történhet szalagon, csőben vagy tálcán. A szalagtár (3. ábra) anyaga papír vagy műanyag melyben az alkatrészek számára süllyesztékek vannak. Az

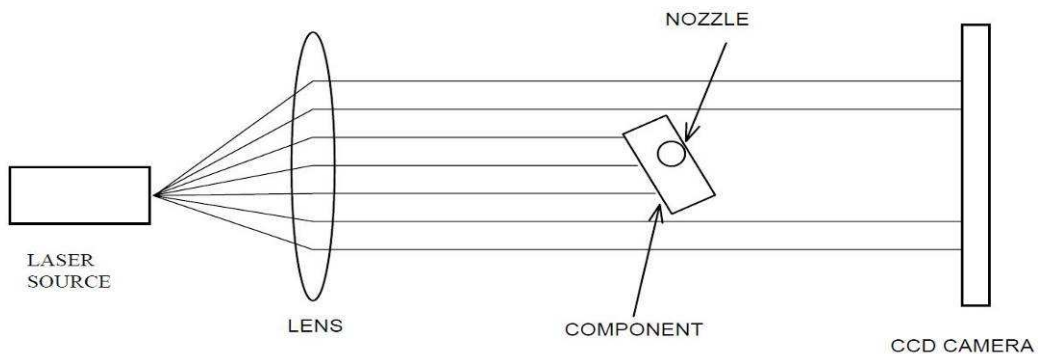


7. ábra Tálectáras QFP-k

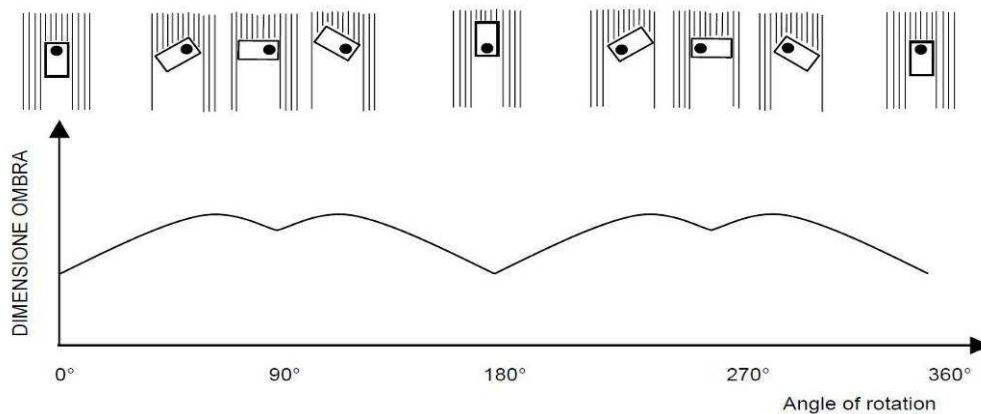
alkatrészek kihullását egy védőfólia akadályozza meg, a széle pedig perforálva van a könnyebb és pontos lépetés érdekében. A beültetőgép a fedőfóliát folyamatosan lefejtve, a szalagot a perforációk segítségével fogaskerekekkel meghajtva továbbítja. A beültetőgépeken a szalagtárak egy rövid szakasza kis ablakokon van szabaddá téve, melyből a vákuumpipettákkal felveszi az alkatrészeket. Az alkatrész felvétele sosem kellően pontos, ezért ezt a hibát korrigálni kell. A felvételt követően a gép először is ellenőrzi, hogy sikeres

volt-e az alkatrész felvétele. Ezt ki tudja szűrni a vákuum mértékéből is. Ha sikeres volt a felvétel, nagyobb vákuum jön létre a fejben.

Ezután kell gondoskodni arról, hogy az felvett alkatrész középpontja pontosan egybe essen a pipettáéval, úgy hogy ne is legyen elfordulva. Erre egy a kezdetekben alkalmazott megoldás a mechanikus pozícionálás. Ekkor két oldalról két kar megfogja az alkatrészt, ezzel pontosan középére tolja azt, így az esetleges forgatási hiba is eltűnik, majd a karok elengedik, és a vákuumfejvel történik a beültetés. Ennél egy újabb módszer, amikor párhuzamos lézernyalábokkal világítja meg az alkatrészt (8. ábra) és ennek árnyékából határozza meg annak helyét (9. ábra). Ehhez több ilyen mérést is kell végezni miközben az alkatrészt meg is kell forgatni. Nagy előnye ennek a technikának, hogy nem csak az alkatrész pontos helyét számítja ki a pipettán, ami alapján majd korrigálja a beültetést, hanem annak pontos méretét is, így egy esetlegesen törött vagy mérethibás alkatrész nem kerül beültetésre.



8. ábra A lézeres pozíció mérési elve [17]



9. ábra Vetületek a forgatás függvényében [17]

További alkalmazott megoldás a külső kamerás mérés, ahol egy kamera fölé viszi az alkatrészt a beültetőfej és így számítja ki a pontos helyzetét. Ugyan az eddigiek közül ez a legpontosabb, ám lényegesen lassabb, ezért csak nagy pontosságot igénylő alkatrészeknél alkalmazzák. Az igen kis méretű alkatrészek (01005-ös 400 um×200 um) és az alsó kivezetős alkatrészek (például BGA, QFN, DFN) egyre gyakoribb használata miatt viszont ez az

alkatrészpozíció ellenőrző módszer is egyre inkább előtérbe kerül. A hibák korrigálása után az alkatrészt a gép beülteti a forraszpasztával ellátott hordozóra.



10. ábra Fritsch beültetőgép [15]

A gépek beültetőfejek szempontjából két csoportba sorolhatók [11]. A pick and place típus, azaz felveszi az alkatrészt és azonnal le is helyezi a megfelelő pozícióba. A sebessége ezeknek a fejeknek elérheti akár a 20 000 beültetett alkatrészt óránként. A pontossága ezen fejeknek rendkívül jó (10-20 μm), így a finom raszterosztású integrált áramköröket többnyire ezekkel a fejekkel ültetik be. A másik a collect and place, ahol több pipettával egyszerre több alkatrészt vesz fel a tárból a gép, majd a panel fölé mozogva beülteti azokat. Ezen beültetőfejek sebessége eléri akár a 80 000 beültetett alkatrészt óránként, viszont kevésbé pontosak (20-40 μm), így a passzív SMD alkatrészek beültetésére használják azokat. Ez software és hardware szempontjából is bonyolultabb, viszont sokkal gyorsabb beültetést tesz lehetővé.

Alkatrész felvétel szempontjából lehet mozgótálcás és hordozóállványos a beültetőgép. A mozgótálcás beültetőgépek rendkívül nagy szériaszámú sorozatgyártásra alkalmasak. A szerelőlemezt többnyire egy mozgó tálcára rögzítik, és ezután azt mozgatják a beültetőfejek alá a megfelelő pozícióba. A hordozóállványos beültetőknél a beültetőfej egy állványon mozog, elérve mind az összes adott beültető egységnek dedikált alkatrész adagolókat, mind a szerelőlemez teljes felületét. Az alkatrész adagolók és a szerelőlemez pozíciója rögzített a beültetés közben.

