

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Diagnostika elektronických sestav pomocí rentgenového
záření**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel ROUS**
Osobní číslo: **E19N0011P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Diagnostika elektronických sestav pomocí rentgenového záření**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s problematikou rentgenové diagnostiky a výpočtové tomografie.
2. Zpracujte přehled možných vad elektronických sestav.
3. Zhodnoťte možnosti využití rentgenového záření nebo výpočtové tomografie pro diagnostiku vad elektronických sestav.
4. Pomocí připravených vzorků proveďte pro vybrané vady porovnání výsledků rentgenové diagnostiky (popř. výpočtové tomografie) s výsledky destruktivních metod diagnostiky. Při analýze pomocí výpočtové tomografie zvažte různé parametry nastavení rentgenového zařízení.
5. Navrhněte doporučení pro praxi.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. R.Christoph, H. J. Neumann – Rentgenová tomografie v průmyslové měřicí technice
2. IPC-A-610 Kritéria přijatelnosti elektronických sestav
3. IPC-7095 Design and Assembly Process Implementation for BGAs
4. Manuál rentgenového inspekčního zařízení a manuál SW nástroje VG Studio

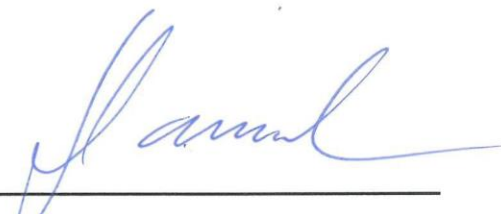
Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. František Steiner, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan





Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá diagnostikou elektronických sestav za pomoci výpočetní tomografie. V první části práce je popsána funkce výpočetního tomografu a rentgenu obecně. V další části je zpracován výpis vad elektronických sestav a jejich popisu rozdělený do třech kategorií. V další části je již popsána diagnostika různých vad za pomoci destruktivních a nedestruktivních metod včetně jejich vyhodnocení. Metody jsou na základě výsledků a vhodnosti pro jednotlivé typy vad navzájem porovnány a zhodnoceny. V závěru práce je obsaženo doporučení pro volbu vhodných parametrů výkonu rentgenové trubice a jejich vliv na výsledný obraz, které lze využít v praxi.

Klíčová slova

Výpočetní tomografie, rentgenová diagnostika, elektronické sestavy, vady elektronických zařízení, materiálografické výbrusy, nedestruktivní metoda

Abstract

The thesis deals with the diagnosis of electronic assemblies using computed tomography. The first part of the thesis describes the function of computed tomography and X-ray in general. In the next part, a list of defects of electronic assemblies and their description divided into three categories is presented. In the next part, the diagnosis of various defects using destructive and non-destructive methods including their evaluation is also described. The methods are compared and evaluated on the basis of their results and suitability for each type of defect. The paper concludes with recommendations for the selection of appropriate X-ray tube performance parameters and their influence on the resulting image, which can be used in practice.


Key words

Computed tomography, X-ray diagnostics, electronic assemblies, defects of electronic devices, cross-section analysis, non-destructive method

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.


.....
podpis

V Plzni dne 26.5.2021

Pavel Rous

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2021-003 „Materiály, technologie a diagnostika v elektrotechnice“

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Františku Steinerovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 VÝPOČETNÍ TOMOGRAFIE	12
1.1 RENTGENOVÉ ZÁŘENÍ.....	12
1.1.1 Historie.....	12
1.1.2 Vliv na zdraví.....	14
1.2 KONSTRUKCE STROJE.....	14
1.2.1 Zdroj rentgenového záření.....	15
1.2.2 Rentgenový detektor.....	16
1.2.3 Posuvná rotační hlava.....	17
1.2.4 Ochrana obsluhy.....	18
1.3 TOMOGRAFICKÉ SNÍMÁNÍ.....	18
1.3.1 Příprava vzorku.....	18
1.3.2 Nastavení parametrů.....	19
1.3.3 Voxel a rozlišení.....	20
1.3.4 CT artefakty.....	20
1.4 REKONSTRUKCE 3D MODELU.....	23
1.4.1 Observační software.....	24
1.4.2 Stanovení povrchu.....	24
1.4.3 Práce s modelem.....	25
2 VADY ELEKTRONICKÝCH SESTAV	27
2.1 VADY PÁJENÍ.....	27
2.2 VADY VODIVÝCH CEST.....	37
2.3 VADY MATERIÁLU.....	40
3 DIAGNOSTIKA ELEKTRONICKÝCH SESTAV	41
3.1 KRITÉRIA PŘIJATELNOSTI ELEKTRONICKÝCH SESTAV.....	41
3.2 DIAGNOSTIKA ZA POMOCI VÝPOČETNÍ TOMOGRAFIE.....	42
3.2.1 Vady identifikovatelné za pomoci RTG a CT.....	43
3.2.2 Vady problematicky identifikovatelné za pomoci CT a RTG diagnostiky.....	48
3.3 DIAGNOSTIKA ZA POMOCI DESTRUKTIVNÍCH METOD.....	50
3.3.1 Vady diagnostikovatelné za pomoci materiálografických výbrusů.....	51
3.3.2 Nevhodná diagnostika destruktivními metodami.....	57
3.4 SROVNÁNÍ.....	57
3.4.1 Výhody diagnostiky RTG a CT.....	57
3.4.2 Výhody destruktivních metod.....	58
3.5 PARAMETRY NASTAVENÍ RENTGENOVÉHO ZÁŘENÍ.....	58
4 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ V PRŮMYSLU	64
4.1 X-RAY DIAGNOSTIKA.....	64
4.2 CT DIAGNOSTIKA.....	65
4.3 REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ.....	66
5 ZÁVĚR	68
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	70
SEZNAM OBRÁZKŮ	72

Úvod

Diplomová práce se zabývá diagnostikou elektronických sestav pomocí rentgenového záření. Cílem práce je seznámení s problematikou výpočetní tomografie (CT – computed tomography), vad elektronických sestav a jejich kombinace za účelem dosažení nedestruktivních metod diagnostiky. Vývoj elektrotechnických sestav prochází stále větší integrací součástí a obecnou potřebou miniaturizace. Toto klade nároky jak na materiály, tak na použité technologie a tím pádem ceny komplexních elektronických sestav a jejich komponent stále rostou. Vady naopak neubývají a jejich identifikace je stále obtížnější. A právě z důvodu ceny není vždy možné hledat vady za pomoci destruktivních metod. Myšlenkou této diplomové práce je tedy doporučení pro využívání výpočetní tomografie v oblasti diagnostiky elektronických sestav.

Výpočetní tomografie byla ve zdravotnictví dlouhá léta jedinou možností neinvazivní diagnózy vnitřních poranění, jako jsou zlomeniny, poškození orgánů či vnitřních tkání, a hlavně pro diagnostiku nádorových onemocnění a dodnes se stále používá. Její hlavní nevýhodou v lékařství je, že se jedná o rentgenové zařízení vyzařující ionizující záření, které z dlouhodobého hlediska, hlavně ve velkých dávkách není vhodné pro živou tkáň. Výpočetní tomografie a rentgen obecně umožňuje nahlédnout do vnitřních struktur objektů, jak již bylo výše zmíněno. Se zařízením zvaným CT se dnes už setkáme ve většině nemocnic, protože ačkoliv toto zařízení nepatří k nejlevnějším zdravotním pomůckám, tak jeho význam v lékařské diagnostice je natolik užitečný, že se dnes bez něj lékaři neobejdou.

Průmyslová výpočetní tomografie nabízí možnost pomoci s diagnostikou v oblasti elektrotechniky. Její princip umožňuje k nedestruktivnímu nahlédnutí pod případně i do součástky, do vícevrstvých plošných spojů, nebo pro kontrolu pájení. Všechny tyto problémy se dají identifikovat i za pomoci destruktivních metod, jako jsou například materiálografické výbrusy. V některých případech ale není ideální rozřezat elektronickou sestavu, abychom se mohli podívat dovnitř. Jednotlivé komponenty nebo i celé desky stojí nemalé peníze a u destruktivních metod není vždy stoprocentní, že se na defekt narazí.

Z tohoto důvodu je zpracována tato diplomová práce, aby napomohla k výběru správné metody diagnostiky problémů elektronických sestav, aniž by bylo potřeba využívat metody „pokus – omyl“.

Seznam symbolů a zkratk

eV	Elektronvolt
V	Volt
A	Ampér
W	Watt
px	pixel
CT	Computed tomography
DPS	Deska plošných spojů
SMT	Surface mount technology (technologie povrchové montáže)
SMD	Surface mount device (součástky pro povrchovou montáž)
THT	Through-hole technology (osazování drátovými vývody)
BGA	Ball grid array (typ pouzdra pro povrchovou montáž)
QFN	Quad-flat no-leads (typ pouzdra s kontakty bez vývodů)
CAD	Computer-aided design (počítačem podporované projektování)
RTG	Rentgen
AXI	Automatizovaná xray inspekce
2D	Dvourozměrný
3D	Trojrozměrný

1 Výpočetní tomografie

1.1 Rentgenové záření

Rentgenové záření, označované také jako paprsky X, se nachází na elektromagnetickém spektru před ultrafialovým zářením. Což znamená, že mají mnohem menší vlnovou délku než světlo, takže se jedná o neviditelné záření. Paprsky X mají vlnovou délku mezi 0,03 a 3 nm. Pohybují se tedy okolo velikosti jednoho atomu. Pro rozlišování ionizujícího záření se využívá spíše jejich energie pohybující se v řádech jednotek keV. [1]

1.1.1 Historie

Paprsky X objevil v roce 1895 německý profesor Wilhelm Conrad Röntgen při práci s katodovou trubicí ve své laboratoři, když si všiml fluorescence krystalů v blízkosti trubice. Katodová trubice profesora Röntgena se skládala z kladné a záporné elektrody uvnitř evakuované skleněné baňky, která po připojení vysokého napětí vytvořila zářivku. Krystaly zářily zelenou fluorescenční barvou i poté co zakryl zářivku tvrdým černým papírem. [2]

Z tohoto objevu vyvodil, že se jedná o nový typ paprsku, jenž dokáže projít neprůhledným materiálem a vybudit světlo u fosforescenčních materiálů. Zjistil, že tento paprsek může projít většinou neprůhledných látek, dokonce i živou tkání, ačkoliv kostmi, nebo kovovými materiály ne. Röntgen v paprsku jako první neviděl využití v lékařství, ale v průmyslu. Kolegům představil rentgenový snímek sady závaží v krabici. [2]



Obrázek 1 Rentgenový snímek ruky manželky Wilhelma Röntgena [3]

Tento objev způsobil nadšení ve vědecké i laické komunitě. Do měsíce po objevu již bylo vyrobeno několik lékařských rentgenů v Evropě i ve Spojených státech. Půl roku po objevu již byly nasazeny rentgeny na bojištích pro lokalizaci střel zraněných vojáků. Do roku 1912 byl rentgen využíván převážně v medicíně, a to z důvodu, že skleněné baňky nebyly schopny vydržet velikost napětí, která byla potřeba pro dostatečnou energii, aby byly paprsky schopny projít kovovým materiálem. [2]

V roce 1913 William David Coolidge navrhl lepší koncept rentgenové trubice, který se principiálně u průmyslových tomografů drží dodnes. Původní rentgenová trubice vychází z principu Crookesovy trubice, u které dochází k ionizaci zbytkového vzduchu díky vysokému napětí mezi katodou a anodou, urychlené ionty poté vypouštějí elektrony směrem ke katodě. Coolidgeova trubice využívá termoemise pro generování elektronů, díky wolframovému vláknu je možné katodu zahřívat externím zdrojem proudu a elektrony jsou za pomoci vysokého napětí vystřelovány směrem k anodě. [4], [5]

Využití rentgenových paprsků v průmyslu se uplatnilo až v roce 1922 s příchodem 200kV rentgenové trubice, která dokázala prosvítit i silné ocelové pláty. V roce 1931 uvedla na trh firma General Electric Company 1MV rentgenovou trubici. [2]

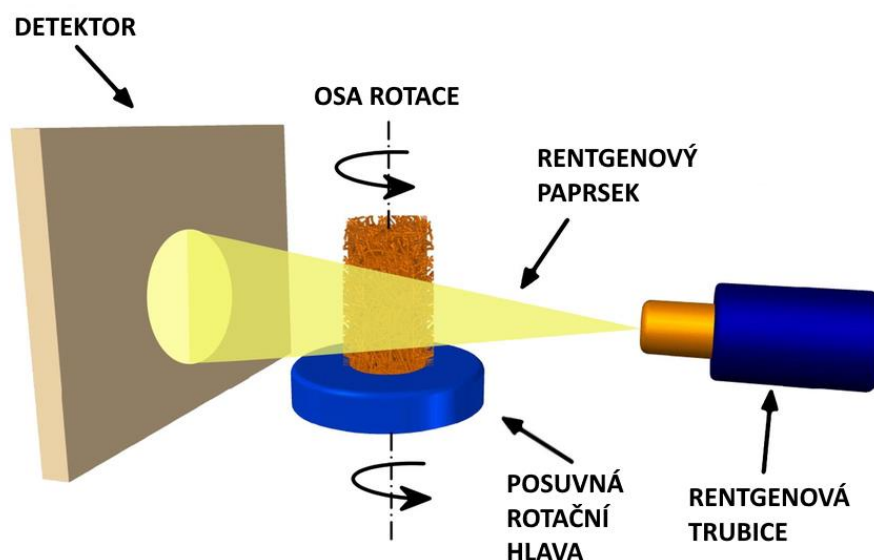
1.1.2 Vliv na zdraví

V počátcích experimentů s rentgenovými paprsky nikdo nebral v potaz nebezpečí, které sebou ionizující záření neslo. Nikdo nemyslel na to, že by neviditelné paprsky mohly mít nějaký negativní účinek na tělo, spíše naopak. Rentgenové záření nezpůsobuje okamžité příznaky, ale projevuje se až po delší době. Díky tomu se u některých experimentátorů s ionizujícím zářením začaly projevovat popáleniny kůže, ale nikdo si souvislosti nepřipouštěl. První zmínky negativních účinků rentgenových paprsků přišly od pánů Thomase Edisona, William J. Mortona i Nikola Tesly, kteří upozorňovali na neobvyklé podráždění očí. [2]

1.2 Konstrukce stroje

Výpočetní tomografie slučuje efektivitu rentgenového záření a informačních technologií, kde díky integrální transformaci představené Johannem Radonem v roce 1917 umožňuje rekonstruovat 3D obrazy z projekcí skenovaného objektu. [6]

Základní části výpočetního tomografu jsou rentgenová trubice, detektor a posuvná rotační hlava, jako další neméně důležitá věc u průmyslového tomografu je olověné pouzdro chránící obsluhu stroje. Posuvná rotační hlava umožňuje regulovat zvětšení a s tím související kvalitu výsledného skenu. [7]



Obrázek 2 Princip CT [8]

