

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Elektronikai Technológia Tanszék

Elektronikai gyártás és minőségbiztosítás

Segédlet

Krammer Olivér

BUDAPEST 2020

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés			
2.	2. Az elektronikai gyártás ellenőrző berendezései		
	2.1. Auto	matizált optikai ellenőrzés3	
	2.1.1.	Gyártási folyamatok ellenőrzése3	
	2.1.2.	Optikai ellenőrzés elve4	
	2.1.3.	Színtérképes ellenőrzés6	
	2.1.4.	AOI kamerarendszer jellemzői9	
	2.1.5.	Üvegszálas optikai mikroszkóp 11	
2.2. Röntgenes ellenőrzés12			
	2.2.1.	Transzmisszió röntgengépek 12	
	2.2.2.	BGA forrasztások ellenőrzése röntgensugaras ellenőrzéssel	
	2.2.3.	3D CT vizsgálat19	

1. Bevezetés

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

2. Az elektronikai gyártás ellenőrző berendezései

2.1. Automatizált optikai ellenőrzés

2.1.1. Gyártási folyamatok ellenőrzése

Az elektronikai gyártási (és egyéb gyártási is általában) jellemző, hogy minden alaplépés után ellenőrzéseket iktatnak be, annak érdekében, hogy a gyártási lépések után keletkező hibákat mihamarabb kiszűrjék. Az ellenőrzés fontosságának szemléltetésére találták ki az USA-ban a 10-es szabályt; ha pl. az első lépés után kiszűrjük a hibát, akkor annak költsége (kiesés) legyen pl. 1 cent. A következő lépés után 10 cent, majd 100 cent és így tovább. Az elektronikai gyártásnál, ha pl. a stencilnyomtatás után kiszűrjük a hibát, akkor az NyHL lemez ára (ez akár 30%-a is lehet a termék önköltségének) és a felvitt forraszpaszta ára (marginális) a hozamkiesés. Ha az alkatrészbeültetés után vesszük észre a hibát, akkor a beültetett alkatrészek költségei is hozamkiesést eredményeznek (drága, pl. BGA alkatrészeknél ez kritikus); a forrasztás utáni kiesésnél a forrasztókemence energiája jelenik meg plusz költségként. Arról már beszéltünk, hogy a forrasztási hibák ~50%-a stencilnyomtatásra vezethető vissza, ezért is fontos, hogy már a legelső technológiai lépés után is ellenőrizzünk (1. ábra).



1. ábra. Sematikus kép az elektronikai gyártás lépései során keletkező hibák arányára, és a gyártási hibákból adódó hozamkiesésre

A legkritikusabb azonban általában az, ha adott hiba már csak a vevőhöz kiszállítva kerül azonosításra. Ekkor már nem csak a termék + szállítás költsége a hozamkiesés, hanem közép-hosszútávon az adott cég jó hírneve is (gondoljunk pl. a gépjármű visszahívásokra pl. autoelektronikai hibák miatt). Ezért a nagymegbízhatóságú elektronikáknál különösen, de egyéb alkalmazásoknál is egyre inkább terjed az úgynevezett "zero-defect manufacturing" elv, ami nem azt jelenti, hogy 0 hibával gyártunk, hanem azt, hogy hibás termék nem kerülhet ki a megrendelőhöz. Ennek támogatására, az elektronikai gyártás minden egyes lépése után automatikus technikákkal 100%-os ellenőrzéseket valósítanak meg. Forraszpaszta-felvitel után SPI-t (Solder Paste Inspection) alkalmaznak (erről beszéltünk a stencilnyomtatós tételnél), míg alkatrész-beültetés és forrasztás után AOI-t (automatikus optikai ellenőrző); kezd ugyanakkor terjedni az ún. SJI is (Solder Joint Inspection), ami a forrasztott kötések 3D ellenőrzését valósítja meg az SPI-hoz hasonló mérési elvvel (strukturált fehérfényes technika – "rácsvetítés").