Az alkatrészbeültető gépek egyik legfontosabb jellemzője a termelékenység, azaz a beültetési sebesség mellett a beültetési pontosság. Ennek egyik változata, mely a gép

gyártósortól független jellemzésére szolgál, a gépképesség. A gépképesség megmutatja, hogy az adott folyamat megfelel-e egy adott követelménynek és milyen mértékben, milyen statisztikai biztonsággal.

A képesség vizsgálata során a folyamat ingadozását viszonyítjuk az előírt követelményekhez, azaz a tűrésmezőhöz. A képesség index értéke a következőképpen számítható ki:

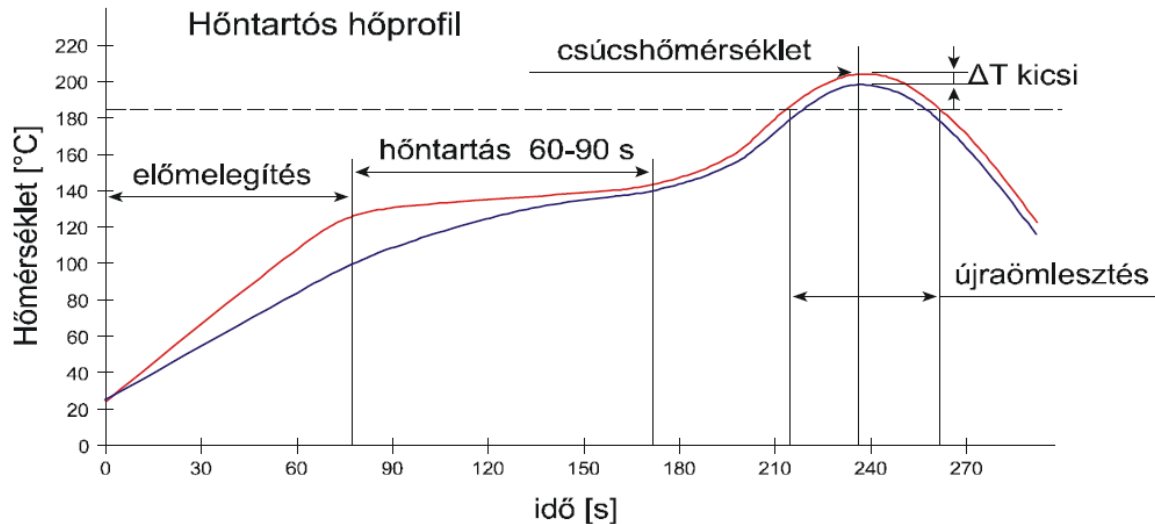
$$C_x = \frac{FTH - ATH}{6\hat{\sigma}} = \frac{TM}{6\hat{\sigma}}$$

- ahol
 - C_x : képesség index (capability)
 - FTH : felső tűréshatár
 - ATH : alsó tűréshatár
 - TM : tűrésmező
 - a folyamat elméleti szórásának becslése.

2.4.4. Forrasztás

A forrasztási folyamat során hőt közlünk a forrasztóanyaggal, amely ennek hatására, ha eléri az olvadáspontot, megömlik, nedvesíti a fémezett felületeket, atomjai diffúzióval behatolnak a hordozó és az alkatrészek kontaktusfelületeibe, ezzel a határfelületekben intermetallikus réteg jön létre, majd a dermedés közben kialakul a forrasztott kötés. A forrasztandó áramkör felmelegítése többféleképpen történhet. Az iparban elterjedtek a konvekciós alagútkemencék és az infrasaras kemencék, valamint ezek kombinációi.

A hőmérséklet szabályozását a hőprofil alapján kell végezni. Általánosságban igaz, hogy létezik felső hőmérséklet korlát, ami körülbelül 260°C-ra tehető. Mivel az ólommentes és az ólmos forrasztóanyagok olvadáspontja jelentősen eltér, így különböző hőprofilot kell beállítani a forrasztáshoz. Az ólommentes forrasztóanyag 240°C, míg az ólomtartalmú 210°C csúcshőmérséklettel forrasztható [7]. Nem minden típusú alkatrész forrasztható újraömllesztéses eljárással, ugyanis nem minden alkatrésztípus bírná ki az újraömllesztéses forrasztás során szükséges magas hőmérsékletet, ilyenek általában a műanyag csatlakozók vagy egyes felületszerelt érzékelők.



11. ábra Hőntartós hőprofil

Az újraömlésztéses forrasztások esetében több részre bontható a hőprofil. A hőprofil egyik jellemzője a ΔT . A ΔT a szerelőlemezen lévő legmagasabb hőmérsékletű alkatrész és az ebben az időpontban mért legalacsonyabb hőmérsékletű alkatrész közötti hőmérséklet különbség. A hőprofil jellegzetes része a hőntartás, amely arra szolgál, hogy a forrasztásban található folyasztószer kifejtsé oxideltávolító hatását. A hőntartás hőmérséklete általánosan 150°C és 1-1,5 percig szokás tartani ezt a hőmérsékletet, hogy a folyasztószernek legyen ideje az oxideltávolítás kémiai reakciójára. A túl rövid ideig tartó hőntartás nagy hőmérséklet különbséget okozhat a hordozón. Ha rövid vagy nincs hőntartás, akkor a különböző hőkapacitású alkatrészek között nagy lesz a hőkülönbség, így akár hideg kötés is kialakulhat. A homogén hőmérséklet eloszlás jobb minőségű forrasztást eredményez.

A jó kötés kialakításához fontos információ, hogy a forrasztóanyag mennyi időt tölt olvadt állapotban, ez is a hőprofil jellemzi.

2.4.5. Gőzfázisú hőközlési technika

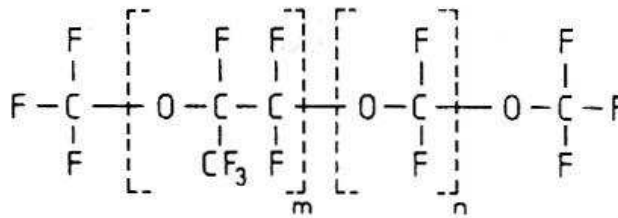
A gőzfázisú, újraömlésztéses (reflow) forrasztási technológia alapelve több mint 30 éves. Nagy előnye a jelenleg is használatos konvekciós és infrafűtéses melegítéshez képest, hogy a gőz a kondenzációja során nagyon jó és egyenletes hőátadást valósít meg. Nem kell attól tartani, hogy a szerelőlemez vagy a beültetett alkatrészek egyes részei túlmelegednek. [13]

A forrasztási térben fellépő maximális hőmérsékletet meghatározza a hőközlő folyadék forráspontja. Nagy előnye ennek a technológiának, hogy nem szükséges bonyolult hőprofilokat beállítani, az eljárás energiatakarékos, továbbá a gőzfázisú berendezések

kezelése egyszerű. A gőzfázisú forrasztóberendezésekben nitrogéngáz felhasználása nélkül forraszthatunk oxigénmentes közegben.