1.2.1 Zdroj rentgenového záření

Rentgenka je hlavní součást výpočetního tomografu, jedná se o velmi neefektivní převodník energie, převádí elektrickou energii na rentgenové záření o účinnosti zhruba 1 %. Většina energie se vyzáří ve formě tepla. Rentgenka se skládá ze dvou základních částí, umístěných uvnitř vakuové trubice, a to anoda a katoda. Anoda je vlastně kus kovu připojený na kladný pól produkující rentgenové záření, výsledné záření je ovlivněno atomovým číslem materiálu anody a energií dopadajících elektronů. Katoda je naopak připojena k zápornému pólu a jejím úkolem je emise elektronů z wolframového vlákna (filamentu) podobajícího se vláknu v žárovce. Emise elektronů, nebo přesněji termoemise probíhá za vysoké teploty, je proto třeba aby bylo wolframové vlákno proudovým zdrojem zahříváno. [7], [9], [10]

Rentgenka se ovládá dvěma zdroji, a to zdrojem proudu, který zahříváním filamentu emituje elektrony, které jsou urychlovány zdrojem napětí (v řádech kV) mezi anodou a katodou. Takto urychlené elektrony se při dopadu na anodu přeměňují na teplo a paprsky X. Teplo je potřeba odvádět z důvodu prodloužení životnosti anody. Místo na anodě, kam dopadají urychlené elektrony vytvářející rentgenové záření se nazývá ohnisko, toto ohnisko se právě z důvodu tepla zvětšuje a znehodnocuje výsledný paprsek a způsobuje rozmazání výsledného obrazu získaného z detektoru. [7], [9], [10]

Jsou dva typy rentgenových trubic, lišící se podle způsobu generace rentgenových paprsků. Trubice typu *Direct* generuje rentgenové paprsky odrazem od terčíku, tento typ trubice je vhodný pro vysoké výkony, protože terčík konstrukčně umožňuje snazší odvod tepla vznikajícího při dopadu elektronů. Při dopadu ale vzniká přenosem energie opotřebení terčíku a tím pádem zvětšení ohniska, které zhoršuje výslednou kvalitu snímků. Terčík je proto nutné po určité době otáčet. Druhý typ trubice označující se jako *Transmission*, pracuje, jak již název napovídá, na principu prostupu. Terčík je z krystalické formy uhlíku z důvodu potřeby vysoké teplotní vodivosti. Tento typ trubice má menší velikost ohniska, díky čemuž umožňuje mnohem větší detail.



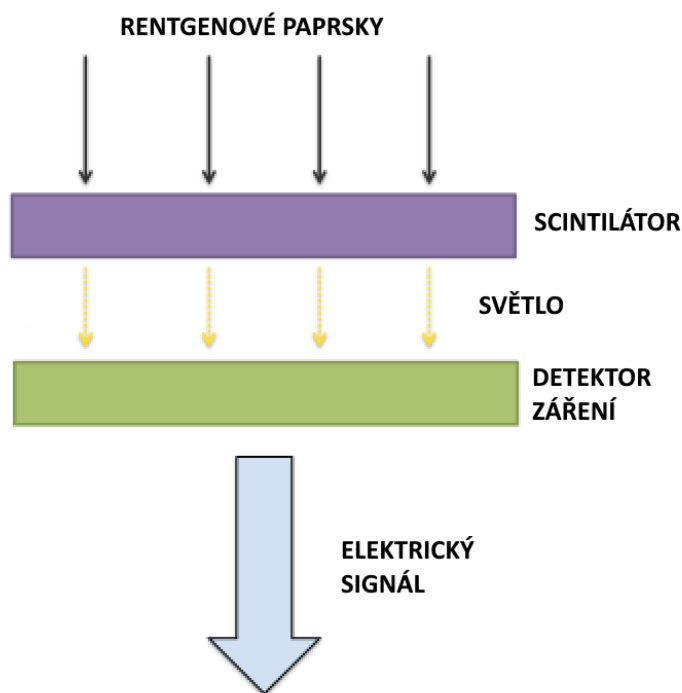
Obrázek 3 Částečně opotřebený terčík z direct trubice

1.2.2 Rentgenový detektor

Původně byl k zaznamenávání obrazu rentgenových snímků používán fotopapír citlivý na ionizující záření, který se v nepoužitém stavu jevil zcela průhledný, až působením rentgenového záření vlivem intenzivních paprsků ztmavl. Z důvodu digitalizace je třeba použití jiných technologií. [7]

Výpočetní tomografie využívá převážně plošný detektor, který snímá rentgenové paprsky celou plochou, alternativou je liniový detektor, který má hlavní výhodu v geometrii snímání objektu, kdy nedochází k perspektivnímu zkreslení, protože snímaná rovina řezu je vždy kolmá k rotační ose. Tento princip ale velmi prodlužuje výslednou dobu skenování. Proto je více využíván plošný detektor, který v jednu chvíli snímá dvoudimenzionální obraz. [7]

U výpočetních tomografů v průmyslu se nejčastěji používá tzv. nepřímý detektor. Který se skládá ze scintilátoru a obrazového sensoru. Scintilátor je materiál měnící vlnovou délku ionizujícího záření na světlo. Díky tomu stačí k digitalizaci rentgenového snímku obrazový sensor na bázi křemíku, používaný třeba v digitálních fotoaparátech. Detektor je třeba vždy před skenováním kalibrovat, kdy dochází ke srovnání citlivostí jednotlivých pixelů. [7], [11]

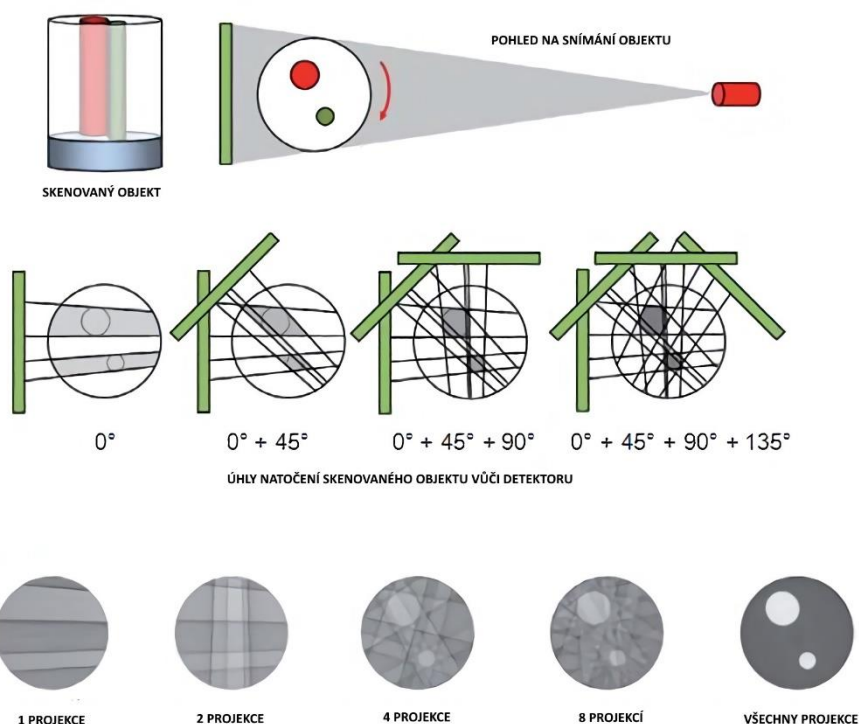


Obrázek 4 Detektor se scintilátorem

Běžné rozlišení detektorů se pohybuje od 1Mpix do 4Mpix. Velikost a rozlišení detektoru je hlavní parametr určující, jak velký objekt je možné skenovat a při jakém detailu. Zde přichází v úvahu micro-CT, což je principiálně stejné zařízení, jen s rozdílem že má detektor s mnohem větším rozlišením, díky kterému je možné nedestruktivně snímat objekty s velkým detailem. [7], [12]

1.2.3 Posuvná rotační hlava

Aby mohlo dojít k rekonstrukci do 3D je třeba získat snímky objektu ze všech jeho stran, k čemuž slouží rotační hlava k upevnění vzorku. Posun hlavy v ose Z určuje zvětšení vzorku a osa X a Y slouží k nastavení polohy. [7]



Obrázek 5 Zpětná projekce [7]

1.2.4 Ochrana obsluhy

Nebezpečnost rentgenového záření je v dnešní době velmi známá věc, o čemž svědčí už jen fakt, že rentgenové paprsky nejsou poznat a ozáření se neprojevuje hned, takže se před ním nedá jen tak utéct. Z tohoto důvodu je ochrana hlavně preventivní. Průmyslové výpočetní tomografy se proto zabezpečují olověným pláštěm, který velmi dobře pohlcuje rentgenové záření. Dávka záření, které je obsluha vystavena je zanedbatelná, ale je běžné mít v blízkosti tomografu dozimetr, který hlídá případné úniky. Také probíhá pravidelná kontrola těsnosti olověného pláště. [7]

1.3 Tomografické snímání

1.3.1 Příprava vzorku

Vzhledem k tomu, že průmyslové CT je zapouzdřený stroj, tak dochází k omezení rozměru vzorku, vzorek tedy zpravidla nemůže mít větší rozměr, než jsou rozměry detektoru. Co se týče kvality výsledného skenu, tak je vhodné, aby byl vzorek menší, než je rozměr detektoru.

Pro kompletní nasnímání vzorku je třeba, aby jeho osa byla shodná s osou rotace a nedocházelo k vychýlení vzorku na jednu stranu, v tomto případě je třeba dostat vzorek blíže

k detektoru a tím pádem se snižuje detail výsledného skenu. Při volbě polohy vzorku pro sken je ideální, když je vzorek usazen s určitým sklonem, aby se snížila největší tloušťka při zákrytu dvou překrývajících se hran. Díky tomu je možné se zbavit určitých artefaktů. [7]

1.3.2 Nastavení parametrů

V případě, že je u skenovaného objektu požadována vysoká přesnost, je třeba výpočetní tomograf, přesněji jeho posuvnou hlavu zkalibrovat, toto lze provést za pomoci naskenování kalibračního vzorku, jež jsou zpravidla dvě rubínové kuličky usazené s přesnou roztečí na tyčce. Toto se provádí po zvolení správného přiblížení skenovaného vzorku, kdy už nebude třeba posouvat s hlavou do osy Z. Po naskenování kalibračního vzorku se v rekonstrukčním programu změří rozteč rubínových kuliček a zapíše se do akvizičního programu současně s reálnou hodnotou kalibračního vzorku. [7]

Po zkalibrování je třeba zvolit správné hodnoty napětí a proudu. Napětí mění kmitočtové spektrum záření a je třeba jej důkladně volit dle skenovaného materiálu. Přesněji řečeno, napětí nastavuje rychlost a tím pádem energii dodanou elektronu pro vytvoření rentgenového záření a proud řídí množství vystřelovaných elektronů. Laicky řečeno, zvětšování napětí je vhodné u materiálů s horší propustností jako jsou třeba kovy a proud zvyšuje kvalitu skenu, proto u plastů je třeba volit menší napětí, ale větší proud. [7]

Samotné nastavení je velmi subjektivní a řídí se převážně histogramem výsledného snímku, na kterém je třeba získat co největší kontrast jednotlivých materiálů podle jejich hustoty. Dále souvisí s histogramem i doba expozice jednotlivých snímků, v tomto se nastavení příliš neliší od fotoaparátů. Velká doba expozice nám sice může snížit výkon potřebný k prosvícení materiálu, ale naopak násobně zvyšuje dobu skenování. [7]

Pro vytvoření 3D obrazu je třeba naskenovat objekt ze všech stran, počet kroků na otočení 360° se pohybuje okolo 1000, takže úhel mezi jednotlivými kroky je $0,36^\circ$. Větší množství kroků do určité hodnoty ještě zvyšuje kvalitu výsledného skenu, ale neúměrně k výsledné velikosti souboru, který se může pohybovat v desítkách GB. [7]

1.3.3 Voxel a rozlišení

Při snímání rentgenových snímků nám díky elektronickému detektoru vznikne obrázek o rozlišení dle použitého detektoru, jehož jednotlivé pixely obsahují pouze jednu barvu, a to odstín šedé. Odstín šedé nám dává informaci o hustotě rentgenovaného materiálu. V případě, že skenujeme kouli umístěnou ve středu detektoru, tak nám vznikne rentgenový snímek s černým kulatým středem a světlým okrajem, z čehož můžeme usoudit, že se jedná o kruhový objekt. V případě koule ale nebude mít černý střed po celé ploše stejný odstín, nejtemnější odstín bude uprostřed, protože v tomto místě je největší tloušťka materiálu a od středu k okrajům klesá. [1]

U digitálního skenu z detektoru s 8bitovou hloubkou šedé barvy vznikne 255 odstínů šedi na každý pixel, pro 2D obrázek. Sken s výpočetním tomografem nám poskytne spousty těchto obrázků, které je třeba převést do 3D podoby. Zde se mění pixel na voxel, který vznikl ze slova volumetric pixel, který podobu 255 odstínů šedi převádí na hustotu materiálu uvnitř 3D mřížky. [1]

Rozlišení výsledného 3D modelu je vytažený třetí rozměr z rozlišení detektoru, díky čemuž vznikne 3D krychle. Velikost a úměrné rozlišení voxelů je naopak závislé na vzdálenosti objektu od rentgenky a detektoru. Vzhledem k tomu, že vyzařované paprsky mají kuželovitý tvar, tak při pohybu objektu blíže k rentgence (dále od detektoru) se obraz na detektoru zvětšuje, čímž nám zmenšuje reálnou velikost voxelu a tím pádem zvětšuje kvalitu skenu. [1]

1.3.4 CT artefakty

Slovo artefakt se ve výpočetní tomografii zaměřuje na nežádoucí jevy, které vznikají při skenování objektu a jsou patrné na výsledku rekonstrukce. Tyto artefakty se projevují různě např. vlnky, stíny, kruhy. Vyhnout se těmto jevům je prakticky nemožné, ale je možné alespoň snížit jejich vliv na výsledný rekonstruovaný 3D sken.