2.1.2. Optikai ellenőrzés elve

Az optikai ellenőrzések során a vizsgált területről felvételeket készítünk. Ha a képet képpontokra bontjuk, ez az x és y koordináták irányában tett mintavételezésnek felel meg. A képet reprezentáló pontokat egy mátrix elemeinek tekinthetjük, és egy **c** skalárt vagy vektort rendelünk minden egyes képponthoz. Ha a c csak vagy 0 vagy 1 lehet, akkor a kép bináris, ha értéke 0 és tipikusan 255 közötti, akkor monokromatikus. Ha c vektor, akkor a kép színinformációt is hordoz. Az automatikus optikai ellenőrzés alapja a vizsgált termékről készült felvételek elemzése képfeldolgozási algoritmusokkal. Ennél rendszerint a legelső lépés a vizsgálandó alakzatok (feature) szeparálása a kép többi részétől (background – háttér), általában ún. binarizálással. A binarizálás lényege, hogy a kamera által rögzített szürkeárnyalatos képet (az egyes képpontok csak a szürke árnyalatait (50-et?? :D) vehetik fel – a köznyelvben ezt hívjuk fekete-fehér fotónak) egy küszöb fényességi érték alapján átalakítjuk fekete-fehérré, binárissá (adott képpont vagy fehér, vagy fekete). A szürkeárnyalatos képek árnyalatait általában 8 (256 árnyalat) vagy 16 biten tároljuk (65536 árnyalat), míg a feketefehér kép esetében ez 1 bit. Az átalakítás után futtatjuk a különböző képfeldolgozási algoritmusokat, pl. élkeresés (pl. alkatrészek élei -> pozícióhiba),

4

szövegfelismerés (OCR – pl. alkatrészek névértékei, egyéb azonosítók) stb. A 2., sematikus ábrán jól megfigyelhetők egy jó minőségű forrasztott kötés és egy pszeudo-sírkő (a pszeudo /ál/ itt azt jelenti, hogy nem emelkedik fel az alkatrész, de már /jó kötésnek álcázott/ nyitott kötés van) hibajelenség képei közötti különbségek. Az ábra úgy készült, hogy a binarizálási küszöbnek a 128-as szürkeségi értéket választottuk, 8 bites (256 árnyalat) mélységű képet feltételezve.



2. ábra. Jó minőségű kötés és pszeudo-sírkő hibajelenség sematikus ábrája.

A képfeldolgozási algoritmusok-, és az ellenőrzés hatékonyságának javítása érdekében az automatikus optikai ellenőrző berendezések több kamerát (ortogonális és szög alatti) és több fajta megvilágítás rendszert is tartalmaznak együttesen. Egy adott alakzat vizsgálatához pedig több kép is készül a különböző kamerák és megvilágítási módok alkalmazásával. A képek elkészüléséhez alkalmazott kamerák, megvilágítások és képfeldolgozási algoritmusok szekvenciáját vizsgálómakrónak hívjuk. A 3. ábra mutatja az egyes megvilágítási módok sematikus ábráját. Megfigyelhető, hogy a "szög alatti diffúz megvilágítás" alkalmas pl. alkatrészek meglétének az ellenőrzésére; az "indirekt diffúz megvilágítás" pl. tantál elektrolit kondenzátorok polaritásának vizsgálatára, míg a "közvetlen megvilágítás" névértékek, azonosítók leolvasására.



3. ábra. Automatikus optikai ellenőrző berendezésekben alkalmazott megvilágítási módok (a megvilágítás többnyire piros színnel történik, mert a CCD-k érzékenyebbek a látható fény nagyobb hullámhosszú tartományán)

Az automatikus vizsgálatnál három hibafajtát különböztetünk meg. A **valódi hiba** (real failure) az AOI által is detektált, és a gyártó minőségügyi leírása szerint is hibának tekintett jelenség. Az AOI feladata ezek 100%-os detektálása. Az **átcsúszott hiba** (slipped through failure) az AOI által nem detektált, de a gyártó minőségügyi leírása szerint hibának tekintett jelenség. Rendeltetésszerű használat és normál működés esetén az AOI által elkövethető legsúlyosabb hiba. A vizsgálómakró optimalizálása kritikus ezen hibák kiszűrésére. Az átcsúszásokat esetleg későbbi vizsgálatok (ICT - in circuit test, funkcionális teszt – köv. tétel –, manuális szemrevételezés) mutatják ki. A **pszeudo-hiba** (pseudo failure) az AOI által detektált, de a gyártó minőségügyi leírása szerint hibának nem tekintett jelenség. Az AOI termelékenységét és a gyártósor kapacitását csökkentheti.