Napjainkban a szerelt, nagy bonyolultságú áramköröknél olyan forrasztási technológiát kell alkalmazni, amelyik egyenletes melegítést valósít meg. Ennek a követelménynek a gőzfázisú forrasztás eleget tesz.

A gőzfázisú forrasztás (Vapour Phase Soldering, VPS) nevét a hőközlésért felelős anyagról a gőzről kapta, amit folyadék forralásával képzünk. A folyadékot, amit fűtünk speciálisan forrasztási célra fejlesztették. A forráspontja magasabb kell legyen, mint az adott forrasz olvadáspontja. Mivel az ebből a folyadékból képzett gőz fogja a hőközlést végezni a forrasztás során, így az ilyen folyadékokat munkafolyadékoknak hívjuk [5]. Legelterjedtebb a perfluoropolyether (PFPE), melyet Galdennek neveznek.



12. ábra Perfluoro-poli-éter

A Galdenből képződő gőznek legfontosabb tulajdonsága hogy fajsúlya a levegőénél nagyobb. Ez a gőz 17-szer nehezebb a levegőnél, amelynek literje 1,293 g [5]. Ez azért fontos, mert így a gőz lent marad a tartály alján a folyadék felett. A szerelőlemezt pedig ebben a gőzben helyezük majd el, ami kondenzáció segítségével (azaz lecsapódik a szobahőmérsékletű áramkörre) egyenletesen felmelegíti az áramköri szerelvényt, az alkatrészeket, kontaktusfelületeket és a forraszpasztát. A SAC305 ötvözethez (olvadáspontja 217 °C) alkalmazott Galden forráspontja 230-235 °C. Ahogy a szerelőlemez bekerül a gőztérbe, megkezdődik a forrasztási folyamat. A folyamat során a melegebb gőz biztosítja a hőforrást.

2.4.6. Ellenőrzés

Az ellenőrzés történhet egyszerűen szemrevételezéssel, akár szabad szemmel vagy mikroszkóppal és történhet gépi úton is. Az automatikus optikai vizsgálat (Automatic Optical Inspection – AOI) [14] objektív eredményeket szolgáltat, a digitális gépi látás és képfeldolgozás módszereit alkalmazó, szerelt és szeretlen nyomtatott huzalozású lemezek automatizált optikai ellenőrzése. Gyorsabb, pontosabb és olcsóbb, mint a manuális ellenőrzés, így kiváltotta azt. Az áramköri gyártástechnológia összes lépésének (panelazonosítás

vonalkód, DMC (Data Matrix Code –kétdimenziós adat kód) segítségével, stencilyomtatás, ragasztó felvitel, alkatrész beültetés, újraömlésztés-, parciális-, hullámforrasztás) minősége, megfelelősége vizsgálható a segítségével.

A modern CCD (charge coupled device – töltéscsatolt eszköz) érzékelők lehetővé tették az analóg képkészítés kiváltását digitálissal. A töltéscsatolt eszköz analóg jelét erősítik és digitalizálják, így számítógépek által feldolgozható, tárolható, matematikailag leírható (mátrix) adathalmazként kezelhetjük az elkészített képeket.

A digitális kép matematikai reprezentációján (mátrix) történő, adott feladatokat ellátó matematikai műveletek végzése. A cél a kép szegmentálása, megváltoztatása, átalakítása az adott feladatnak megfelelően. Képfeldolgozási lépések az alulmintavételezés, invertálás, binarizálás, különféle szűrések, él-, kör-, ellipszisillesztés, szegmentálás, szegmens eltávolítás stb.

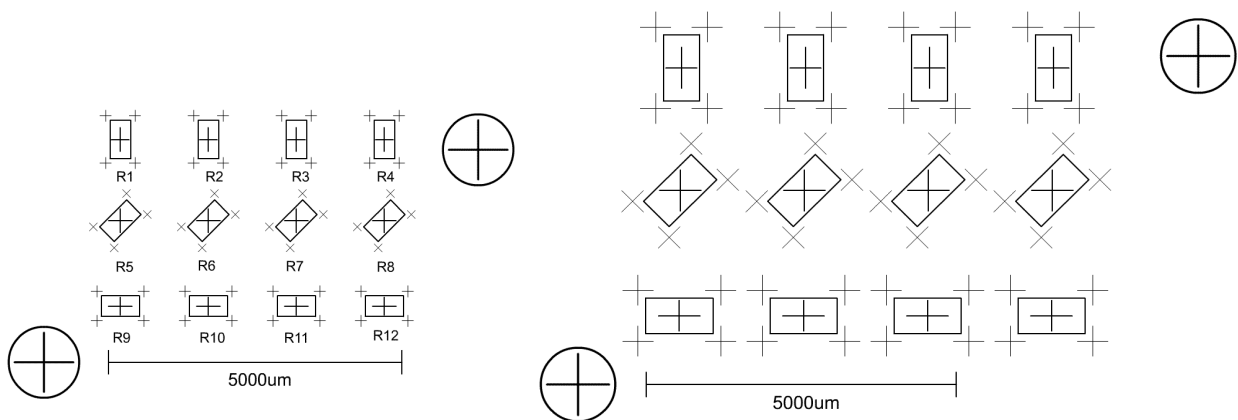
A binarizálás során a színes, vagy szürkeárnyaltos képet, meghatározott binarizációs szint alapján kizárólag fekete és fehér pixelekből álló képre redukáljuk. A binarizálás célja, hogy a binarizált képen, az előre meghatározott vizsgálóablakban található fekete, és fehér pixelek arányának illetve számának meghatározásával egyszerű és gyors döntést tudjunk hozni a képrészlet (pl. forrasztás) megfelelőségéről.

3. Önálló munka

3.1. A mérősablon elkészítése

Az etalon készítéséhez szükségem volt egy mintázatra, ami hasonlít az alkatrészek footprint-jéhez és alkalmas mérések elvégzéséhez is. A mintázat kialakításánál figyelembe vettem az IPC-950-ban [19] leírtakat. Az alkalmazott rajzolatot a Flash MX programmal terveztem meg, mert ebből könnyen lehet vektorgrafikus ábrát generálni a lézert vezérlő program számára.

A minta 3 különböző forgatást tartalmaz, mindből 4db-ot. A mérésekhez az alkatrész rajzolat köré lokális fiduciális jeleket tettem. Ezekhez képest lehet megmérni a pozíció hibát. A beültetőgép számára a beültetési pozíciók könnyebb betanítása érdekében tettem még egy jelet, ami az alkatrész közepét jelöli. Ennek különösen a 45°-os forgatás esetén van nagy szerepe. Ezeken felül további két fiduciális jelet tettem, melyek alapján beméri a panel pozícióját a beültetőgép. A 0201-es és a 0402-es méretkódú alkatrészekhez ugyanazt az elrendezést használtam, csupán méretbeli különbség van köztük.