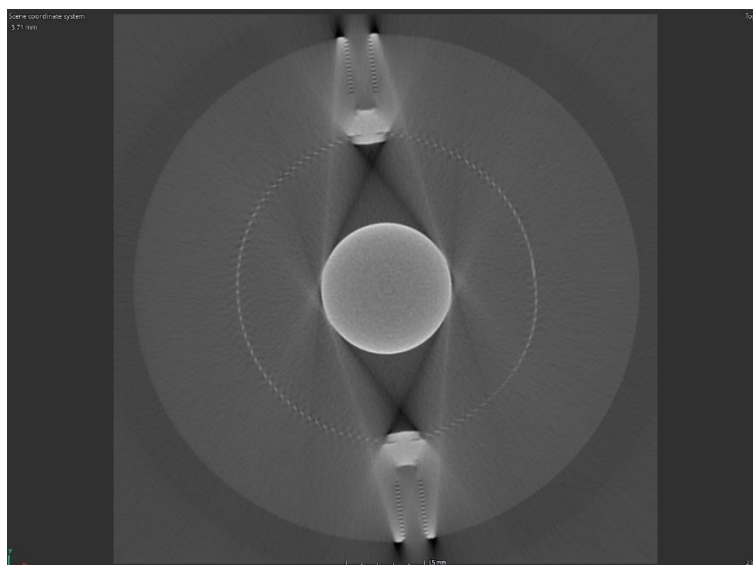
Feldkamp artefakt

Tento artefakt vzniká kvůli tvaru rentgenového paprsku, při skenování malých objektů blízko u rentgenky může díky kónickému tvaru rentgenového paprsku vzniknout deformace

tvaru v okrajích objektu. Tento jev se týká hlavně hranatých objektů, kde může po rekonstrukci vznikat zkroucení stěn. [1]

Artefakt tvrdnutí paprsku

Při vzniku rentgenového záření nemají emitované fotony vždy stejnou energii. Což znamená, že vyzařované spektrum bude mít určitou šířku pásma pohybující se v nižších energetických úrovních. Takže při prosvitu objektu se část rentgenového záření ztratí v prvních pár milimetrech prostupu materiálem, protože nemá dostatečnou energii, naopak část záření s vysokou energií materiálem prostoupí snadno. Díky tomuto nám vzniká nelineární útlum v závislosti na hloubce prostupu, tento jev se nazývá tvrdnutí paprsku. [1]



Obrázek 6 Sken kovového jádra v polymerovém obalu

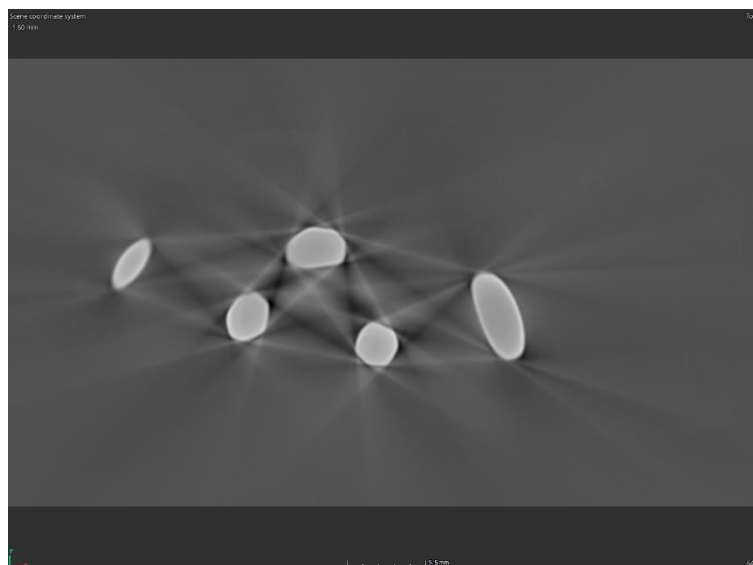
Při skenování kulatého objektu nám tedy při průchodu rentgenového záření středem vzniká výsledný odstín šedi nižší, než by ve skutečnosti měl být, protože se část spektra rentgenového záření ztratí, naopak při průchodu záření okrajem koule, kde není tak silná stěna, dojde k nižšímu útlumu a výsledná hodnota bude bližší, teoretické skutečnosti. [1]

Tvrdnutí paprsku nám vytváří dva typy artefaktů, a to artefakt baňkování, který se projevuje tak, že se okraje objektu projevují jako místo s menší hustotou než ve středu objektu, kde díky větší tloušťce dochází k většímu útlumu rentgenového záření. Tento jev se dá při rekonstrukci opravit za pomoci vestavěných algoritmů. Artefakt pruhů vzniká při skenování objektů s různými hustotami materiálů, kde při průchodu více materiály dochází k značnějšímu tvrdnutí paprsku než u jednoho typu materiálu. Tvrdnutí paprsku se dá také

ovlivnit za pomoci kovových filtrů, které dokážou odfiltrovat spektrum rentgenových paprsků o nízké energii. [1]

Artefakt rozptylu

Rentgenové záření neobsahuje pouze rovné linie paprsků X, při průchodu materiálem vzniká takzvaná sekundární radiace, která nemá na rozdíl od primární radiace přímý směr, ale díky odrazům v materiálu může směřovat do všech stran. V případě že odražená sekundární radiace dopadá na detektor, tak způsobuje artefakty podobné artefaktu tvrdnutí paprsku. Takovéto narušení kontrastu materiálu způsobí při rekonstrukci chybu v rozměrech modelu. [1]



Obrázek 7 Rozptyl paprsků průchodem kovu

Kovové artefakty

Kovové materiály mají mnohem větší schopnost pohlcovat rentgenové záření než jiné materiály, tato vlastnost je úměrná velikosti protonového čísla prvku z periodické tabulky. Tato vlastnost ale způsobuje nechtěný efekt, kdy dojde k pohlcení větší části spektra rentgenového záření a skrz kovovou část objektu projde velmi malé množství paprsků což při rekonstrukci způsobí, že tato oblast nebude vykazovat skutečný tvar, ale může se tvářit jako místo s jinou hustotou materiálu, než je ve skutečnosti. Ve 2D snímcích z rekonstruovaného skenu pak můžeme vidět tmavé pruhy, které vycházejí od kovových částí modelu. [1]

Artefakty detektoru

Jakékoliv defekty, nečistoty, mrtvé pixely na detektoru nemusí být na první pohled patrné, ale po rekonstrukci mohou způsobit kruhové artefakty na modelu, projevující se jinou hustotou materiálu. Průměr a tloušťka artefaktů je závislá na pozici a velikosti defektu detektoru. Akviziční program umožňuje tyto defekty kalibrovat, aby se dalo artefaktům předcházet. Nečistoty na detektoru mohou být patrné při nižších výkonech rentgenky. [1]

Artefakty šumu

Šum vzniká v průběhu celého procesu od vyzařování rentgenových paprsků, až po rekonstrukci modelu. Tyto šумы se dají rozdělit do pěti kategorií, náhodný šum, kvantový šum, elektronický šum, šum zaokrouhlení a rekonstrukční šum. Co se týče náhodného šumu, tento šum je nepravidelný, nedá se předvídat ani korigovat, ale jeho vliv není tak velký jako vliv ostatních šumů. Kvantový šum je závislý na množství dopadajících fotonů rentgenového záření, množství těchto fotonů je závislé na přenesené informaci po průchodu skenovaným objektem, v případě malého urychlovacího napětí klesá množství fotonů dopadajících na detektor. Voxel jako jednotka objemové informace potřebuje určité množství fotonů, v případě nižších hodnot není informace kompletní a při zobrazení naskenovaného výsledku je patrný vizuální šum. Tento problém se eliminuje zvýšením proudu rentgenové trubice, díky čemuž se při termoemisi emituje větší množství elektronů. Elektronický šum je problémem hlavně analogových přenosů, kde moduluje na analogový signál, digitální přenosy jsou z principu vůči modulovanému šumu imunní, ale mohou trpět na jiné typy šumů. Šum zaokrouhlení vzniká v průběhu digitalizace, kdy přechází spojitý signál na signál nespojitý, s čímž se nese ztráta informace mezi rozhodovacími úrovněmi při kvantování signálu. [1]

1.4 Rekonstrukce 3D modelu

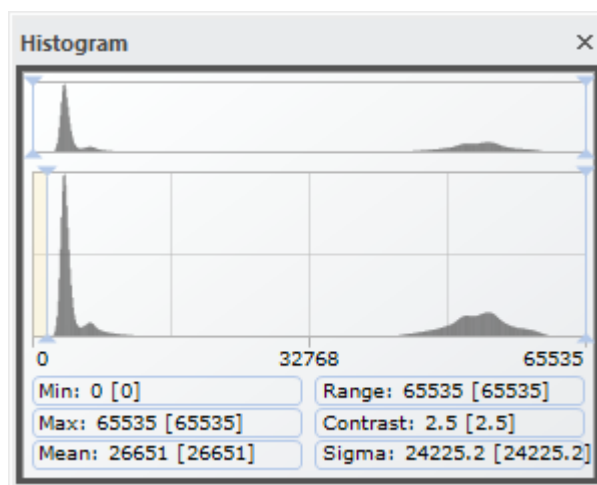
Ve chvíli, kdy máme k dispozici sadu snímků ze všech úhlů skenovaného vzorku, můžeme přejít k poslednímu kroku výpočetní tomografie. Rekonstrukce nám spojí všechny snímky a za pomoci Radonovy transformace vytvoří 3D model objektu. Tento proces je zpracovaný za pomoci rekonstrukčního softwaru. Funkce rekonstrukčního softwaru je čistě

převod z 2D snímků na 3D objemová data. Výstupní formát souboru je různý, bývá specifický pro různé typy softwarů.

1.4.1 Observační software

Jakmile máme rekonstruovaná data, je možné je otevřít v dalším typu softwaru. Tento typ observačního softwaru zpravidla umožňuje standartní funkce práce s 3D modelem s rozdílem, že zde se nejedná o typický CAD model, který je tvořen vektorovými prvky, ale defacto trojrozměrný blok, který se dá odhalovat vymezením oblasti zájmu v histogramu.

Histogram představuje hustotu materiálu jednotlivých voxelů v odstínech šedi. Jinak řečeno, v nízkých úrovních histogramu můžeme najít jeden vrchol, který udává množství voxelů vzduchu a ve vysokých úrovních množství voxelů materiálu. V případě, že se jedná o objekt s více druhy materiálů, tak výsledný histogram bude mít v pravé části více vrcholů množství voxelů, každý vrchol zde bude představovat jiný typ materiálu. Vrcholy jsou zde seřazeny podle hustoty materiálu, přesněji atomového čísla, z prava do leva.



Obrázek 8 Histogram naskenovaného objektu z jednoho materiálu

V případě, že naskenovaný obrázek nemá dostatečný rozestup v histogramu mezi voxely vzduchu a voxely objektu, tak kvalita rapidně klesá, protože materiál splývá s okolím.

1.4.2 Stanovení povrchu

Jako v rozdílu mezi vektorových a bitmapovým obrázkem, je zde podobný rozdíl. Výsledek rekonstrukce naskenovaného modelu představuje 3D bitmapový obrázek, oproti vektorovému obrázku, který se dá přirovnat k CAD 3D modelům, nemá předem stanovené

hrany, je to jen 3D mřížka voxelů udávající informaci o hustotě materiálu. Takže aby bylo možné s modely dále pracovat, je třeba specifikovat, kde je přechod mezi vzduchem a povrchem materiálu, případně najít hranice mezi jednotlivými materiály.

V tomto nám pomáhá histogram ze kterého, jak již bylo zmíněno, se dá vyčíst množství voxelů jednotlivých materiálů. Toto všechno musí observační software zvládat. Takže před začátkem každé práce s rekonstruovaným modelem musí být definovány hranice mezi materiály, díky čemuž může software vytvořit fiktivní vektorový model. Obecně se dá říct, že před stanovením povrchu je z naskenovaného materiálu plná krychle, protože i vzduch představuje nějaký materiál, kterým musí rentgenové paprsky projít. Takže stanovením povrchu ořízneme z krychle místa, kde je hustota nejnižší a zůstanou nám oblasti s vysokou hustotou.

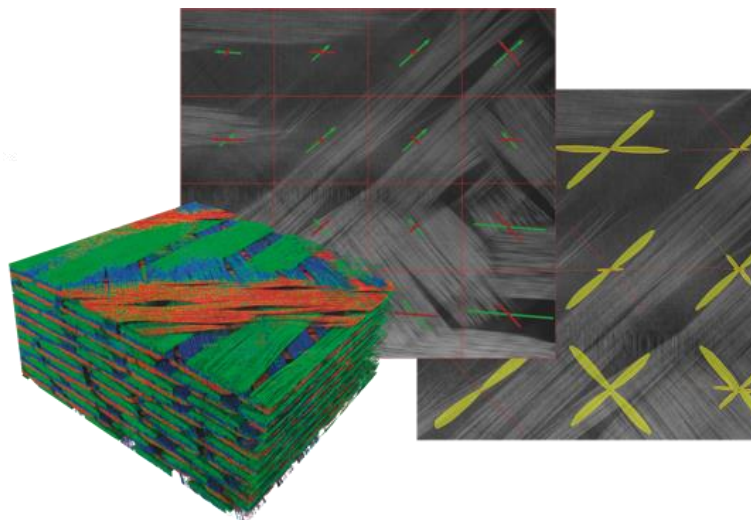
1.4.3 Práce s modelem

Jakmile jsou stanoveny meze povrchů materiálu, je možné s modelem dále pracovat. V rozhraní softwaru máme k dispozici většinou čtyři okna různých pohledů, jeden pohled je ve 3D, kdy vidíme rekonstruovaný 3D objekt a další tři pohledy jsou rekonstruované řezy ve třech osách. Tyto pohledy nejsou závislé na stanovení povrchu, takže v jejich náhledu jsou vidět v odstínech šedi řezy ve trojdimenzionální voxelové mřížce. Jinak řečeno, zde se voxely převedou na pixely tím, že se jim sebere vždy jedna dimenze. Díky tomuto náhledu je možné vidět do vnitřních struktur naskenovaných objektů a je možné za pomoci softwaru vygenerovat animaci průchodu modelem.

Funkce, která nesmí chybět v žádném diagnostickém programu je měření. Měření je zde možné jak ve 2D, tak i ve 3D. Dvojdímenzionální měření je možné provádět na náhledech řezů modelem. Tento způsob měření je standartní a běžně využívaný ve všech softwarech umožňující měření na snímcích z mikroskopu. Oproti tomu měření ve 3D je obecně složitější, protože je nutné specifikovat místa mezi kterými chceme měřit. Software má proto k dispozici různé funkce pro definici základních tvarů, jako je plocha, kruh, válec, koule, aj. Díky tomuto je možné takto definovat dvě plochy a mezi nimi provést měření, nebo měřit průměr válcového tvaru.

Další funkce, které už bývají placené, jsou například analýza pórovitosti, analýza vláken kompozitních materiálů, nebo analýza pěnových a práškových materiálů. Tyto funkce již

využívají sofistikované algoritmy, které jsou schopny získat informace a naskenovaných objektech a vytvořit z nich objektivní a zhodnotitelné výstupy za pomoci reportů.



Obrázek 9 Analýza vláken kompozitních materiálů v sw VGSTUDIO MAX [13]

2 Vady elektronických sestav

Příčin způsobující nestabilitu či závadu elektronických sestav je nespočet. Je proto třeba tyto příčiny předvídat od návrhu motivu DPS až po závěrečné pájení. Díky rostoucím požadavkům miniaturizace elektroniky vznikají nové a nové problémy, které mohou v provozu zapříčinit problémy elektronických sestav. Problematika jednotlivých vad elektronických sestav je velmi komplexní a rozsáhlá a jednotlivé vady se mohou prolínat, proto je třeba jednotlivé vady rozřadit do podkapitol, které blíže specifikují jednotlivé vady.