2.1.3. Színtérképes ellenőrzés

A tradicionális, 2D AOI-k mellett, a forrasztott kötések ellenőrzéséhez ún. színtérképes ellenőrzést is alkalmaznak, bár ez utóbbit lassan kiszorítják az SJI-k (solder joint inspection). A színtérképes ellenőrzés előnye a 2D AOI-khoz képest az, hogy a vizsgált terület topológiájáról (pl. forrasztott kötés alakjáról) is képesek információt szolgáltatni. Működésének alapja az, hogy három, különböző színű megvilágítást (R – red, G – green, B - blue) alkalmazunk egyszerre úgy, hogy a megvilágítások beesési szögei is különbözők. A piros fény ortogonális irányból (a felület síkjára merőleges), a zöld fény 45°-os, a kék fény pedig 22°-os szögből érkezik (4. ábra). A vizsgált területen, adott felületegység leginkább olyan színű lesz felülnézetből, mint a felület normálisával egyező irányból érkező fény színe.





A színtérképes vizsgálati módszernél is okoz problémát az ólommentes forrasztás. Az ólommentes forraszok felszíne érdesebb, mint az ólomtartalmúé; az ólommentes forrasztás bevezetése egyrészt az AOI-k vizsgálómakróinak optimalizálását is megkövetelte, másrészt a színtérképes ellenőrzésnél egy ún. "De-White" algoritmus megalkotását is igényelte. Az 5. ábra szemlélteti az érdesebb felszínből adódó problémát a színtérképes vizsgálati módszernél. Az ólomtartalmú forrasz felszíne egyenletes(ebb), a beérkező fényt kevésbé szórja, amely azt eredményezi, hogy az elkészült képen a különböző normálvektorú felületek jól elkülönülnek egymástól. Az 5. ábra a) részén látható ólomtartalmú forrasz esetére az egyes színek (RGB) intenzitása a felület normálvektorának függvényében; és látszik, hogy a különböző színek jól elkülönülnek egymástól. Ezzel szemben az ólommentes forrasz érdes felszíne jobban szórja a fényt, a különböző színek intenzitásai sokkal jobban átlapolódnak (5. ábra b.), ami színben kevésbé alacsonyabb színtelítettséggel rendelkező kontrasztos. és pasztellképet eredményez (5. ábra d.)



5. ábra. Ólomtartalmú és ólommentes forrasz színtérképe

A színeket a színárnyalattal (Hue – domináns hullámhossz, pl. zöld ~510 nm), a fényerővel (Luminance) és a telítettséggel (Saturation) jellemezni tudjuk. "A telítettség vagy színtartalom a domináns és a nem domináns hullámhosszok viszonylagos energiaeloszlásától függ, fizikai elnevezése kibocsátási tisztaság. A telítettség minősíthető a fehértartalom ellenében. A tökéletes fehér színképében valamennyi hullámhossz jelen van, és energiájuk azonos, egyik sem domináns. A tökéletesen telített szín monokromatikus, egy hullámhosszú fénnyel rendelkezik – http://www.epab.bme.hu/oktatas/Jegyzetek/visualization/13 Cie.pdf" A digitális képi világban elterjedt RGB színcsatornás reprezentálásban pedig amennyiben egy szín telített, a három csatorna értékei jobban eltérnek egymástól, mint amennyiben kevésbé telített (a szürke árnyalati úgy adódnak, hogy a három csatorna értékei azonosak). Egy adott képpont színcsatorna értékeit felbonthatjuk két részre (vegyünk pl. egy pasztellkéket – RGB = 175, 210, 230;

- a legalacsonyabb csatornaérték (175 nevezzük el szürketartalomnak) a képpont fényességét meghatározza,
- az e fölötti részek tartalmazzák a színinformációt (RGB = 0;35;55); minél közelebb van egymáshoz a három csatornaérték, annál pasztellesebb a szín.