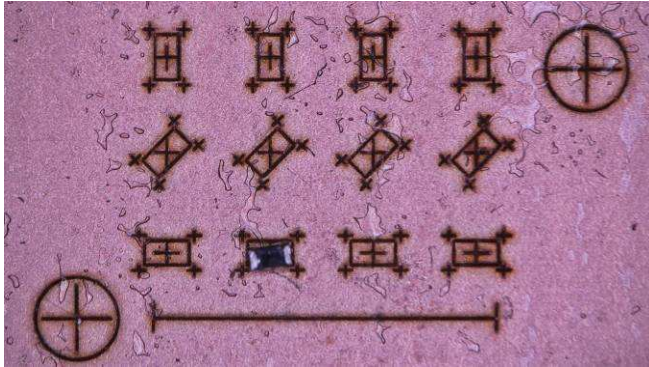


13. ábra Minta 0201 és 0402 méretű alkatrészekhez

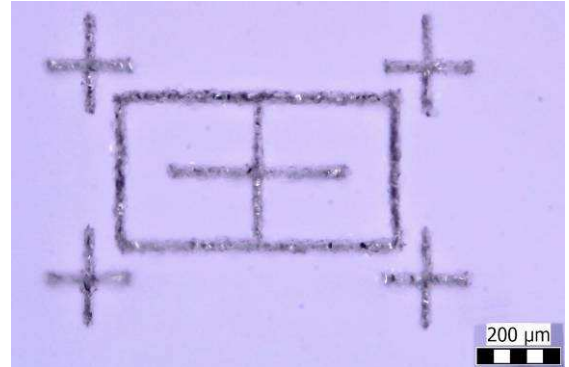
Kísérleteim során az alkatrészbeültető gép beültetési pontosságát egy üveg-etalon rajzolon végeztem el. Az iparban erre vékonyréteg technológiával kialakított rajzollal ellátott üveg lemezt használnak, mely biztosítja a nagy pontosságú rajzolatokat, pontos mechanikai méretekkkel rendelkezik, valóban sík és vetemedésmentes, hőre, páratartalomra érzéketlen és hosszú időn át is ezen tulajdonságokat tartósan megtartja. Az üvegből készült hordozón a mintázatot lézeres megmunkálással hoztam létre.

Az elkészült mintát lézerral gravíroztam a hordozóba. Először egy 1,6 mm-es FR4 üvegszálalás epoxi lemez 35 µm-es réz fólia rétegébe gravíroztam próba képpen. Ezt követően

egy 1,2 mm-es síküvegre készítettem el a mintázatot. Ez anyagi minősége miatt más lézer beállításokat igényelt. A legvékonyabb és legkontrasztosabb rajzolatot akkor sikerült elérni, ha nem a felszínére (1200 μm -re) fókuszáltam a lézert, hanem az üveg közepére, 600 μm -re. Így sikerült megvalósítani a 20 μm -es rajzolat vastagságot. Ennél kisebbre nem lehet fókuszálni az általam használt 355 nm hullámhosszúságú Nd:YAG lézert.



14. ábra Próba ültetés FR4-re



15. ábra Rajzolat üvegen

3.2. Alkatrész beültetés

Az alkatrészek beültetéséhez TWS Quadra Evo [17] automata beültetőgépet használtam. Két vákuumejektoros beültetőfejvel rendelkezik, és optika segítségével ellenőrzi a felvett alkatrész pozícióját. Erre azért van szükség, mert a szalagtár kialakítása miatt nincs garantálva, hogy az alkatrészeket mindig pontosan ugyanonnan és ugyanolyan elfordulási hibával veszi föl. Itt már a 0,1 mm-es pontatlanság már rengeteg. A gyártó a 0402-es méretkódú (1 mm \times 0,5 mm) [18] alkatrészt jelöli meg mint legkisebb alkatrészt, melynek a beültetésére a gép még alkalmas. Én egy ennél is kisebb alkatrész beültetésére használtam, a 0201-es méretkódúhoz (600 μm \times 300 μm), tehát ez elméletileg már meghaladja a gép képességeit.



16. ábra 0201-es ellenállás egy 20 forintson

A mintázat kialakításához 3 különböző forgatási pozíciót terveztem. 0°, 90° és 45°-os forgatásokat. A 0, 90, 180 és 270°-os elforgatásokat a gép jól kezeli, ráadásul ezekhez

tokozásonként tetszőleges x, y és forgatásbéli eltolás beállítható. A forgatási ofszetet lépésszámban kell megadni, hiszen a forgatásról is léptetőmotor gondoskodik. Csupán a könnyebb használhatóság kedvéért lehet a többi beállításhoz fokban megadott értéket beállítani. A gép tud 45°-os forgatást is (és $45^\circ+n\times 90^\circ$ -ot is, $n \in \mathbb{Z}$), de itt már nincs lehetőség korrekcióra. Ebből adódóan erre várható a legnagyobb pontatlanság.



17. ábra TWS Quadra Evo

Az elkészült mérőpanelhez el kell készíteni a programot (18. ábra), ami alapján a gép a beültetést végzi. Ehhez meg kell adni az alkatrészek nevét, típusát, forgatását és a beültetési pozíciót. A beültető program az alábbi információkat tartalmazza oszlopok szerint:

- Programsor sorszáma. Mindig növekvő sorrendben van, független a rendezés típusától.
- Alkatrész kódja, mely alapján a panelen be lehet azonosítani.
- Alkatrész neve, melyből általában következik annak értéke. Jelen esetben ez nem számít, ezért a mérete alapján neveztem el őket.
- Alkatrész tokozása, melyet a feeder táblában lehet megadni, itt már automatikusan rendelődik hozzá.
- Alkatrész forgatása.
- Alkatrész beültetéséhez használt pipetta sorszáma (1 vagy 2).
- Alkatrész beültetésének engedélyezése (Y vagy N).

-Diszpenzálás engedélyezése (Y vagy N).

-X koordináta.

-Y koordináta, azaz a beültetési pozíció.