2.1 Vady pájení

Pájení neboli přetavení pájky, která vytváří mechanicky odolný a elektricky vodivý spoj mezi kontaktními ploškami DPS a vývody součástek. Procesů pájení je celá řada. Jako jeden z hlavních způsobů velkoobjemového pájení se dá považovat pájení vlnou, kdy osazená deska s přilepenými SMD komponenty projíždí vlnou roztavené pájky, která smáčí při kontaktu vodivé plošky a vytváří pájený spoj. Další metodou je metoda přetavením, kdy je na DPS nanášena pomocí sítotisku nebo šablonového tisku pájecí pasta v místech, kde má dojít k vodivému spoji a poté vložena do pece, kde je různými metodami vytvořena atmosféra o teplotě tání použité pájky a tím pádem dojde k přetavení pájecí pasty a tím je vytvořen pájený spoj. Každá metoda pájení sebou nese různé nevýhody či výhody, které na jednu stranu usnadňují proces velkoobjemové výroby, ale zároveň mohou vznikat chyby, které mohou způsobit nefunkčnost, nebo dokonce poškození elektronické sestavy

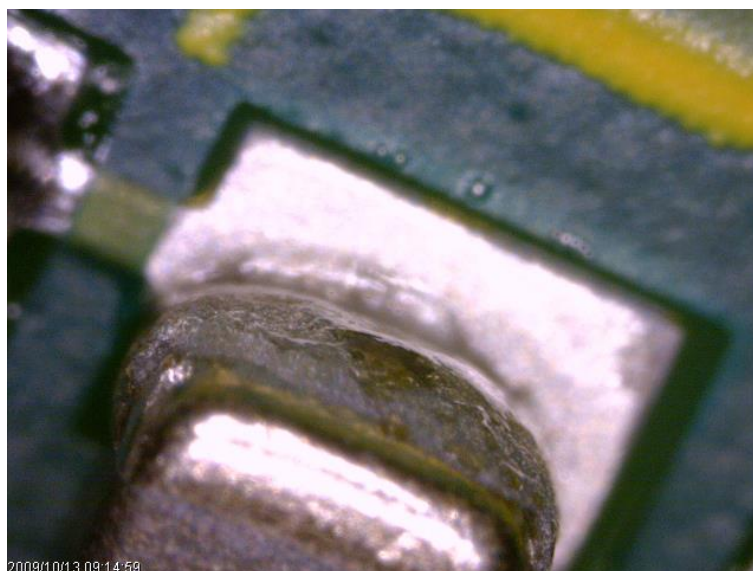
Nesmáčení

Nesmáčení se projevuje nedostatečným rozlitím pájky mezi kontaktem komponentu a pájecí ploškou při přetavení, tím pádem nemůže vzniknout dostatečně stabilní a pevný vodivý spoj. Vizually se dá identifikovat díky nepravidelným tvarům smáčení. Při pájení může pájka pokrýt oba povrchy kontaktů jak na straně součástky, tak na straně desky, ale nedojde k přilnutí a pájka z kontaktů ustoupí zpět. [14]



Obrázek 10 Nedostatečně smáčené kontakty na DPS [15]

Příčinou této vady může být nevhodně zvolená pájka, pro užitou metodu pájení. Dalším důvodem je vzniklá oxidace na kontaktech, která vzniká nevhodnou manipulací nebo skladovacími podmínkami. Oxidace se dá přirozeně zbavit použitím tavidla, které je pro proces pájení nezbytné. S tímto souvisí nutnost vyhnout se použití pájecí pasty po datu expirace. Velké množství oxidace je možné odstranit i za pomoci roztoku kyseliny sírové. K nesmáčení dochází také při nevhodně zvoleném množství pájecí pasty, kdy při větších plochách kontaktů je nutné použít větší množství pasty. [14]



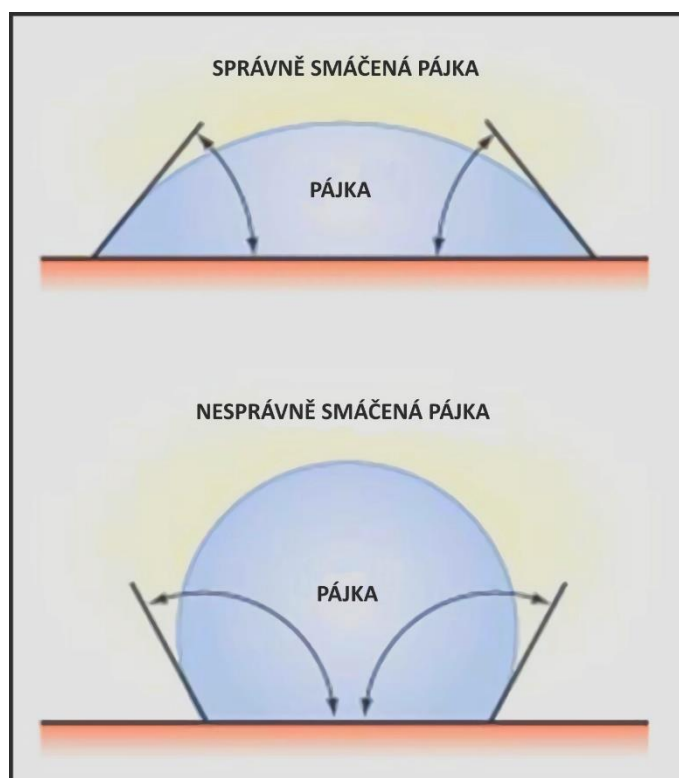
Obrázek 11 Pájka nesmáčí rovnoměrně plochu mezi kontaktem součástky a DPS [15]

Nedostatečné plnění otvorů

Tento problém souvisí s problémem nesmáčení pájky. Týká se ale konkrétněji vzlínání pájky v pokoveném otvoru při osazování THT součástek. Nedojde k dostatečnému smáčení pokoveného otvoru a vývodu součástky, pokovený otvor není vyplněn pájkou. Tato vada snižuje mechanickou odolnost pájených spojů. Může být způsobeno oxidací, špatnou smáčivostí nebo nedostatečnou teplotou.

Nadměrné množství pájky

Jak již název vypovídá, jedná se o použití většího množství pájky, než je nutné. Pájka při smáčení musí uzavírat ostrý úhel s DPS, což znamená že by se měla pájka zužovat od pájecí plošky DPS nahoru, v případě že je úhel tupý, smáčená pájka připomíná spíše kuličku. Tento jev nemusí vždy znamenat poruchu, ale díky velkému množství pájky je těžce identifikovatelný vnitřek spoje, který může schovávat jiné defekty jako například studený spoj, nebo nadměrné množství voidů obsahující zbytky tavidla, které se nemohlo odpařit. Kulička pájky na kontaktu snižuje i izolační vzdálenost mezi dalšími spoji a může způsobit zkrat.



Obrázek 12 Smáčivost pájky

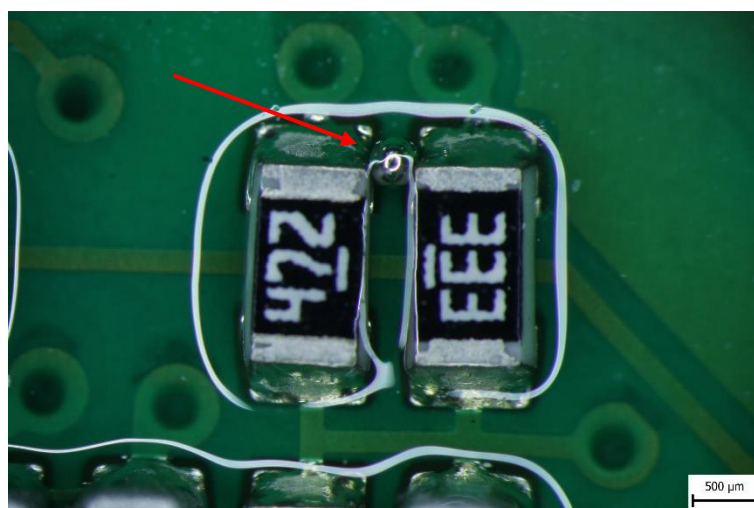
Vhodné použití pájky nebo pájecí pasty je proto velmi žádoucí. Jednotlivé defekty se dají v průběhu reworku odstranit díky odsávačkám, případně měděným páskům, ale ve velkoobjemové výrobě je lepší upravit proces dávkování, aby se dalo chybě předcházet.

Posunutí součástky

Posunutí součástky znamená, že se při pájení součástka hne ze své pozice a díky tomu nedojde k propojení, případně může způsobit kontakt se špatnou pájecí ploškou. Příčina problému je, že součástka má tendenci plavat na přetavené pájce. Jakékoliv dodatečné mechanické pohyby nebo vibrace při přetavení mohou způsobit, že se součástka posune ze své originální pozice. Další důvod posunutí součástky může být opět velké množství pájecí pasty, který souvisí s tendencí součástky plavat na přetavené pájce, ale větší množství pájky zvětšuje pravděpodobnost tohoto defektu. [16]

Kuličky pájky

Velmi častý defekt při pájení vlnou, nebo přetavením. Jak název napovídá, identifikovatelný je díky kuličkám pájky v místech, kde pájka nemá být. V případě že se kulička objeví mezi dvěma kontakty sousedících součástek, může vzniknout zkrat. [17]



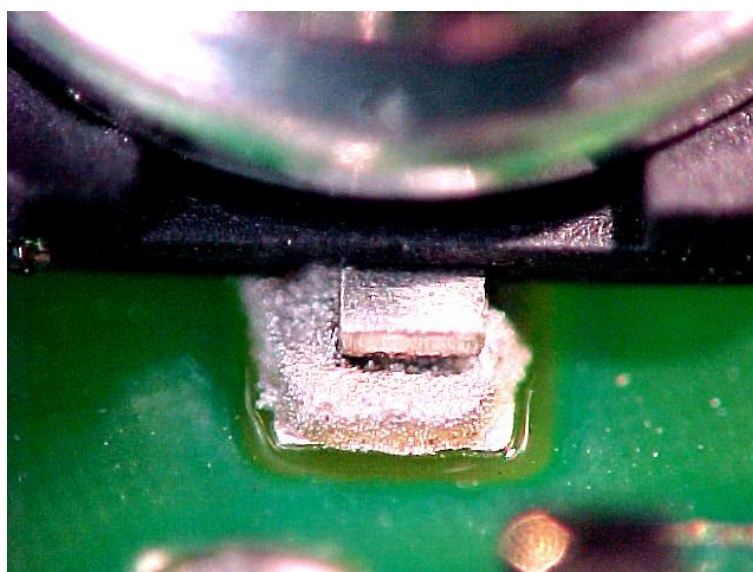
Obrázek 13 Kulička pájky mezi kontakty pod konformním povlakem

Působením vlhkosti může při pájení vzniknout pára, která vytlačí pájku z místa vodivých kontaktů a ta se vlivem smáčení zformuje do kuličky a zůstane na DPS. Další příčinou je nevhodné množství tavidla, které při odpařování rozprskne pájku mimo vodivé kontakty a opět vznikne smáčením kulička pájky.

Nejčastější způsob, jak zamezit defektům při pájení obecně, je vhodné skladovací podmínky jako je teplota a relativní vlhkost, dále je třeba správné množství pájky a tavidla.

Studený spoj

Studený spoj vzniká příčinou nedostatečně přetavené pájky, kdy nedojde ke kompletnímu smáčení povrchů. Vizuálně se dá identifikovat díky nepravidelnému tvaru. Vzhledem k tomu že nedojde ke kompletnímu smáčení povrchů, nevznikne vodivý spoj po celé ploše kontaktů, což zvyšuje přechodový odpor spoje. Takovýto spoj nemá ani dostatečnou mechanickou odolnost, což značně snižuje životnost. [18]



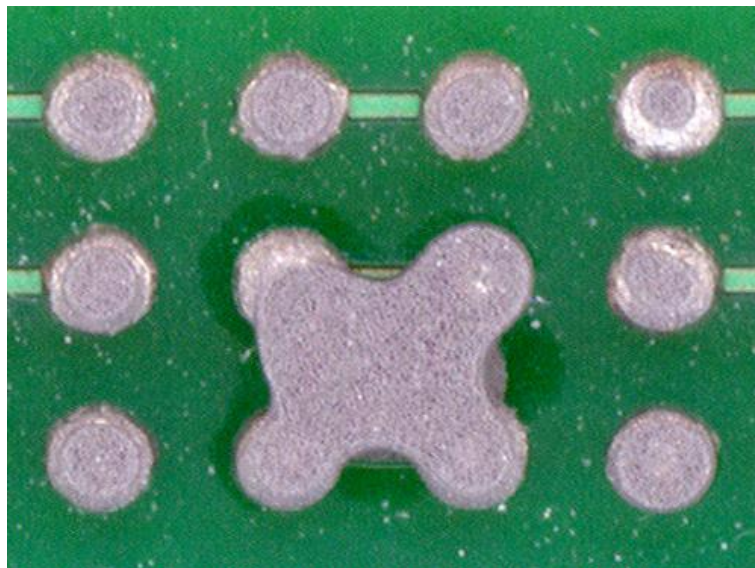
Obrázek 14 Nedostatečně smáčená pájka a prasklý kontakt způsobený studeným spojem [15]

Další příčinou vzniku studeného spoje mohou být vibrace při chladnutí pájky, kdy vznikají praskliny uvnitř pájky, nebo příliš velká teplota přetavení, kdy dojde k odpaření tavidla ještě, než je schopno očistit kontakty od oxidace. [18]

Můstky pájky/zkraty

Jedna z častějších vad, způsobená hlavně zmenšováním komponentů a elektronických sestav obecně, díky malým vzdálenostem mezi kontakty integrovaných obvodů dochází k přemostění dvou pájecích plošek pájkou, v nejhorsím případě dojde k proudovému zkratu a znehodnocení celé elektronické sestavy.

Vzniká při použití většího množství pájky, takže při smáčení zůstane pájka spíše v kulovitě tvaru, čímž se zkracuje izolační mezera mezi kontakty a může dojít ke smáčení s vedlejším kontaktem. Tento problém je velmi špatně identifikovatelný u pouzder typu BGA. Protože veškeré kontaktování je schované pod pouzdem integrovaného obvodu.