A De-White algoritmus lényege és célja színinformáció kinyerése és felerősítése. Az algoritmus lépései a fenti pasztellkék színre (az előadás ppt-ben pasztell piros szín szerepel – vessétek össze a kettő eredményét) alább szerepelnek. Tartalmazza \mathbf{c}_i vektor egy adott (az *i*-ik) képpont színét, színcsatornáinak értékeit. A példában $\mathbf{c} = (175, 210, 230)$, és lent, a második oszlop tartalmazza az egyes lépések eredményeit.

1) szürketartalom meghatározása

 $gr = \min(\mathbf{c})$ gr = 175

2) szürketartalom kivonása a csatornaértékekből egyenként, színinformáció meghatározása; ez már szaturált szín, csak túl sötét

c' = c - gr c' = (0, 35, 55)

3) skálatényező meghatározása a csatornaértékek felskálázásához, a színinformáció erősítéséhez; 8 bites mélységű ábrázolás mellett egy csatorna értéke maximum 255 lehet, ezért:

$$S = \frac{255}{\max c'}$$
 $S = \frac{255}{55} = 4,64$

4) a skálázás alkalmazása az egyes csatornaértékekre

 $\mathbf{c}'' = \mathbf{c}' \cdot S$ $\mathbf{c}'' = (0, 162, 255)$

Ezt a szekvenciát ismételve minden egyes képpontra, a kép színkontrasztja javítható (6. ábra). Mint minden kontrasztnövelés, ez az eljárás is növeli a képzajt, amelyet esetleg zajszűrő eljárással csökkenthető.



6. ábra. De-White algoritmus eredménye

2.1.4. AOI kamerarendszer jellemzői

Az AOI kamerarendszerek legfontosabb jellemzője a felbontása, mivel ez határozza meg, hogy mennyire kis alakzatok vizsgálhatók. Ipari szabványok szerint ahhoz, hogy egy alakzat vizsgálható legyen automatikus optikai ellenőrzéssel, a legkisebb geometriai részeinek (pl. egy alkatrész rövidebbik oldala) legalább 10 képpontból kell állnia (7. ábra).



7. ábra. 01005 méretkódú (400x200 μm), felületszerelt ellenállás forrasztott kötésének sematikus képe különböző felbontások mellett (a bal oldali képről nem sok mindent lehet megállapítani a forrasztott kötésre vonatkozóan ©)

A kamerarendszerek felbontása függ a képérzékelő szenzoron található elemi képpontok effektív számától (*n* Mpixel). A köznyelvben sokszor ezt használják felbontásként, pl. telefon kamerájának felbontása pl. 20 MPixel, de ez pontatlan, mert az, hogy elkészült képen mennyire kisméretű alakzatokat tudunk megkülönböztetni egymástól, függ a kamerára szerelt objektív feloldóképességétől és gyújtótávolságától (látószögétől – nagyításától) is. Az objektív látószöge és annak távolsága a vizsgált mintától együttesen meghatározza a látóteret (FOV – field of view).

Az AOI kamerarendszereinél a jellemző képpontok száma (1-5 MPixel). Ez elsőre kevésnek tűnhet pl. a telefonokban is található n·10 MPixel-es képérzékelőkhöz képest, de ne felejtsük el, hogy itt ipari kamerákról van szó, egész más minőségi és megbízhatósági követelményekkel. Továbbá, fix gyújtótávolságú (állandó nagyítású, nem zoom) objektíveket alkalmaznak, de az megválasztható, hogy mennyire nagylátószögű/tele objektívet tartalmaznak. Minél kisebb látószögű, látóterű objektívet választunk, annál kisebb alakzatok vizsgálhatók, de annál lassabb lesz az ellenőrzés is, pl. 225 mm²-es látótér mellett 4-6 cm²/s ellenőrzési sebesség (szerelt áramkörök területe ~500 cm²), és 30 µm-es felbontás (8. ábra). Ezek miatt volt jellemző még pár éve is, hogy a mikrohuzalkötéseket nem tudták ellenőrizni automatikus optikai ellenőrzésekkel; gondoljunk bele, hogy pl. egy Au termoszonikus golyós kötés átmérője ~35–40 μm. Ehhez 3–4 μm-es kamerarendszer felbontásra lenne szükség, aminek vizsgálatához kis látóterületű objektívre van szükség, nagyon lassúvá téve az ellenőrzést. Az újabb, kb. 5 MPixeles képérzékelőket a tartalmazó AOI-k segítségével manapság ez már kezd megoldódni.