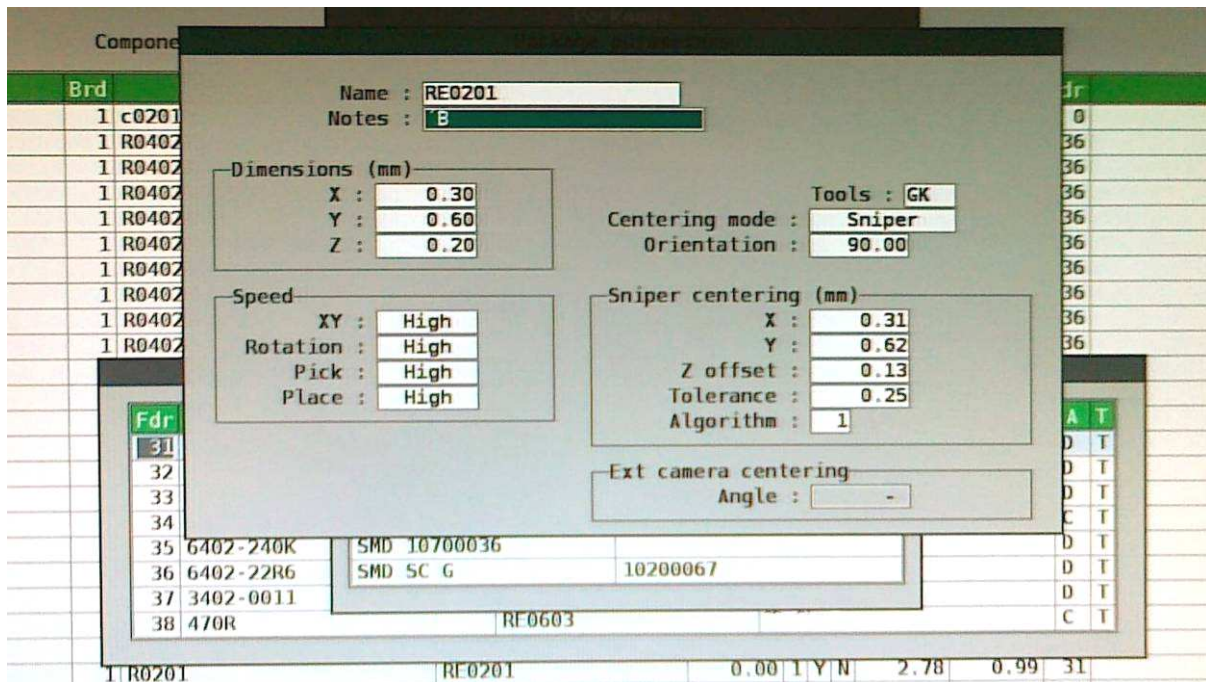
-Feeder (alkatrészadagoló) száma, ahol az alkatrész megtalálható. A neve alapján automatikusan rendelődik hozzá.

-Megjegyzés (opcionális).

ine	Code	Brd	Comp. Type	Package	Rot	N	H	D	X	Y	Fdr
1	C1	1	c0201	CACE0201	0.00	1	N	N	0.00	0.00	0
2	R1	1	R0402	RE0402	90.00	1	Y	N	0.16	11.79	136
3	R10	1	R0402	RE0402	0.00	1	Y	N	2.20	7.76	136
4	R11	1	R0402	RE0402	0.00	1	Y	N	4.19	7.81	136
5	R12	1	R0402	RE0402	0.00	1	Y	N	6.17	7.82	136
6	R2	1	R0402	RE0402	90.00	1	Y	N	2.15	11.81	136
7	R3	1	R0402	RE0402	90.00	1	Y	N	4.15	11.88	136
8	R4	1	R0402	RE0402	90.00	1	Y	N	6.15	11.92	136
9	R5	1	R0402	RE0402	45.00	1	Y	N	0.16	9.78	136
10	R6	1	R0402	RE0402	45.00	1	Y	N	2.16	9.79	136
11	R7	1	R0402	RE0402	45.00	1	Y	N	4.15	9.83	136
12	R8	1	R0402	RE0402	45.00	1	Y	N	6.14	9.86	136
13	R9	1	R0402	RE0402	0.00	1	Y	N	0.21	7.72	136
14	R13	1	R0201	RE0201	90.00	1	Y	N	1.26	3.79	31
15	R14	1	R0201	RE0201	90.00	1	Y	N	2.77	3.83	31
16	R15	1	R0201	RE0201	90.00	1	Y	N	4.24	3.84	31
17	R16	1	R0201	RE0201	90.00	1	Y	N	5.72	3.86	31
18	R17	1	R0201	RE0201	45.00	1	Y	N	1.25	2.44	31
19	R18	1	R0201	RE0201	45.00	1	Y	N	2.78	2.45	31
20	R19	1	R0201	RE0201	45.00	1	Y	N	4.26	2.45	31
21	R20	1	R0201	RE0201	45.00	1	Y	N	5.73	2.50	31
22	R21	1	R0201	RE0201	0.00	1	Y	N	1.27	0.97	31
23	R22	1	R0201	RE0201	0.00	1	Y	N	2.78	0.99	31
24	R23	1	R0201	RE0201	0.00	1	Y	N	4.28	1.02	31
25	R24	1	R0201	RE0201	0.00	1	Y	N	5.75	1.03	31

18. ábra A beültető program

Ezekon felül be kell tanítani neki a fiduciális jeleket. Az egyik origóként (board origin) szolgál, az összes koordinátát ehhez viszonyítja. A másik referencia pont, ebből számítja ki és veszi figyelembe a panel esetleges pontatlan behelyezéséből adódó kis elfordulási hibát. Miután az alkatrészek felkerültek a megfelelő tárukba és a panel vastagsága is beállításra került, már csak a beültetési sorrendet és pipetta használatot kell optimalizálni. Ez jelen program esetén meglehetősen egyszerű.



19. ábra A 0201-es ellenállás tokozás paramétereit

A tokozáshoz beállítható paraméterek, jelen esetben a 0201-es ellenállásé (19. ábra):

- X,y és z irányú méretei.
- Különböző mozgásokhoz alkalmazott sebesség szint.
- A beültetéshez használt pipetták betűkódja.
- Az alkatrész felvételt követő vizsgálat módja.
- Legutóbbi mért értékek (nem beállítható).
- Elfogadási tolerancia.
- Az alkatrész vizsgálatához választható külső kamera is, mely nagyobb pontosságot

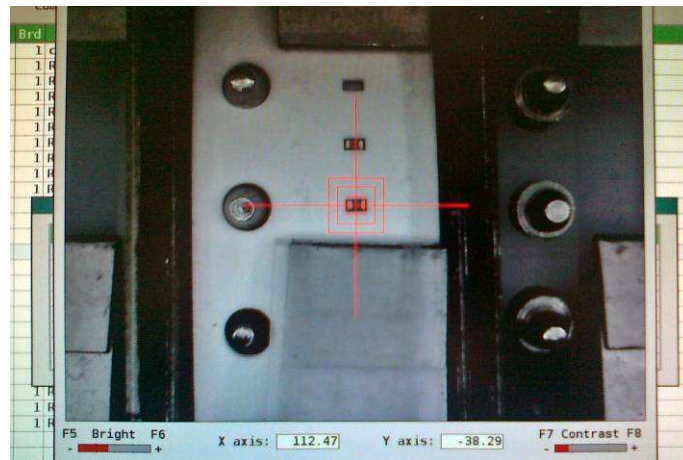
biztosít, ám lényegesen lassabb lesz tőle az ültetés. Ezt általában QFP 48-as vagy nagyobb QFP tokozású IC-kenél alkalmazzák.