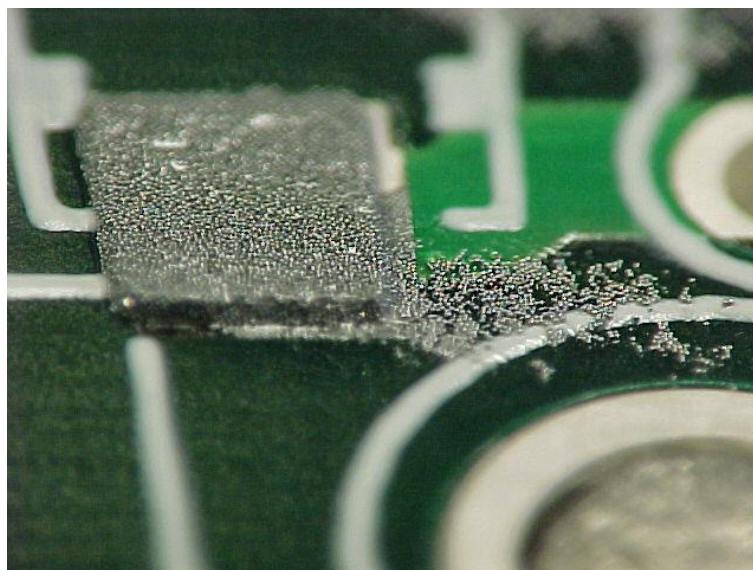


Obrázek 15 Můstky mezi piny způsobující zkrat [15]

Vzhledem k tomu, že je nejčastější příčinou nadměrné množství pájky tak řešení, jak se vyhnout tomuto problému je zvolení vhodného množství pájky, případně předvídání tohoto problému již při návrhu motivu DPS. Odstranění tohoto problému se součástkami s vyvedenými kontakty je relativně snadné, ale u BGA pouzder je řešení na odstranění komponentu, očištění a opětovného připájení. [17]

Rozstříky pájky/Pavučina

Jedná se o rozptýlenou pájku v místech, kde se pájka nemá nacházet, při přetavení může vytvářet struktury podobné pavučinám. Tento defekt může způsobovat zkraty mezi jednotlivými pájecími ploškami nebo snížit izolační odpor. [17]

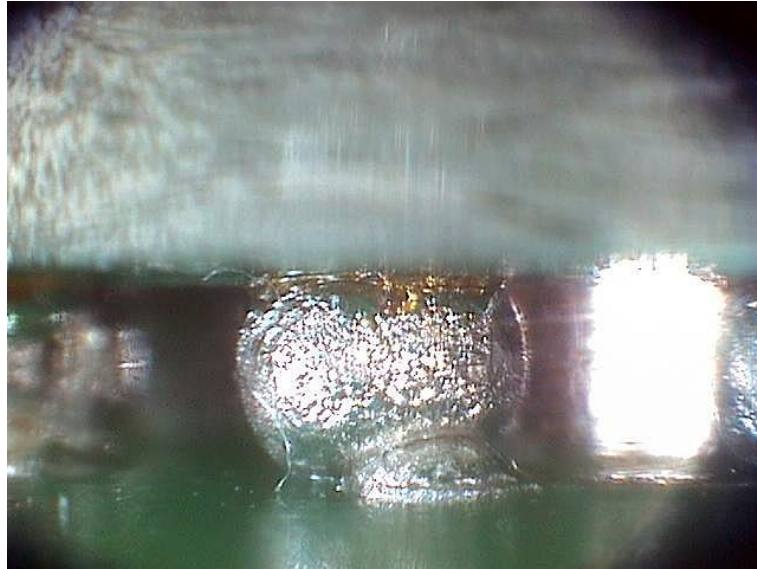


Obrázek 16 Kuličky pájky v oblasti nepájivé masky mohou být způsobeny nedostatečně očištěnou šablonou při sítotisku [15]

Příčinou je nedostatečné použití tavidla, kdy nedojde ke smáčení na vodivých ploškách, ale pájka se rozptýlí v místech nepájivé masky. Další příčinou mohou být nečistoty na nepájivé masce, na kterých pájka zůstává. [17]

Head-in-Pillow

Specifický jev při osazování komponent převážně typu BGA. BGA komponent se pájí metodou pájení přetavením, kdy dojde k metalurgickému spojení kuličky pájky BGA komponentu. V případě, že ke spojení nedojde, může dojít k vodivému kontaktu, který je ale velmi nespolehlivý. Tento nehomogenní spoj může projít testy a projevit se až v provozu elektronické sestavy.



Obrázek 17 Head in pillow defekt [15]

Vznik defektu Head-in-Pillow může způsobit buď oxidace pájky znemožňující jejímu přetavení, případně mechanická vada nedostatečného tlaku mezi kuličkou pájky a pájecí pastou, způsobená například ohnutím komponentu. Především se dá problému při použití pájecích past s vysoce aktivními tavidly, která eliminují vzniklou oxidaci. [19]

Voidy v pájce

Jedná se o dutá místa uvnitř zapájených spojů, nejčastější příčinou je použití nevhodného množství pájky, nebo její nedostatečné přetavení. Další příčinou může být nadměrné použití tavidla, které se nestihne při přetavení dostat ven. [20]



Obrázek 18 Voidy v pájce

Voidy se dají rozlišovat podle místa výskytu, nebo podle velikosti. Voidy o průměru od 0,1 mm do 0,3 mm jsou nejčastější, vyskytují se u pájení SMD součástek. Voidy o rozměrech 25 μm až 50 μm jsou častější u BGA komponentů. Dále jsou voidy vznikající pnutím při chladnutí pájky. Voidy vznikající při tvorbě intermetalických vrstev o rozměrech do 100 μm. [20]

Nebezpečí této vady spočívá v možnosti snížení elektrické i tepelné vodivosti. Protože vznikem voidů vznikají v prostoru smáčené pájky úžiny, které zpomalují šíření tepla a mohou zapříčinit lokální ohniska s vysokou teplotou.

Whiskery

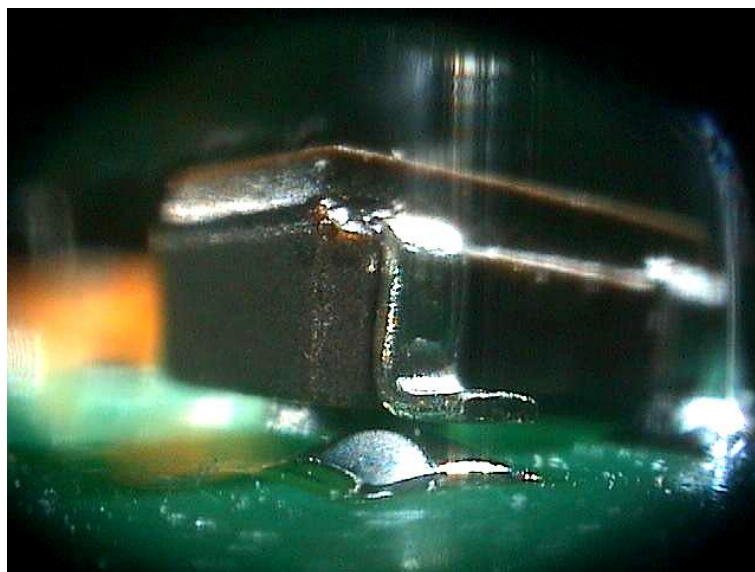
Whiskery, v překladu vousky, jsou elektricky vodivé výčnělky většinou z cínu. Průměr whiskeru se pohybuje okolo 1 μm (průměr vlasu se pohybuje okolo 100 μm) a délka je

v jednotkách milimetrů, což stačí na propojení dvou vodivých cest. Ačkoliv je whisker prakticky neviditelný, dokáže způsobit velké škody.[21]

Je více teorií, které vysvětlují příčinu vzniku whiskerů, všechny mají jedno společné. Pravděpodobnost vzniku whiskerů vzrostla, když se přestalo používat olovo jako příměs v pájce. Zbytkové namáhání je jedna z teorií, kdy po chemickém pokovování zůstává zbytkové pnutí v DPS. Další teorií je příčina intermetalického napětí, při vzniku intermetalických vrstev vzniká určité pnutí v pájce, které je příčinou vzniku. Obecně jakýkoliv tlak na pájku, může vést ke vzniku whiskerů. Tvorbě whiskerů se dá předejít použitím dalších příměsí materiálů při pokovování DPS a pájení. [22]

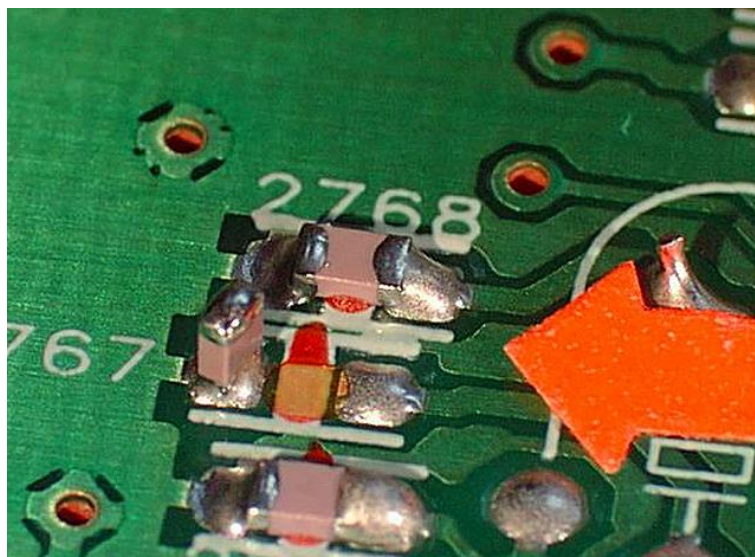
Zdvižená součástka/Tombstone

Závada česky nazývaná náhrobní kámen je zdvižení součástky na jednu kontaktní plochu, přičemž druhá kontaktní plocha míří směrem nahoru. Součástka tedy není na jedné straně kontaktu vodivě spojena a může svírat úhel až 90° vůči desce. [23]



Obrázek 19 Zdvižená součástka [15]

Příčina je způsobená povrchovým napětím pájky při smáčení, kdy na jedné straně buď ke smáčení pájky nedojde, nebo díky oxidaci se pájka nespojí s kontaktem nespojí. Další příčina je, že na jedné straně nedojde ke smáčení pájky díky špatnému rozvržení vodivých cest, kdy dochází k jinému odvodu tepla než na druhé straně. [23]

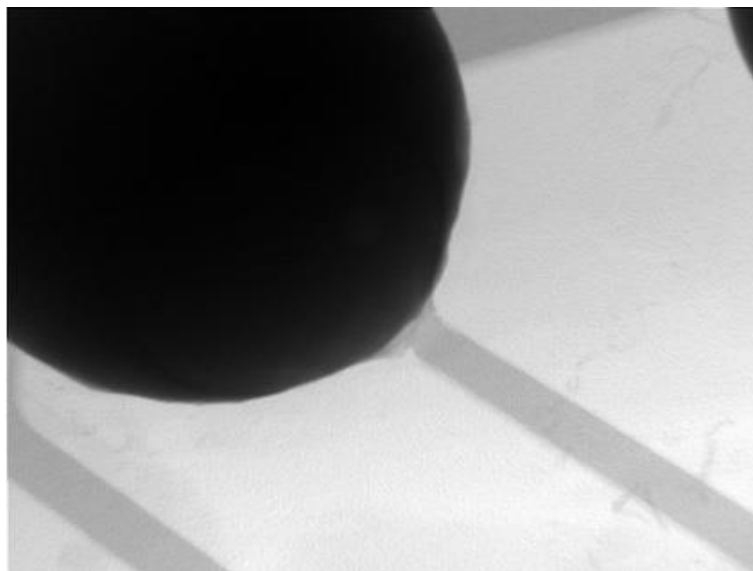


Obrázek 20 Náhrobní kámen neboli tombstone [15]

2.2 Vady vodivých cest

Přerušená vodivá cesta

Při pájení může dojít vlivem vysoké teploty k přepálení vodivých cest, u jednovrstvých a dvouvrstvých desek je možné vizuální kontrolou defekt objevit, v případě použití vícevrstvých desek je už s diagnostikou problém.

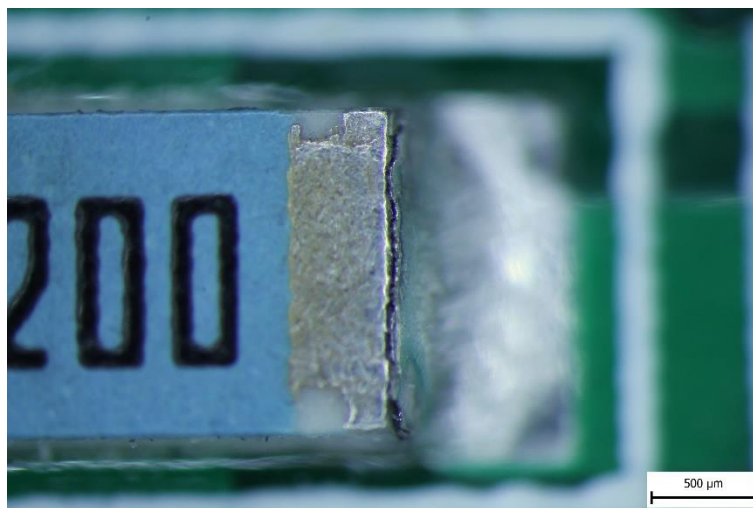


Obrázek 21 Rentgenový snímek přerušeného kontaktu [15]

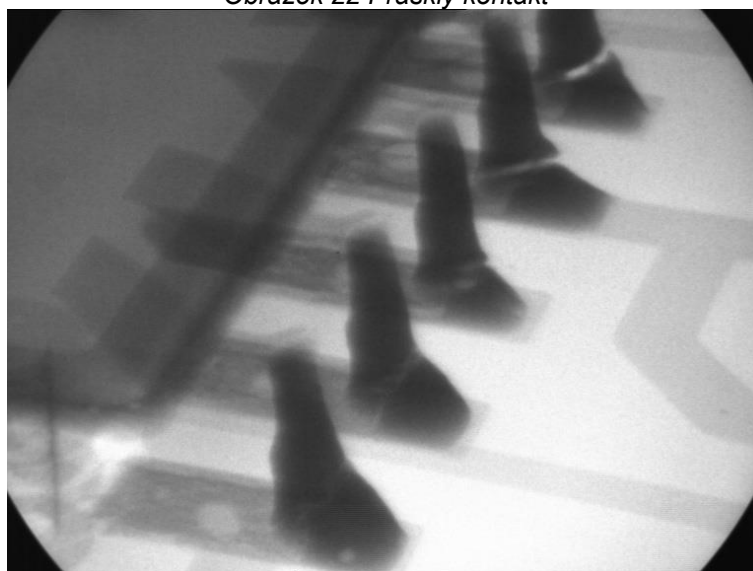
Prasklý kontakt

V případě teplotního nebo vibračního namáhání může vzniknout prasklina v pájce, způsobující nestabilní vodivý kontakt. Defekt není snadné identifikovat bez použití

mikroskopie, trhliny v pájce mohou být velmi malé. V některých případech se může prasklý kontakt objevit pod součástkou, nebo na přechodu mezi pájecí ploškou, takže je identifikace velmi těžká.