Sebesség: 4 - 6 cm²/s feloldóképesség: ~30 μm





1,3 Mpixel / FoV: kb. 616 mm² Szkennelési sebesség: 10 - 16 cm²/s feloldóképesség: ~25 μm

5.2 Mpixel / FoV.: 2.268 mm² Sebesség: 25 - 40 cm²/s feloldóképesség: ~20 μm

8. ábra. AOI-k felbontása és ellenőrzési sebessége különböző képérzékelők, különböző látóterű kamerarendszerek mellett

Tehát az AOI kamerarendszerek legfontosabb jellemzői a képérzékelő képpontjainak számossága és a látótér, valamint e kettőből eredményül kapott felbontás, ami egy képpont által lefedett terület élhosszúsága (pl. 20 μm).

2.1.5. Üvegszálas optikai mikroszkóp

Az üvegszálas optikai mikroszkópot BGA forraszgolyók vizsgálatához fejlesztették azzal a céllal, hogy a kis- és középvállalkozásoknak ne kelljen röntgenes ellenőrző berendezést vásárolniuk (50–80 MFt.). A BGA tokozású alkatrészt az egyik oldaláról megvilágítják, a másik oldalról pedig egy képérzékelőhöz csatlakoztatott,, üvegszálcsokrot" vezetnek be (9. ábra).



9. ábra. Üvegszálas optikai mikroszkóp

Roncsolásmentes vizsgálatot valósít meg, azonban a szolgáltatott információ (különösen a belső golyókról) gyakran kevés, egyrészt a megvilágítás hiányossága, másrészt az alacsony felbontás miatt. A képérzékelő 300x200 pixelt tartalmaz, ami manapság már nagyon kevés. Önmagában azonban az egy mérnöki csoda véleményem szerint, hogy a képérzékelő minden egyes képpontjához egy üvegszál vezet, tehát a kb. 1 mm átmérőjű "üvegszálcsokor" 60 000 üvegszálat tartalmaz!

2.2. Röntgenes ellenőrzés

2.2.1. Transzmisszió röntgengépek

Az elektronikai gyártásban alkalmazott röntgenes ellenőrző berendezéseket 3 típusba soroljuk; 2D-s transzmissziós röntgengépek, és 3D-s laminográf, valamint CT (computed tomography) röntgengépek.

A 2D-s transzmissziós röntgenberendezések alapvető alkatrészei a röntgencső, a detektor, és a minta tartásáért, esetleg mozgatásáért felelős tárgyasztal (10. ábra).



10. ábra. 2D transzmisszió röntgenberendezés sematikus felépítése

A röntgensugaras vizsgálat az anyagok sugárzás-elnyelési tulajdonságainak eltérésén alapszik. A sugárzás elnyelése az alkotóelemek atommag-méretével arányos. A nagyobb rendszámú elemek jobban, míg a kisebb rendszámúak kevésbé nyelik el a sugárzást, s így – ezen az "árnyékhatáson" alapuló – elnyelődési mintázat alapján a vizsgált minta belső felépítése felderíthető. Mivel a röntgenfelvételen egy képpont nem csak a felületről közöl információt, hanem a vizsgált minta teljes keresztmetszetéről (szummációs képalkotás), ezért háromdimenziós leképezés illúzióját kelti.