20. ábra QFP48-as IC

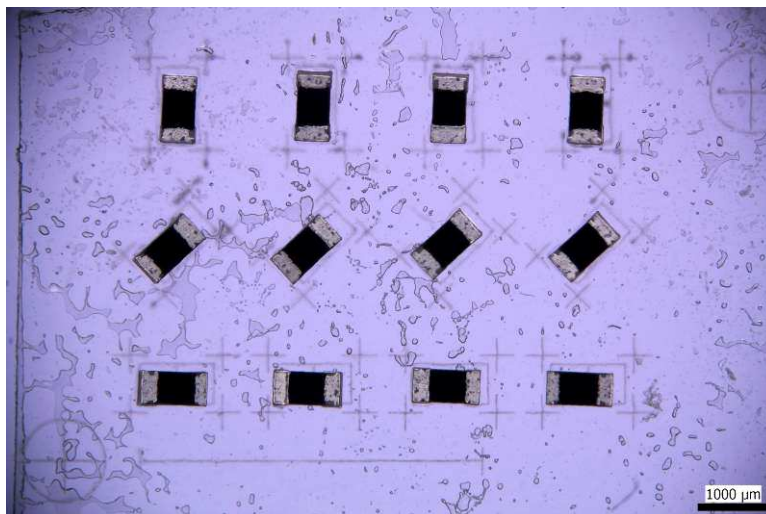
Ezen ablak alatt látható a tokozásokat tartalmazó táblázat (package table) egy része, alatta pedig a feedereket tartalmazó táblázat (feeder table), ahol további beállítások lehetségesek. A 21. ábra-n látható egy 8 mm-es szalagtár felfűzött állapotban. A bal oldalán a

perforációval melyet a lépető fogak töltenek ki. A kép alján pedig a védőfólia látható lefejtett állapotban, így a két kondenzátor teljesen szabadon van, készen a felvételre.



21. ábra 0201-es kondenzátor felvételi pozíció beállítása

A beültetés előtt a korábban tárgyalt módon fel kéne pasztázni a panelt, ám mivel itt nem cél a villamos kontaktus létrehozása (ráadásul az üveghez nem is forradna hozzá), így paszta helyett kétoldalú, átlátszó ragasztószalagot használtam, mert ez nem takarja ki a méréshez használt jeleket. Jelen esetben a stencilnyomtatáshoz hasonlóan természetesen a forrasztási fázis is kimarad a folyamatból.



22. ábra A ragasztó okozta foltok

A 22. ábra-n látható sok kis folt nem más, mint az üveglap és a ragasztószalag közé szorult levegő. A felragasztásnál természetesen ezt minimalizáltam.

3.3. Mérések

Az első néhány mérést kalibrálás céljával végeztem. A mintára terveztem egy 5 mm hosszú szakaszt is, amit a lézerezés után egy Olympus SZX9 [20] mikroszkóppal mértem meg mintegy kalibrálva a lézer rajzolat pontosságát.

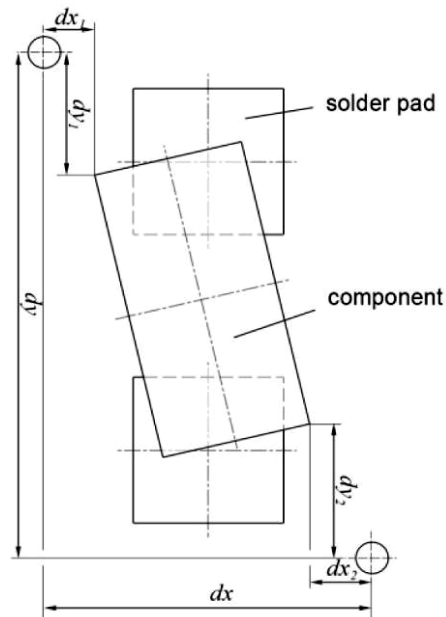
A mért értékeket befolyásolta, hogy a mikroszkóp hova volt fókuszálva, hiszen ezzel változik a tárgytávolság, így nagyobb vagy kisebb



lesz a kép miközben a program egy pixelhez ugyanazt a hossz értéket rendel. Ezzel $\pm 15 \mu\text{m}$ -rel lehetett a mért értéket változtatni. Ez az egyik tényező, ami a mérés bizonytalanságát jelenti. Az 5 mm-hez képest minden mérés 0,5%-on belül volt, ami egy nagyságrendbe esik a lézernyaláb $20 \mu\text{m}$ -es foltátmérőjével.

23. ábra Az Olympus SZX mikroszkópcsalád egyik tagja

A beültetési pontosságot az alábbiak szerint számítottam:



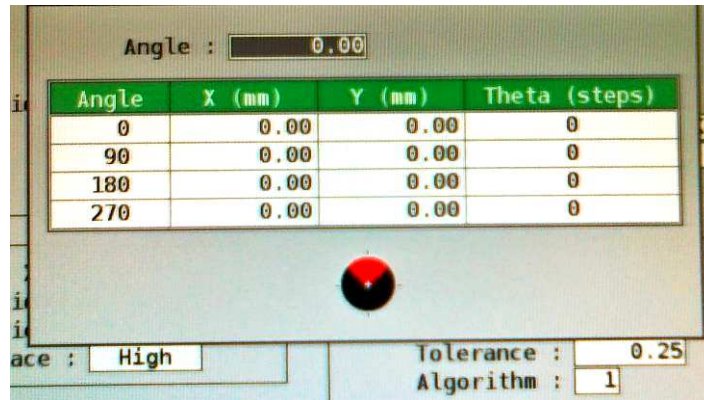
A szögeltérés számításánál fontos megjegyezni, hogy az első tagban szereplő arctan argumentumában minden esetben az alkatrész oldalarányának kell szerepelnie.

$$x_{\text{ofszet}} = \frac{dx_1 - dx_2}{2}$$

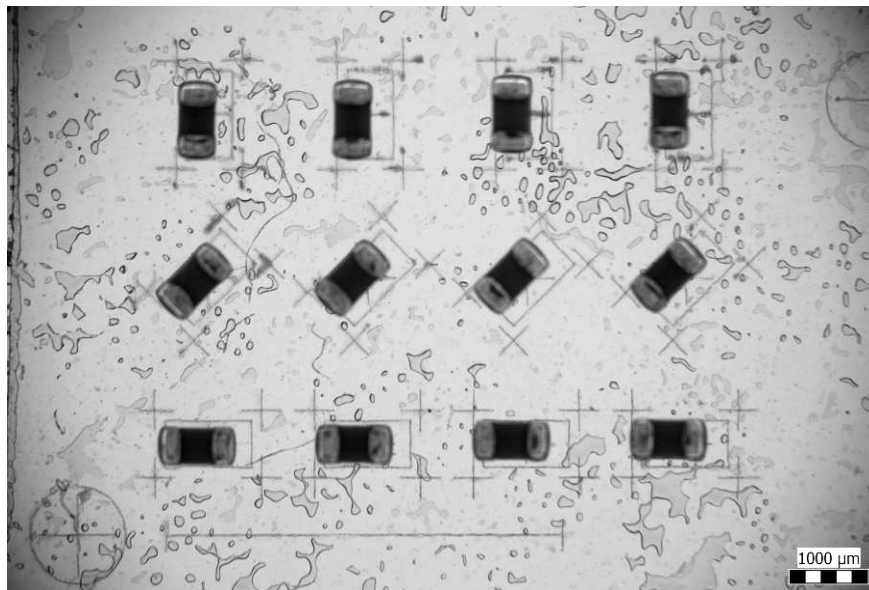
$$y_{\text{ofszet}} = \frac{dy_1 - dy_2}{2}$$

$$\theta_{\text{ofszet}} = \arctan\left(\frac{dx}{dy}\right) - \arctan\left(\frac{dx - dx_1 - dx_2}{dy - dy_1 - dy_2}\right)$$