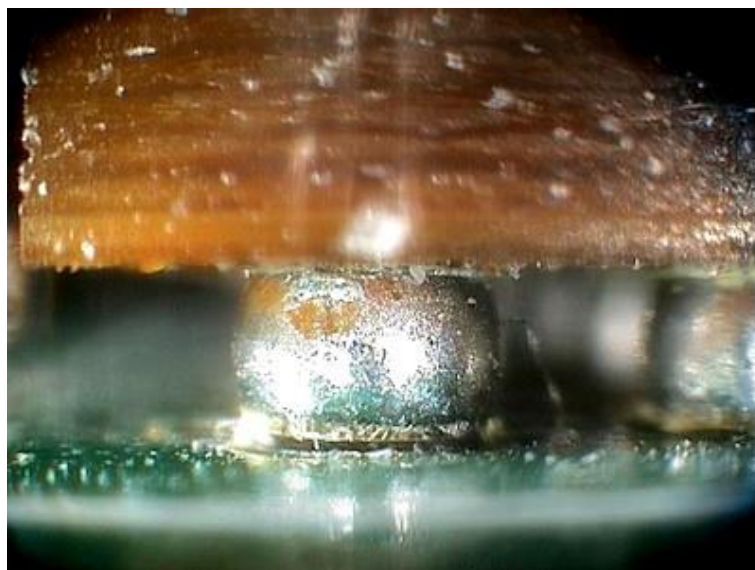
Obrázek 22 Prasklý kontakt



Obrázek 23 Rentgenový snímek prasklých kontaktů [15]

Odloupnutá ploška

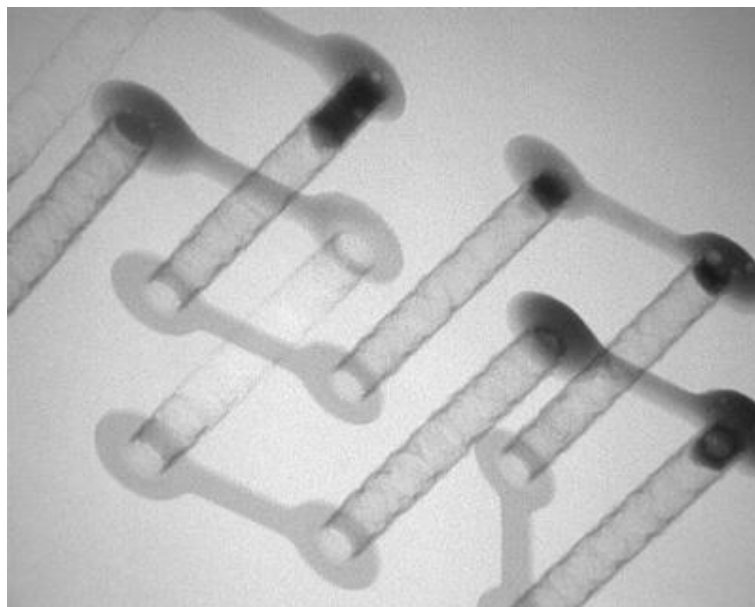
K odloupení plošky vodivé cesty může dojít při pájení vysokou teplotou, kdy dojde k delaminaci vodivé cesty od základního materiálu, nejčastěji z epoxidové pryskyřice plněné skelnou tkaninou. K závadě může dojít již při výrobě DPS, kdy příčinou nedostatečné laminace vodivé vrstvy nedojde k úplnému spojení. Tato chyba se může zhoršit při pájení, kdy teplotním pnutím dojde k narušení vazby. Jakmile dojde v provozu elektrické sestavy k mechanickým vibracím, místo, kde není měď spojená se základním materiálem se bude zvětšovat a může dojít k odtržení, případně může způsobit zkrat.



Obrázek 24 Odloupnutá ploška od základního materiálu [15]

Vady pokoveného otvoru

U pokoveného otvoru je třeba dostatečná vodivá vrstva, která vodivě propojuje různé vrstvy DPS. V případě špatného pokovení může dojít k přerušením, jsou-li po celém obvodu pokoveného otvoru, dojde k nevodivému spojení. Vada pokoveného otvoru může vzniknout i později v procesu výroby, kde může dojít k přetržení vodivého spojení.



Obrázek 25 Nerovnoměrně pokovený otvor (xray snímek) [15]

Diagnostika takového problému je velmi obtížná, je třeba vytvořit materiálografický výbrus a probrousit se do průměru vodivého odporu, kdy je možné při optickém pozorování defekt zaznamenat. Přítomnost těchto chyb je způsobena již při vrtání otvorů v nepokovené

desce, kdy při špatné rychlosti vrtáku, jak rychlost průniku, tak rychlost otáček, způsobí proces roztržení materiálu a dá prostor vzniku nerovnoměrného pokovení.

2.3 Vady materiálu

Tato třetí kategorie zahrnuje chyby materiálů vyjma mědi a pájky. Takže se jedná o základní materiály součástek a nosnou část kompozitního materiálu DPS.

Prasklé součástky

Závada prasknutí součástky může být zřetelná na povrchu, ale může se nacházet i uvnitř komponentu. K prasknutí může dojít díky pnutí materiálu při pájení způsobeném rozdílnou teplotní roztažností.

Bodová/vláknová delaminace

Tato vada se projevuje bílými místy v laminovaném materiálu desky. Tyto bílé fleky se mohou objevit v případě, že během procesu výroby dojde k nevhodnému nanesení polymeru při laminování vrstev. Takže se skelná vlákna nespojí dostatečně s polymerem a v desce vzniknout voidy. V malém množství vada nemusí mít na elektrické vlastnosti desky žádný vliv, ale ve větším množství narušuje elektrickou pevnost a může způsobovat vlhnutí desky. Může se také objevit až později kdy dochází k mechanickému namáhání desky.[24]

Delaminace/puchýře

Tato vada vzniká u desek plošných spojů. Jedná se, jak již název vypovídá o vypoukliny v desce vypadající jako puchýře, které jsou způsobeny delaminací vrstev nosného materiálu, vodivé folie, nebo nepájivé masky. Vada může vznikat za přítomnosti vlhkosti při výrobě, kdy se nahromadí vlhkost uvnitř vrstev a při následném pájení může dojít k odpařování, které způsobí odtržení vrstev. Další příčiny vzniku vad jsou nečistoty, nevhodný materiál, nebo i použití nevhodného tavidla. [24]

3 Diagnostika elektronických sestav

Diagnostika posuzuje vlastnosti elektronických sestav, slouží k identifikování vadných částí, případně k potvrzení funkčnosti sestavy. Tato problematika je ale velmi individuální, v případě, že se jedná o vadu, která se v momentě diagnostiky neprojevuje nefunkčností sestavy, je těžké odhadnout, jestli bude v budoucnu způsobovat problémy či nikoliv. Z tohoto důvodu je zde norma IPC-A-610, která slouží jako návod při diagnostice vad a posuzováním jejich vlivu na činnost. V kapitole 3.1 jsou uvedeny základní pravidla psané normy, podle kterých se rozdělují vady a třídy elektronických sestav. Další kapitoly se již věnují obecné problematice diagnostiky za pomoci destruktivních a nedestruktivních metod.

3.1 Kritéria přijatelnosti elektronických sestav

Jedná se o nejpoužívanější standard pro posuzování kvality montáže elektronických sestav. Dokument obsahuje kritéria přijatelnosti pro výrobu a diagnostiku elektronických sestav. Obsahem dokumentu nejsou postupy a operace prováděné při montáži. Jedná se převážně o charakteristiky značící minimální přijatelné stavy při provádění finálních kontrol. Norma specifikuje kritéria přijatelnosti jako cílový stav, přijatelný stav, závadový stav, aj. [25]

Norma klasifikuje výrobky do třech kategorií podle důležitosti na udržení funkčnosti výrobku. **Třída 1** je základní kritérium u které je požadavek na funkčnosti elektronické sestavy. **Třída 2** požaduje od výrobků schopnost nepřetržitého provozu a prodloužené životnosti, ačkoliv tento požadavek není kriticky důležitý. Do **Třídy 3** spadají výrobky které slouží k záchraně a udržení života, případně jiných podobně kritických případech. Elektronická sestava proto musí poskytnout nepřetržitý výkon a spolehlivost i v nepříznivém prostředí. Dalším hlavním vymezením v obsahu normy je výraz „**musí**“, který stanovuje pravidla pro výrobce, dále se požadavky vyhodnocují jako **Přijatelný**, **Indikace odchylky** a **Závada**. [25]

Každá třída dále stanovuje čtyři úrovně kritérií. **Cílový stav**, **Přijatelný stav** a buď **Závadový stav**, nebo **Stav indikace odchylky**. Cílový stav je ideální stav, který nemusí být vždy dosažitelný, přijatelný stav počítá s určitými odchylkami, ale zajišťuje stabilitu a spolehlivost sestavy. Závadový stav se stanovuje nesplněnými požadavky výrobce daných v potřebné dokumentaci, tento výrobek je dále určen k přepracování, opravě, nebo vyřazení.

Závada se automaticky přepisuje do tříd vyšších kategorií. Poslední úroveň kritérií specifikuje stav, který nemá vliv na rozměry, sestavitelnost nebo funkci výrobku ale, naznačuje možnou vznikající chybu v procesu a doporučuje identifikování problému, než odchylka překročí stanovenou mez. [25]

Norma dále definuje pojmy, pro orientaci desky k rozlišení stran, studený spoj, elektrická izolační vzdálenost, vysoké napětí, intruzivní/kapilární pájení, difuzní rozpouštění, meniskus (na komponentu), nefunkční ploška, vývody v pastě, průměr drátu, nadměrné ovinutí drátu a překřížení ovinutého drátu. [25]

Norma dále uvádí ilustrace jednotlivých problémům k pomoci při interpretaci. Specifikuje metodiku kontroly, způsoby ověření rozměrů a jaké jsou vhodné pomůcky, a hlavně podrobnosti osvětlení při vizuální kontrole. Norma popisuje vhodnou manipulaci se vzorky elektronických sestav a prevenci proti elektrostatickému výboji a elektrickému přetížení.

3.2 Diagnostika za pomoci výpočetní tomografie

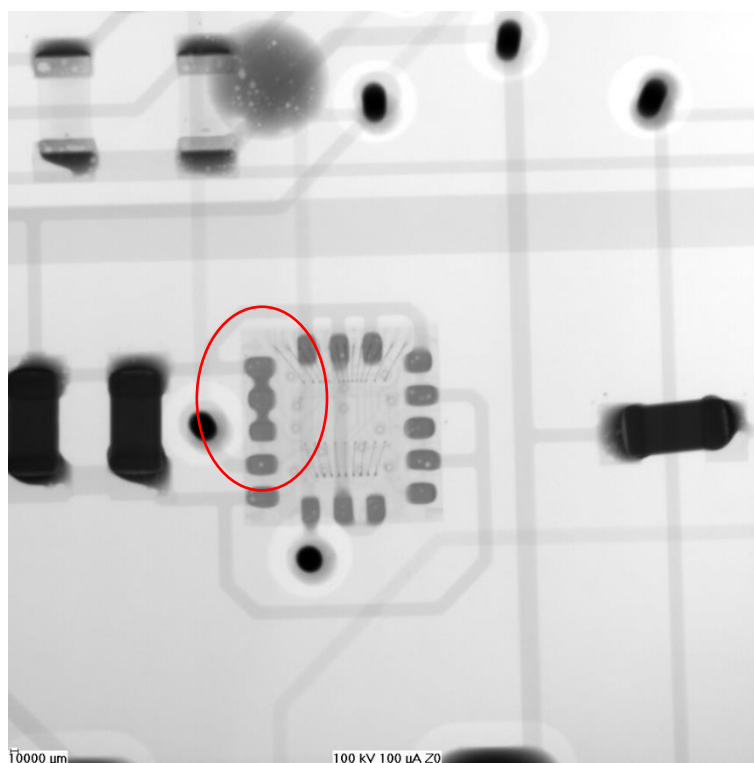
Základní princip rentgenů umožňuje ve 2D prostoru nahlédnout pod objekty, kde je mikroskopie „slepá“. V souvislosti se zvyšováním integrace součástek se hledají cesty, jak zmenšit rozměry komponentů a optimalizovat jejich kontaktování. Přejít z THT komponentů na komponenty SMD, miniaturizace pinů u pouzder integrovaných obvodů, kdy se místo vnějšího vyvedení pinů, vytvoří kontakty ukryté pod pouzdem. Ať už se jedná o typ pouzdra QFN, kdy jsou kontakty ukryté po obvodu, nebo typ BGA, který má kontakty v mřížce ukryté pod celou plochou pouzdra. U těchto komponent nám optické pozorování za pomoci mikroskopie nepomůže. Jestliže není možné z například finančních důvodů pro kontrolu desky použít destruktivní metody diagnostiky, přichází v úvahu jediné řešení a tím je rentgenová diagnostika. [26]

Obecně někdy stačí využití 2D zobrazení rentgenových snímků, v složitějších případech přichází na řadu výpočetní tomografie. Tato metoda je oproti standardnímu 2D zobrazení jak finančně, tak i časově, či personálně náročnější. Oproti jednomu snímku je při skenování objektu třeba získat snímky tisíc, někdy i více, podle typu tomografu.

V dalších kapitolách budou popsány konkrétní defekty, na které je výpočetní tomografie vhodná či nikoliv. Toto je důležité mít na paměti před jakoukoliv diagnostikou, protože jak již bylo zmíněno, výpočetní tomografie není levná záležitost.

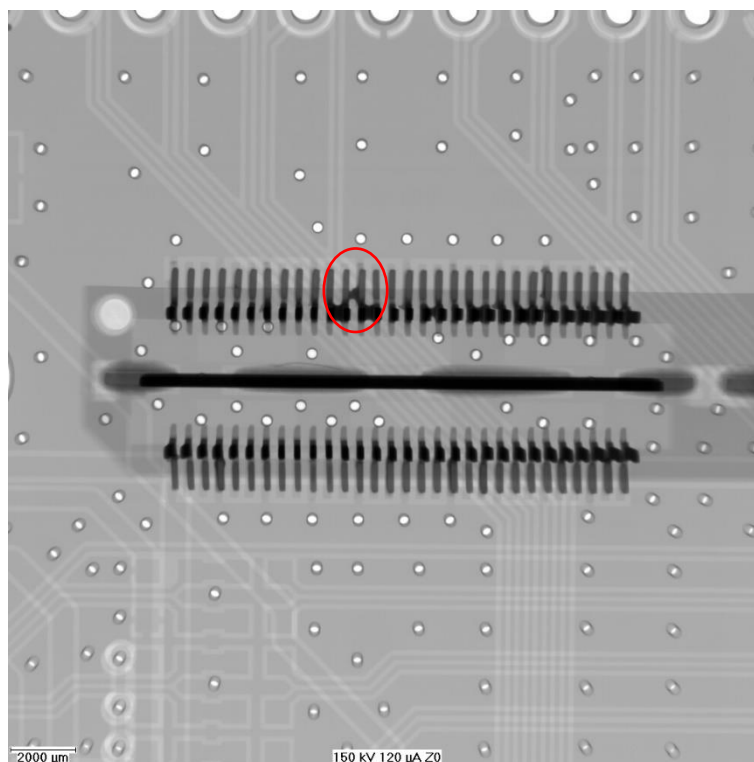
3.2.1 Vady identifikovatelné za pomoci RTG a CT

Jeden z častých defektů, se kterým je možné se setkat jsou zkraty při pájení. V tomto případě dojde většinou vlivem většího množství pájky či pájecí pasty ke smáčení dvou kontaktů a tím vznikne přes nepájivou masku most z pájky. Tato vada je poměrně snadno identifikovatelná v případě pájení komponent s vyvedenými kontakty, ale v případě pouzdra typu QFN je tento defekt bez použití rentgenové diagnostiky nemožné identifikovat.