A röntgencsöveknél a röntgensugárzást egy elektronágyú céltárgya bocsátja ki. Az elektronok vákuumban elhelyezett izzószálból (izzókatódból) lépnek ki. Az izzószál és a gyűrűkialakítású anód közé kapcsolt nagyfeszültség az elektronokat felgyorsítja majd ezek az anód mögé helyezett céltárgyba becsapódnak. A céltárgyba csapódó elektronok mozgási energiájának nagy része hővé alakul, a fennmaradó részből pedig röntgensugárzás keletkezik. A kilépő elektronok sebességét az Einstein-egyenlet (1) segítségével határozhatjuk meg:

$$e \cdot U = \frac{m \cdot v^2}{2} \tag{1}$$

ahol *e* az elemi töltés (1,602·10⁻¹⁹ C), *m* az elektronok nyugalmi tömege (9,1·10⁻³¹ kg), *v* a kilépő elektronok sebessége és *U* a csőfeszültség. Az összefüggés szerint tehát a katódból kilépő elektronok mozgási energiája a csőfeszültséggel.

A röntgencső egyik legfontosabb paramétere az emittált sugárzás teljesítménye $P = cU^2 IZ$, ahol U az elektronok gyorsítási feszültsége, I a katódfűtő áram, Z a céltárgy anyagának rendszáma, míg c egy együttható. Látható, hogy a gyorsítófeszültség és az áram beállításával szabályozható a teljesítmény. Minél nagyobb a sugárzási teljesítmény, annál nagyobb a kilépő röntgensugárzás intenzitás (I_0).

A fentebb említett szerint, anyagvizsgálati célokra a röntgensugárzást azon tulajdonsága miatt lehet felhasználni, miszerint valamely tárgyon való áthaladásakor a sugárzás intenzitása csökken, mert a tárgy a sugárzás egy részét elnyeli. Ha tehát a csőből kilépő sugárzás I_0 intenzitású, akkor *x* vastagságú tárgyon áthaladva I_1 intenzitásúra csökken:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\mu_m \rho x}$$
 (12)

ahol μ_m a tömegabszorpciós tényező, ρ a sűrűség, és *x* a vizsgált tárgy vastagsága. Ugyanakkor azon sugarak intenzitása, melyek a pl. *d* vastagsági mérettel jellemzett, az előbb vizsgált tárgytól eltérő elnyelési tulajdonságú részen haladnak át *I*₀-ról *I*₂re csökken. A tárgy ellentétes oldalán elhelyezett detektoron tehát az eltérő intenzitású sugárzások jól megkülönböztethetően észlelhetőek.

A detektor konvertálja a röntgensugarakat végezetül számítógép által feldolgozható képjellé. Kialakítása szerint lehet direkt és indirekt. A direkt detektornál a röntgenfotonok energiáját elektromos töltéssé alakítják, az elnyelő réteget amorf szelén alkotja. A félvezető detektorréteget két oldalról körülfogó két elektródamező közül az alsó vékonyréteg tranzisztorokra oszlik (TFT). A röntgenfotonok hatására keletkező elektron-lyuk pár az elektródákra merőleges elektromos térben szétválik, és a legközelebbi kiolvasó elektronikán töltés formájában felhalmozódik. Az indirekt detektornál a röntgenfotonokat látható fénnyé alakítják, amit fotoelektronok létrehozásához használnak fel. A fotoelektronokat gyorsítják, és fókuszálják majd újra látható fénnyé alakítják. Az így kapott képet CCD kamerával rögzítik.

A 2D transzmissziós röntgenképek programozása egyszerű, ezért automatikus vizsgálathoz is használják (AXI – automated X-ray inspection), olcsóbbak, mint a 3D-s röntgengépek, de alap kialakításban leginkább csak egyoldalasan szerelt lemezek vizsgálatához alkalmazhatók, mert a kétoldalas esetben, az egymást átfedő (alsó-felső) alkatrészek nehézkessé tehetik az elemzést. (11. ábra).