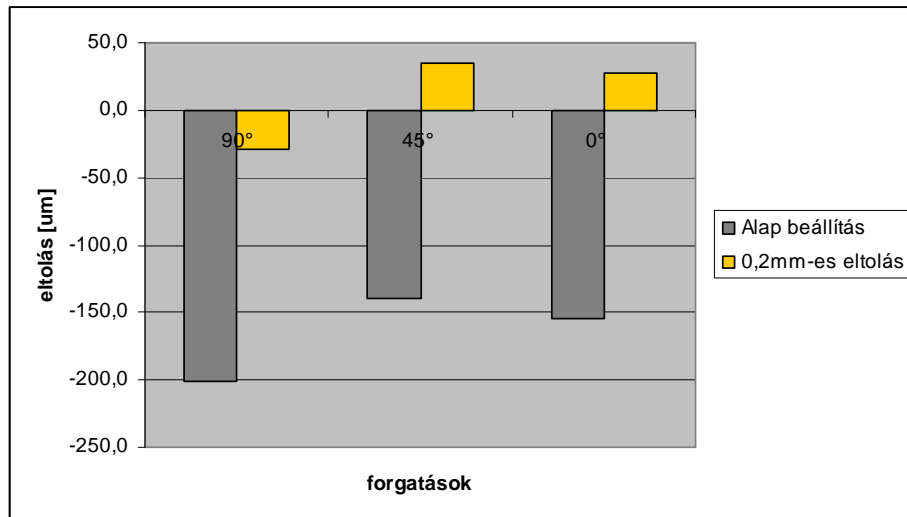
Az első 0402-es kondenzátorok beültetése után (25. ábra) már szabad szemmel is egyértelműen megállapítható volt, hogy viszonylag nagy x irányú ofszetje van ennek a tokozásnak. A méréseket követően 0,2 mm-es eltolást állítottam be. A gépen 10 µm-es pontossággal lehet beállítani az x és y irányú eltolást. A forgatási hibát lépésszámban lehet megadni. A gépkönyv szerint egy lépés 0,09°-nak felel meg. [17]



24. ábra Ofszet beállítások



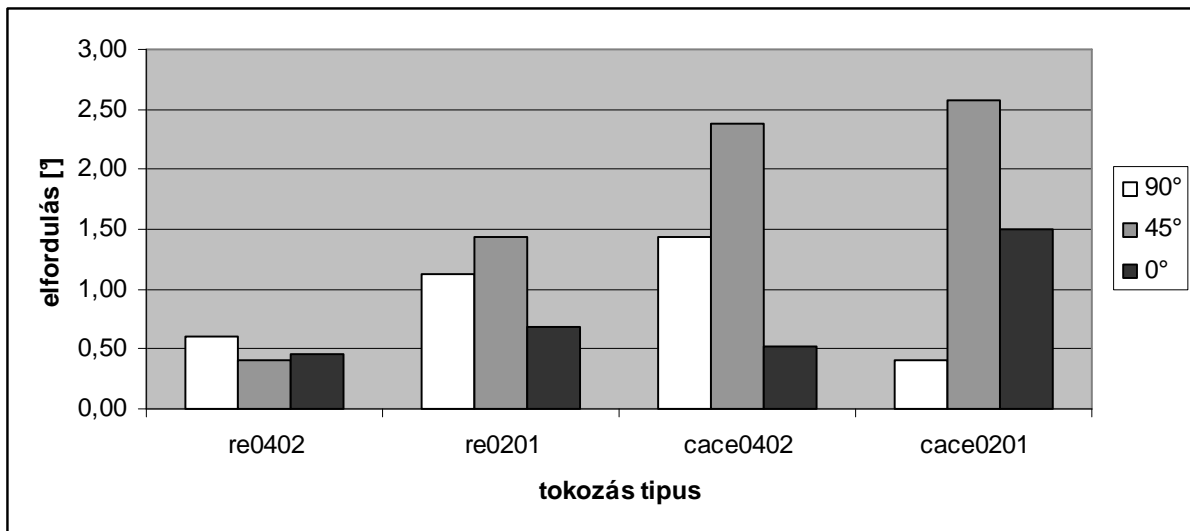
25. ábra X irányú eltolási hiba 0402-es kondenzátornál



26. ábra X irányú eltérés 0402-es kondenzátornál

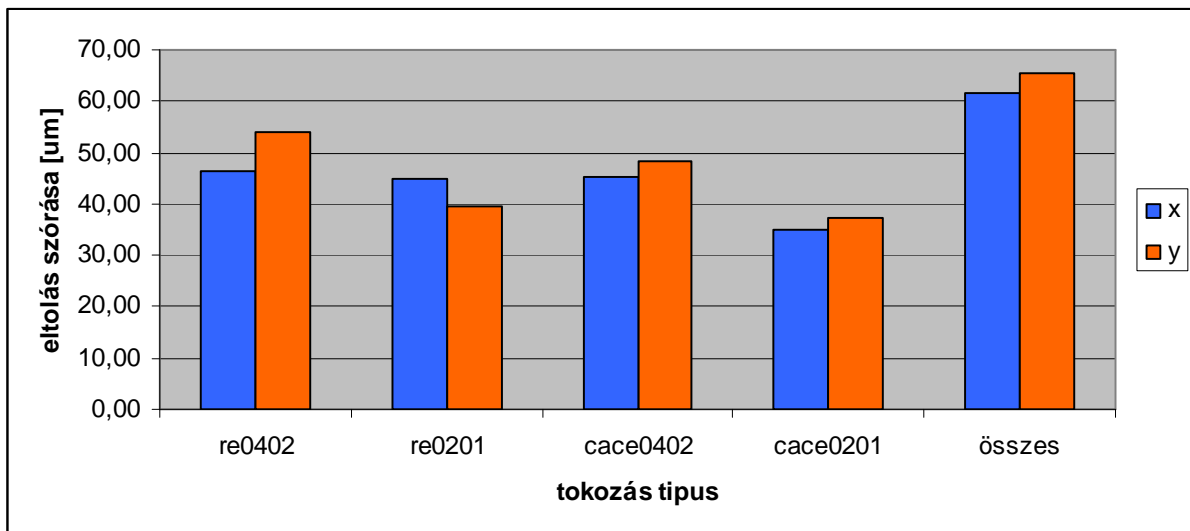
Látható, hogy az eltolást követően (26. ábra) átlagosan 170 μm-rel javult a pontosság a beállított 200 μm helyett. Bár a 45°-os forgatáshoz nem lehet eltolást beállítani, a 0 és 90°-hoz beírt ofszet hatására ennél is sokkal pontosabb lett a pozíció. Néhány iterációval elérhető ± 20 μm-es és $\pm 0,5^\circ$ -os pontosság, ám ezt újra kell kalibrálni, ha a gépet akár csak pár °C-os hőmérséklet változás éri, amit a saját maga által keltett hő is előidézhethet.