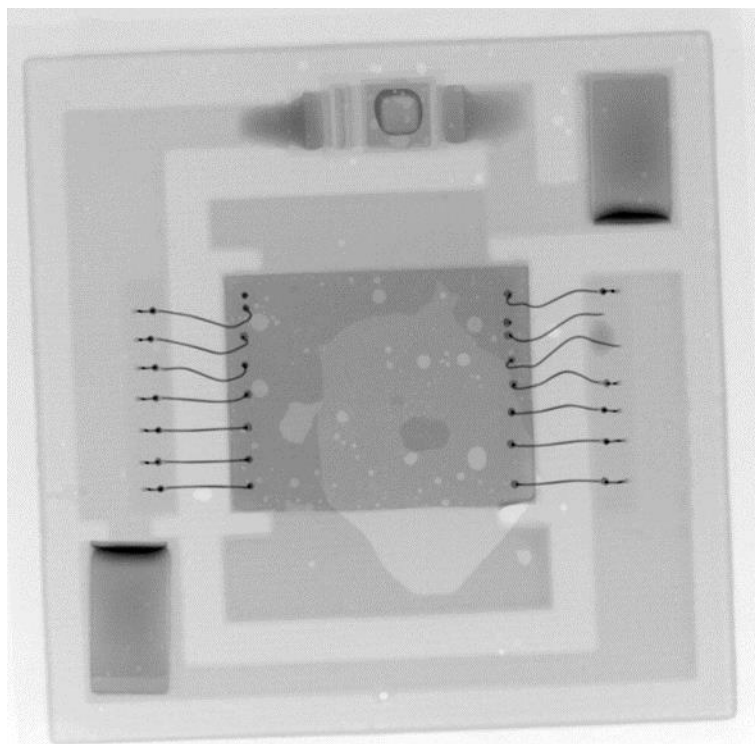
Obrázek 26 Rentgenový 2D snímek zkratu mezi kontakty pouzdra typu QFN

U pouzder s vyvedenými kontakty mohou také vznikat zkraty skryté před optickou diagnostikou (viz Obrázek 27)



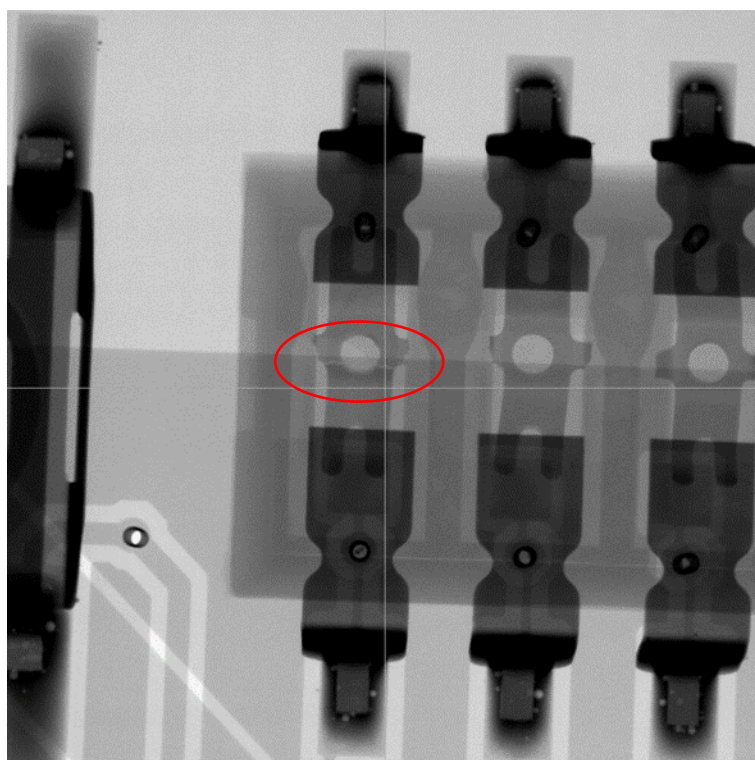
Obrázek 27 Rentgenový 2D snímek zkratu mezi kontakty pouzdra a vyvedenými kontakty

Další skrytou vadou, na kterou stačí 2D rentgenová diagnostika je kontaktování uvnitř pouzder, tato věc by se neměla týkat koncových zpracovatelů komponentů, kteří tvoří elektronické sestavy. Problém je ale v největším dodavateli elektronických komponentů Číně. V dnešní době je kladen největší požadavek na cenu, ta ale sebou nese mimo výrobu další procesy kontrol, které v případě minimalizace nákladů nebývají stoprocentní. Proto je možné se setkat například s nekvalitním bondováním, které je opět možné diagnostikovat za pomoci rentgenu.



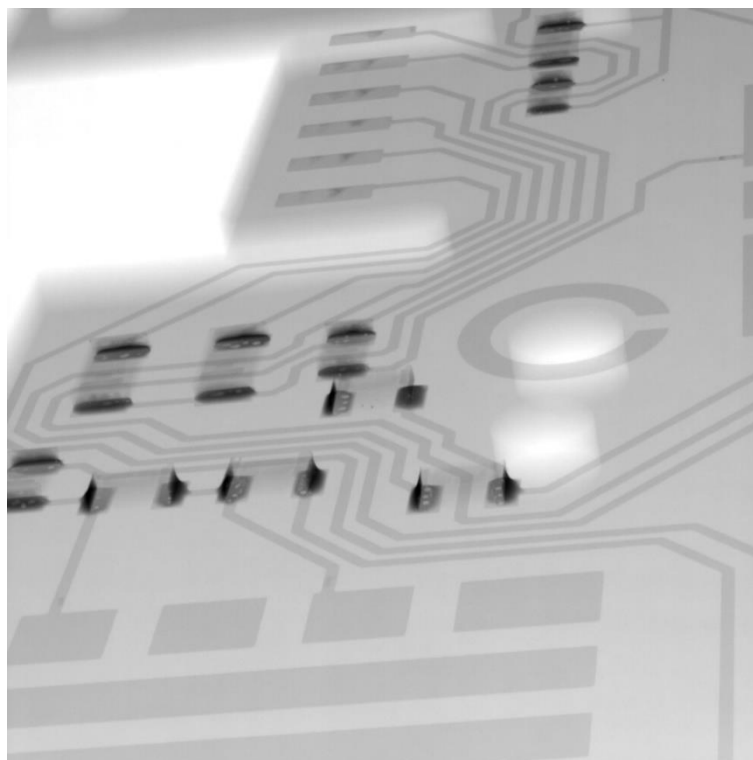
Obrázek 28 Rentgenový 2D snímek bondování

Defekty, u kterých není potřeba přímo výpočetní tomografie jsou voidy v pájce, nebo různé přerušené kontakty, ať už je to prasklý kontakt v pouzdře, prasklá vodivá cesta uvnitř vícevrstvé DPS, nebo problémy s prokořenými otvory (Obrázek 25).



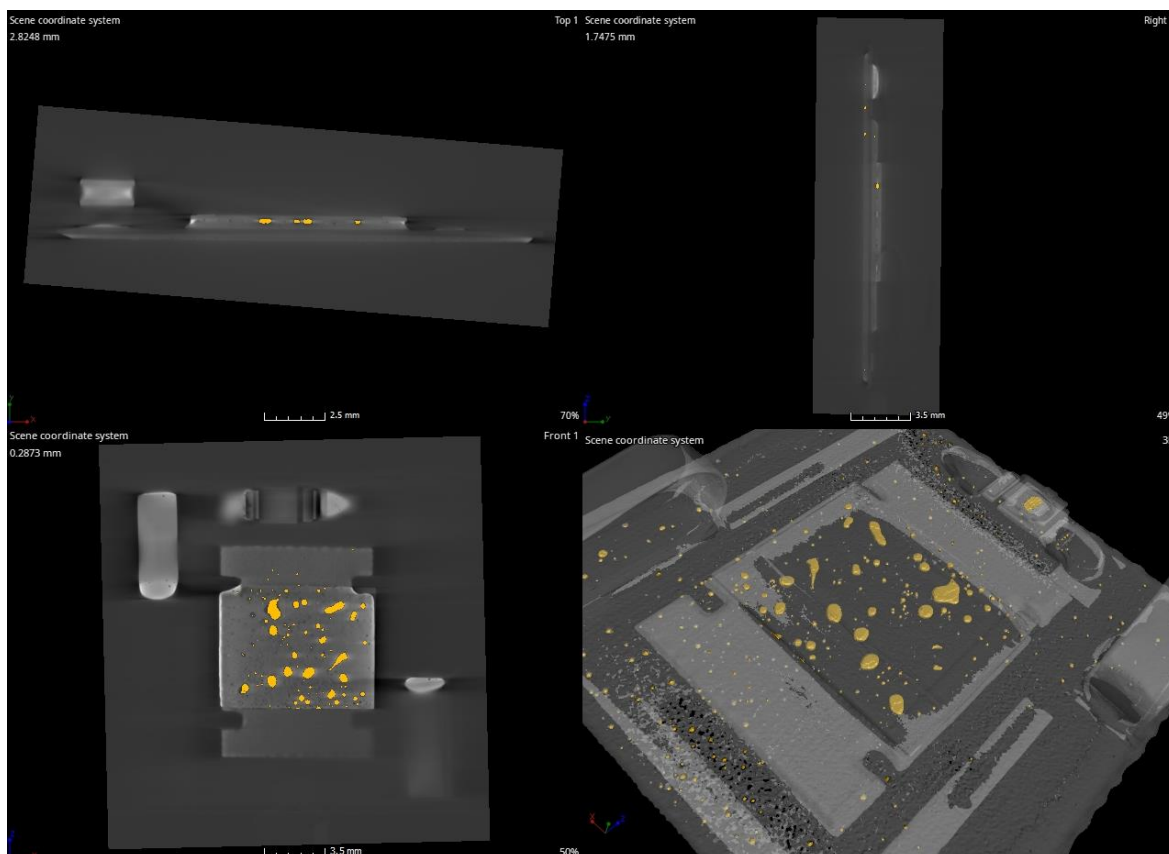
Obrázek 29 Rentgenový snímek s vyznačeným prasklým kontaktem

Na dalším obrázku je možné vidět voidy v místech pájky, komponent zde není prakticky vidět, protože hustota materiálu součástky je velmi nízká oproti pájce.



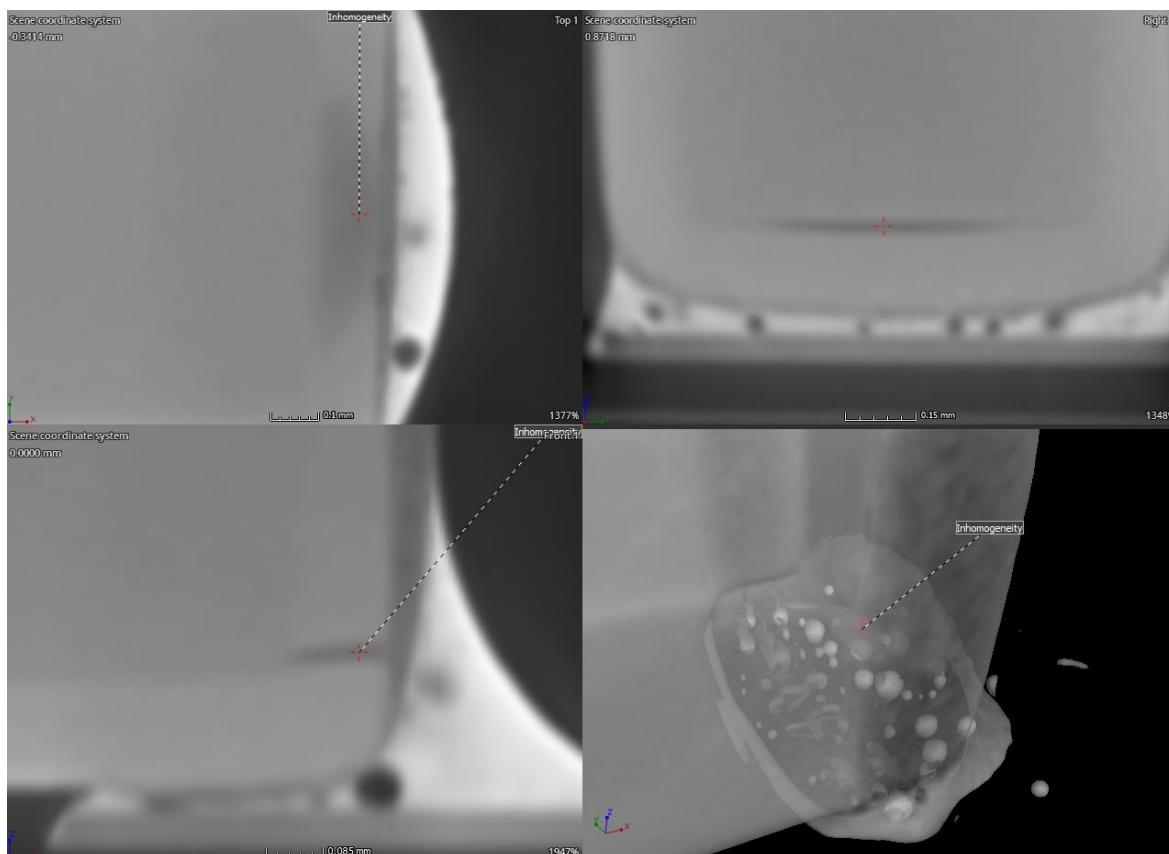
Obrázek 30 Rentgenový snímek pájených SMD komponentů

V případě složitějších problémů, případně potřeby dalších analýz sledovaných elektronických sestav je třeba přejít na výpočetní tomografii. Obecně je 2D rentgenová diagnostika vhodná pouze pro zobrazení a identifikaci problémů, v případě dalších požadavků je již nedostatečná. V případě voidů umožňuje software pro zpracování různých analýzy naskenovaných objektů, jako například analýzu voidů, kde software rozpozná místa s menší hustotou a dokáže je identifikovat jako voidy, kdy jeho výstupem je seznam identifikovaných voidů, díky tomu je možné zjistit jakou plochu voidy v pájce zabírají, jejich počet, nebo jejich jednotlivé objemy.



Obrázek 31 Analýza voidů v pájce pod čipem

Jiný příklad diagnostiky defektu je na obrázku dole, u kterého je možné identifikovat prasklinu uvnitř součástky. Prasklina se jeví jako tmavší oblast, kdy nejspíše došlo vlivem chlazení komponentu po pájení k teplotnímu pnutí a prasklině na přechodu dvou materiálů, že se jedná o dva materiály uvnitř komponentu se dá poznat díky rozdílnému odstínu šedé v jádře komponentu. Prasklina je přesně na pomezí těchto dvou odstínů.