11. ábra. Kétoldalasan szerelt lemezről készült röntgenfelvétel; átfedő részek pl. a körrel jelzett területen

Annak érdekében, hogy a kétoldalas lemezek megbízhatóbb vizsgálatát lehetővé tegyék, kialakították a szög alatti felvétel (PIP-nél néztük a furatkitöltés mérésére) készítésének lehetőségét 2D-s transzmissziós röntgengépeknél. Hátrányuk, hogy ezek programozása nehézkesebb lenne, így automatikus elemzésekhez nem alkalmazott, csak "off-line", mintavételes ellenőrzéshez. A szög alatti felvételek készítésére két konstrukciós megoldás létezik. Egyik esetben a tárgyasztalt forgatják (és sokszor a tárgyasztalt mozgatják), így a konstrukció egyszerűbb, viszont korlátozott az elérhető nagyítás (12. ábra).



12. ábra. Szög alatti röntgenfelvétel készítése hagyományos konstrukcióval

A korlátozott nagyítás oka a következő. A röntgenes ellenőrzés esetében a nagyítást az határozza meg, hogy a vizsgált minta milyen távol helyezkedik el a röntgencsőtől (13. ábra). Abban az esetben, ha a tárgyasztal síkja merőleges a röntgencsőre, viszonylag közel vihető a minta a röntgencsőhöz. Amikor azonban a tárgyasztalt elforgatjuk, nagyobb távolságot kell tartani a röntgencsőtől; nehogy a csövet megsértse a tárgyasztal, illetve a minta.



13. ábra. Nagyítás röntgenes ellenőrzésnél

A nagyítás korlátozásának feloldására fejlesztették ki az ún. OVHM technikát (Oblique View at Highest Magnification), ami szabad fordításban azt jelenti, hogy a szög alatti képek készítésénél is elérhető a legnagyobb nagyítás. A konstrukciónak a lényege, hogy a tárgyasztalt csak függőleges irányban mozgatják (a nagyításhoz), és a detektor mozgatják és forgatják (14. ábra). A konstrukció komplexebb, viszont mivel a tárgyasztal síkja mindig merőleges a röntgencsőre, mindig elérhető a legnagyobb nagyítás.



14. ábra. Szög alatti kép készítése OVHM technikával

2.2.2. BGA forrasztások ellenőrzése röntgensugaras ellenőrzéssel

A röntgensugaras ellenőrzés szükségességét leginkább a BGA tokozású alkatrészek idézték elő. Ezeknek a kötéseit kizárólag ilyen technikával lehet megbízhatóan illetve roncsolásmentesen vizsgálni. Ortogonális nézetben a rövidzárak és zárványok képződése könnyedén kimutatható (15. ábra).



15. ábra. Zárványok és rövidzárak (forraszhidak) BGA tokozású alkatrész kötéseinél

A többi hibajelenség, mint pl. szakadások, deformációk a BGA alkatrészek kötéseinél csak szög alatti nézetben, a detektor döntésével elemezhetők megfelelően (16. ábra.). A repedések kis méretüknél (~1 μm keresztmetszeti lineáris méret) fogva pedig szinte egyáltalán nem vehetők észre, nem vizsgálhatók.



16. ábra. BGA tokozású alkatrész kötéseinek röntgensugaras elemzése szög alatti nézetben: a) szakadás; b) megnyúlt kötés; c) összenyomódott kötés

A zárványok ellenőrzésére, méretének maximális értékére az IPC-7095 szabvány nyújt irányelveket. A szabvány szerint a zárványok átmérője a BGA forrasztott kötés átmérőjének maximum a negyede lehet (17. ábra).



17. ábra. Zárvány maximális mérete BGA alkatrész kötésében

Arról azonban nem értekezik a szabvány, hogy van-e megkötés több, kisebb méretű zárvány esetén azok méretére. A nagyméretű- illetve sok zárvány mindenképp csökkenti a forrasztott kötés mechanikai szilárdságát, csökken a teherhordó keresztmetszet. Egyes kutatások ugyanakkor kimutatták, hogy a kisméretű zárványok akár hasznosak is lehetnek a kötés megbízhatóságának szempontjából, mert ha egy szakadás kiindul pl. a kötés szélétől, és bejut egy kisebb méretű zárványba, akkor ott megáll a repedés terjedése (hasonlóan ahhoz, mint amikor megfúrják a kőfelverődéses szélvédőt). Ez a jelenség, illetve a zárványok esetleges optimális méret- és lokáció-eloszlása ma is egy kutatott terület.