A beültetési pontosságra nagy befolyással van, ha a valósnál kisebb hordozó (PCB - printed circuit board) vastagság van beállítva a beültetés során, mert így az alkatrészt nem ráhelyezi a panelre, hanem gyakorlatilag ráejti. Ettől jelentősen megnő a pozíció hiba. Hasonló a helyzet, ha rossz (kisebb) alkatrész magasság van beállítva. Éles gyártás esetén érdemes lehet kísérleteket végezni ilyen kisméretű alkatrészeknél, mert a forraszpaszta vastagsága is összemérhető már az alkatrészméretekkkel, annak szórása, eltérései illetve a panel vastagsághoz történő figyelembe nem vétele is okozhat hasonló okból bekövetkező beültetési hibákat.



27. ábra Forgatások szórása

Az elfordulások szórása a gépkönyv szerint is várt eredményt hozta (27. ábra). A legkevésbé pontosan a 45°-os forgatásút ültette, ennél jobb volt a 90°-os és még jobb az, amelyiket nem forgatta el. Az ábrán látható, hogy a szórás mértéke nem az alkatrész nagyságától, hanem a típusától függ. Az ellenállásokat a gép pontosabban tudja elforgatni. A forgatási hiba a mérések 94,3%-ban az előírt 5°-os tűréshatáron belül volt, ami a gép képességeit tekintve jónak mondható.



28. ábra X, Y irányú eltolások szórása

A beültetési pontosságot illetően a 0201-es alkatrészek valamennyivel jobbak (28. ábra), amire szükség is van, hiszen az elfogadási határt az alkatrész oldalhosszához viszonyítva adják meg. Ez általában a rövidebbik oldal 25%-a. Mivel a 0201-es tokozás 40%-kal kisebb, mint a 0402-es így az elfogadási határ is ennyivel szűkebb lesz.

4. Összefoglalás

A gép tudta ültetni a 0201-es alkatrészeket is. A beültetés pontossága valamivel jobb is volt, mint a 0402-es méretkódú alkatrészek esetén. Ennek ellenére a legtöbb alkatrész beültetési pontossága az elfogadási határ körül mozgott. A forgatási hibákban számottevő különbséget nem tapasztaltam az általam mért tokozások között. Bár a mérésnek nem volt része, fontos megjegyezni, hogy míg a 0201-es ellenállásokat viszonylag jól kezelte a gép, addig a hasonló, ám kissé magasabb (nagyobb z méretű) kondenzátort többszöri beállítások és finomhangolás után sem preferálta. Átlagosan csak minden 3. alkatrészt ültetett be, a többit valamilyen hibára hivatkozva eldobta. Általában a nem megfelelő méret miatt tette.

A mintázat készítéshez választhattam volna finomabb rajzolatot eredményező technológiát, de ez lényegesen költségesebb lett volna. A kísérletem legfőbb eredménye, hogy viszonylag egyszerű eszközök és könnyen hozzáférhető alapanyagok használatával értékelhető eredményeket lehet produkálni ebben a mérettartományban. Így ez ajánlható gépképesség-vizsgálatra szerényebb anyagi lehetőségekkel rendelkező cégek számára is. Gyorsasága és mintázat egyszerűsége folytán kis kieséssel lehet megmérni egy beültető berendezés pontosságát, így akár a szokásos karbantartások után, bármilyen hirtelen felmerülő probléma esetén és az igen költséges kalibrációk közti időszakokban is. A módszert jól lehetne használni a gépek beültetési pontossága időbeli lefutásának követésére is. Ezen felül az is említésre méltó, hogy sikerült a gépet kissé a saját határain túl, értékelhető munkára bírni.

A későbbiekben érdemes lehet megvizsgálni, hogy néhány óra elteltével milyen mértékben kell változtatni az ofszet beállításokat az elérhető pontosság megtartása érdekében, azaz mennyire tolódik el a pontosság az idő múlásával vagy akár a hőmérséklet változásával.

Irodalomjegyzék

- [1] A lézer fizikai tulajdonságai Takács János: Korszerű technológiák a felületi tulajdonságok alakításában; Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2004.
- [2] Bitay Enikő: Lézeres felületkezelés és modellezés; Műszaki Tudományos Füzetek, Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2007.
- [3] Lézergravírozás
<https://hu.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9zergrav%C3%ADroz%C3%A1s>
- [4] Bubblegram, 3D lézergravírozás
<https://en.wikipedia.org/wiki/Bubblegram>
- [5] Rudolf Strauss: „SMT Soldering Handbook – Surface Mount Technology”, *Newnes kiadó, 2nd edition*, 1998, ISBN: 0 7506 35894
- [6] 0402 chip size capacitor
<http://www.uchidg.com/china-surge-protection-tdk-analogue-varistor-smd-0402-for-esd-protection-vde-2036354.html>
- [7] Dataweek Electronics & Communitations Technology: „Advantages of vapour phase reflow for lead-free soldering”, 2008. oct. 1.
<http://dataweek.co.za/news.aspx?pknewsid=30546>
- [8] SAC 305 paste
<http://www.chemtools.com.au/product/electrical-and-electronics/solder-pastes-and-fluxes/sac305-lead-free-solder-paste/>
- [9] David Suihkonen: „Vapor phase for lead-free reflow”; *Global SMT & Packaging*, 2007. szeptember
- [10] Pandher, R.S., Lewis, B.G., Vangaveti, R., Singh, B.: „Drop Shock Reliability of Lead-Free Alloys - Effect of Micro-Additives”; *57th Electronic Components and Technology Conference*, 2007.június.1.; ISBN: 1-4244-0985-3

- [11] M. Ayob, G. Kendall: Machine classification, 2008 – Elsevier
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221707003505>
- [12] Felületszerelési technológia (*surface-mount technology*, SMT)
https://hu.wikipedia.org/wiki/Fel%C3%BCletszerel%C3%A9si_technol%C3%B3gia
- [13] Dr. Ripka Gábor: Gőzfázisú újraömllesztés forrasztóberendezés, Elektronet 2010.
<http://elektro-net.hu/cikk-archivum/531-gozfazisu-ujraomleszteses-forrasztobereendezes>
- [14] BME ETT TFM mérési útmutató
http://www.ett.bme.hu/upload/TFM_silabuszok.pdf
- [15] Fritsch SMT pick and place machine
<http://www.directindustry.com/prod/fritsch/product-13801-363175.html>
- [16] Tombstoning *Dataweek: 30 July 2003*
<http://www.dataweek.co.za/news.aspx?pklnnewsid=11343>
- [17] Tws Quadra Evo beültetőgép
<http://www.tws-automation.com/Default.aspx>
- [18] SMD resistors
<http://www.esr.info/pdf/products/SMDC.pdf>
- [19] Surface Mount Placement Equipment Characterization IPC-9850
<http://www.ipc.org/TOC/IPC-9850.pdf>
- [20] Olympus SZX2 series
http://www.olympusamerica.com/files/seg_bio/SZX16SZX10%20brochure.pdf
- [21] Restriction of Hazardous Substances Directive, 2002/95/EC