A zárványok röntgensugaras ellenőrzésének eredményét befolyásolja a röntgencső teljesítménye (gyorsítófeszültség, katódfűtő áram). Amennyiben alacsony csőteljesítményt használunk, a zárványok mért mérete csökken (a binarizálásnál képpontokat veszítünk a zárvány széleinél), úgy, mint amikor alulexponálunk egy képet (18. ábra a)). Amennyiben túl nagy csőteljesítményt használunk, a zárványok mért mérete növekszik; a röntgensugarak szórásából, és egyéb artifaktokból eredően a kötés széleihez képpontok adódnak hozzá a binarizálásnál (18. ábra b)).



18. ábra. Zárvány BGA kötésben: a) 50 kV gyorsítófeszültséggel készült kép; b) 60 kV gyorsítófeszültséggel készült kép

Ezért amennyiben a zárványok átmérőjének pontos mérése fontos, a röntgengépeket kalibrálni szokták. A kalibrálás általában egy elvében független eljárással kell, hogy megvalósuljon. Pl. szekvenciális keresztmetszeti csiszolatok készítésével (megadott mélységi lépésenként, pl. 50–100 µm-ként megállunk a csiszolással) felvételeket készítünk, és a röntgengépet úgy állítjuk be (gyorsítófeszültség, csőteljesítmény), hogy a két módszerrel mért zárványátmérő azonos legyen. A szekvenciális keresztmetszeti csiszolattal kalibrálás hátránya, hogy nem biztos, hogy "eltaláljuk" a mérendő zárvány maximális átmérőjét, mert nem tudunk tetszőleges kis lépésközt választani (idő; csiszolás technikai korlátai).

Röntgenes ellenőrzéssel lehetséges még szereletlen nyomtatott huzalozású lemezeket is vizsgálni. Ehhez rendszerint szög alatti nézetre van szükség. Egyrészt a huzalozási pályák szakadásvizsgálatánál annak eldöntésére, hogy melyik rétegen szakadt a huzalozás, másrészt a furatfémezés hibáinak felderítéséhez is (19. ábra).



19. ábra. Nyomtatott huzalozású lemezek vizsgálata: a) belső huzalozás szakadása; b) furatfémezés hibáinak felderítése

2.2.3. 3D CT vizsgálat

A 3D CT (computed tomography) vizsgálat alapja, hogy a mintát hossztengelye mentén megforgatjuk, miközben folyamatosan felvételeket készítünk (szoksáso szöglépés pl. 0,5–1°). Az elkészült felvételekből matematikai függvények alapján készítünk 3D-ben elhelyezkedő ponthalmazt (pontfelhő), melyre ezután burkológörbéket feszítünk. Ebből következik, hogy egyrészt a vizsgálat menete rendkívül lassú, egy minta vizsgálata akár több órát is igénybe vehet, ezért inkább a hibaanalitikában használatos, mint a gyártósori ellenőrzésben. Másrészt, mivel a mintát forgatjuk, ahhoz, hogy minél nagyobb nagyítást érjünk el, minél kisebbnek kell lennie a mintának (a forgatás közben ne ütközzön bele a röntgencsőbe), ezért a vizsgálandó területet ki szokták vágni a termékből, és az elérhető nagyítás még így is korlátos. A terület kivágásának következtében a CT vizsgálat többnyire nem tekinthető roncsolásmentesnek az elektronikai termékek hibaanalízisében. Az elkészült CT képek alapján végezetül a minta 3 dimenzióban körbejárható (20. ábra), illetve virtuális metszeti képei készíthetők, vizsgálhatók.



20. ábra. 0603-as méretkódú ellenállás forrasztott kötéseiről készített CT felvétel https://edu.vik.bme.hu/mod/resource/view.php?id=10064