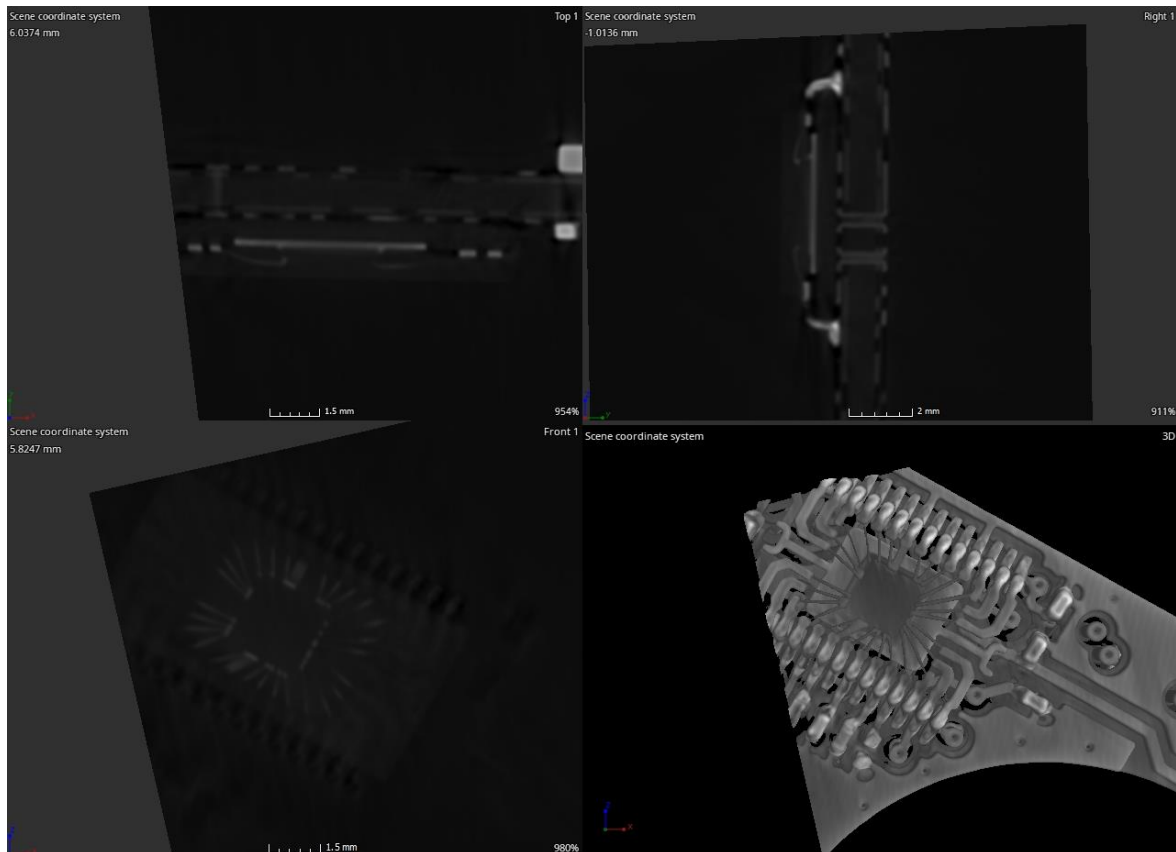


Obrázek 32 Prasklina uvnitř komponentu

Tento typ defektu by bylo velmi obtížné identifikovat za pomoci materiálografického výbrusu (destruktivní metoda), protože při broušení je ideální vědět do jaké roviny je třeba se probrousit, bez těchto informací broušení probíhá čistě náhodně a velmi snadno může dojít k probroušení.

3.2.2 Vady problematicky identifikovatelné za pomoci CT a RTG diagnostiky

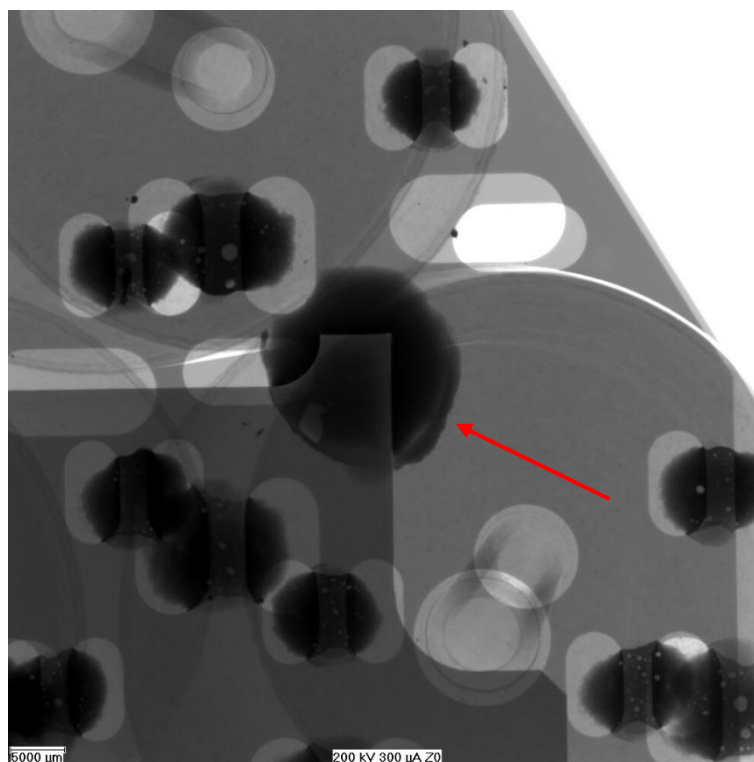
Obecně se při použití výpočetní tomografie udává, že se jedná o nedestruktivní diagnostiku. Zde je třeba specifikovat, že ne v každém případě je možné tuto diagnostiku použít bez potřeby oddělit část vzorku s oblastí zájmu. Výpočetní tomograf má určité rozlišení a velikost detektoru, tento fakt je v praxi limitující. Rozlišení a s tím související kvalita skenu je závislá na přiblížení k detektoru, v případě že se jedná o velký vzorek je s přiblížením k detektoru problém, protože princip skenování je závislý na rotaci vzorku. Zde jde hlavně o velikost defektu a požadavky zákazníka ke konkrétnímu problému, v některých případech není nutné tak vysoké rozlišení.



Obrázek 33 CT sken detailu bondování

Rozlišení detektoru u výpočetního tomografu hraje velkou roli. Při rekonstrukci modelu se mohou spojovat detaily a tím pádem je výsledek částečně znehodnocen.

Určité problémy má využití rentgenu i při diagnostice připájených kontaktů, někdy je možné utržený kontakt identifikovat na první pohled tak, že v místě pájky je znatelný průsvit. Zde ovšem velmi záleží na natočení skenovaného objektu, když je defekt známý a je potřeba jej identifikovat, je snazší si najít úhel který dokáže, že se jedná o prasklinu. Ale jakmile není specifikováno co hledat, najít konkrétní problém není snadné. Zde má vliv i velikost a upevnění objektu.



Obrázek 34 Održený pájený spoj

Na obrázku výše je možné vidět u rozlité pájky jemný stín v okraji, díky kterému je možné identifikovat odtržení pájky. Problém je při pohledu na ostatní spoje, které se odtrženě nezdaří, ale v případě že se odtrhne celá plocha pájky, tak v pohledu kolmo není nic poznat. Zde by bylo možné zjistit odtržení při bočním pohledu, bohužel v této rovině budou vidět všechny ostatní spoje v zákrytu, mezi které se defekt snadno ztratí.

3.3 Diagnostika za pomoci destruktivních metod

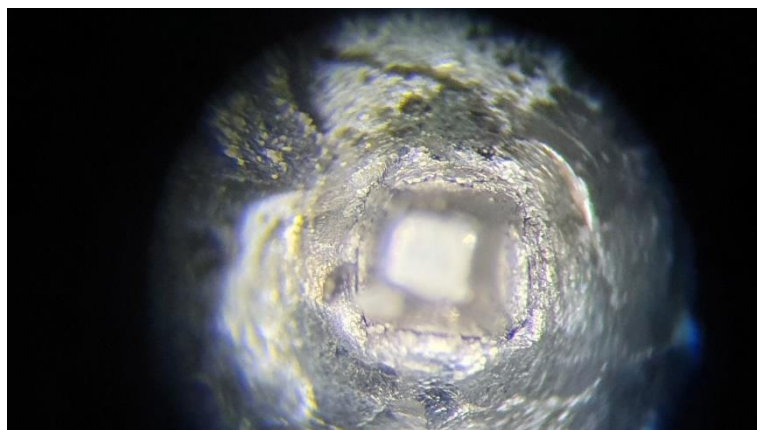
Obecně se jako destruktivní metody považuje to, že je zcela nebo jen částečně narušena integrita elektronické sestavy. Tím je myšleno, že pro diagnostiku je třeba vyříznout oblast, kde se vyskytuje chyba. Díky čemuž je možné bližší prozkoumání. Jako hlavní destruktivní metoda je použití materiálografických výbrusů, které nám umožní pohled v řezu v jakémkoliv místě elektronické sestavy. Nejčastější oblast pozorování za pomoci materiálografických výbrusů jsou pájené spoje, ve kterých se zjišťují defekty pájení, jako jsou voidy, zkraty, studené spoje nebo praskliny. Tyto defekty mohou být způsobeny např. stavem intermetalických vrstev.

Intermetalická vrstva vzniká na přechodu mezi pájkou a smáčeným kontaktem. Formuje se procesem rozpouštění a migrace dvou různých kovů, většinou se jedná o cín v pájce a

měď v kontaktu. Intermetalická vrstva má jiné vlastnosti než cín, je křehká, tvrdá a její tepelná vodivost je nízká. Dle těchto vlastností lze usoudit, že intermetalické vrstvy jsou nežádoucí vlastností pájení, ale bez intermetalických vrstev by nevznikl pájený spoj, protože intermetalická vrstva vytváří prostor pro pevný a spolehlivý pájený spoj. Problém nastává, když se zvětší tloušťka intermetalické vrstvy, v tu chvíli vynikají negativní vlastnosti a stabilita pájeného spoje klesá. Tloušťka intermetalické vrstvy roste s dobou přetavení pájky, je závislá na teplotě pájky a její růst je také způsoben stárnutím elektronické sestavy. [27]

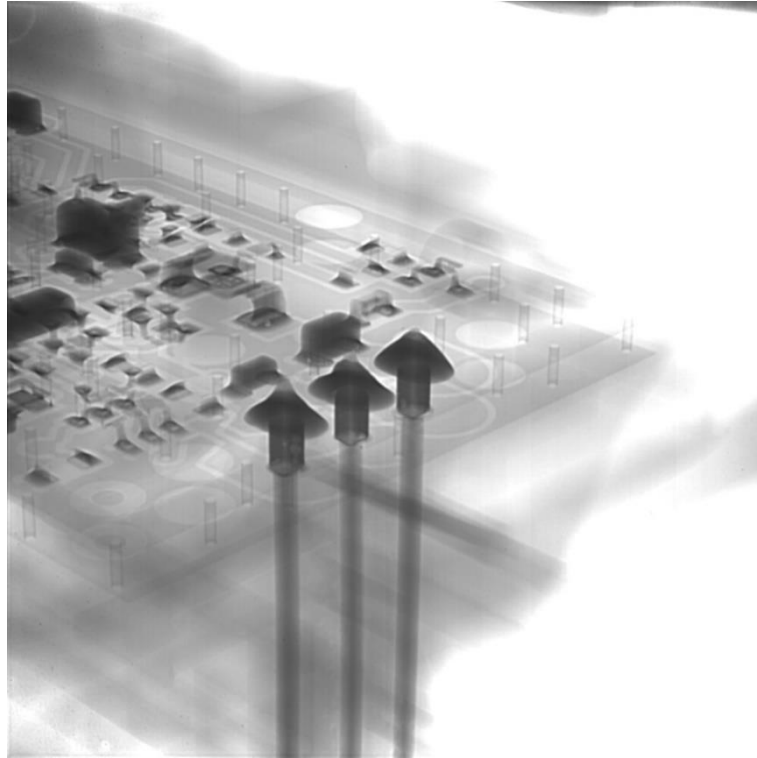
3.3.1 Vady diagnostikovatelné za pomoci materiálografických výbrusů

Defekty pájených spojů jako jsou praskliny v oblastech přechodu mezi kontaktem a pájkou mohou být zřetelné už při vizuální kontrole za pomoci mikroskopie na povrchu pájených spojů. Tento defekt, znázorněný na obrázku dole nevypadá na první pohled tak vážně, praskliny v pájce jsou sice nežádoucí, ale jejich rozsah může být lokální a nemusí mít příliš velký vliv na stabilitu sestavy.



Obrázek 35 Prasklina v okolí zapájeného pinu v prokoveném otvoru

Při diagnostice defektu za pomoci použití rentgenu se prasklina nemusí vůbec projevit, malé rozměry praskliny nejsou na rentgenových snímcích vůbec patrné.



Obrázek 36 Rentgenový snímek zapájeného pinu v prokoveném otvoru

Obrázek 36 nejeví žádné známky praskliny, žádný průsvit v pájení není znát. Zde je nutné použití materiálografických výbrusů. Materiálografický výbrus se tvoří tak, že se oddělí část elektronické sestavy s požadovanou oblastí zájmu a zaleje se v akrylové či epoxidové pryskyřici. Po vytvrzení je třeba se za pomoci sad brusných papírů probrousit do roviny, ve které je možné pozorování intermetalických vrstev uskutečnit. Díky tomu je možné zjistit, že defekt je extrémní (viz Obrázek 37)



Obrázek 37 Materiálografický výbrus zapájeného pinu

Zde je možné pozorovat prasklinu po celé délce zapájeného pinu. Tato prasklina mohla být způsobena vibracemi, kdy došlo k odtržení v oblasti intermetalických vrstev, nebo také vlivem teplotní roztažnosti různých materiálů. Když se detailně podíváme na prasklinu, tak se dá odhadnout, že k přetržení došlo v přechodu intermetalické vrstvy a pájky (viz Obrázek 38)



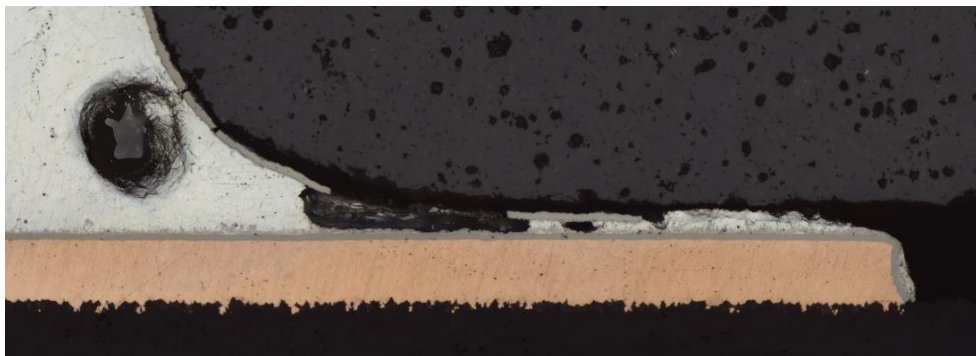
Obrázek 38 Detail praskliny zapájeného pinu

Měření a diagnostika intermetalických vrstev se bez použití destruktivních metod neobejde. Diagnostika probíhá, jak je již výše uvedeno za pomoci materiálografických výbrusů.



Obrázek 39 Materiálografický výbrus pájeného spoje (intermetalické vrstvy)

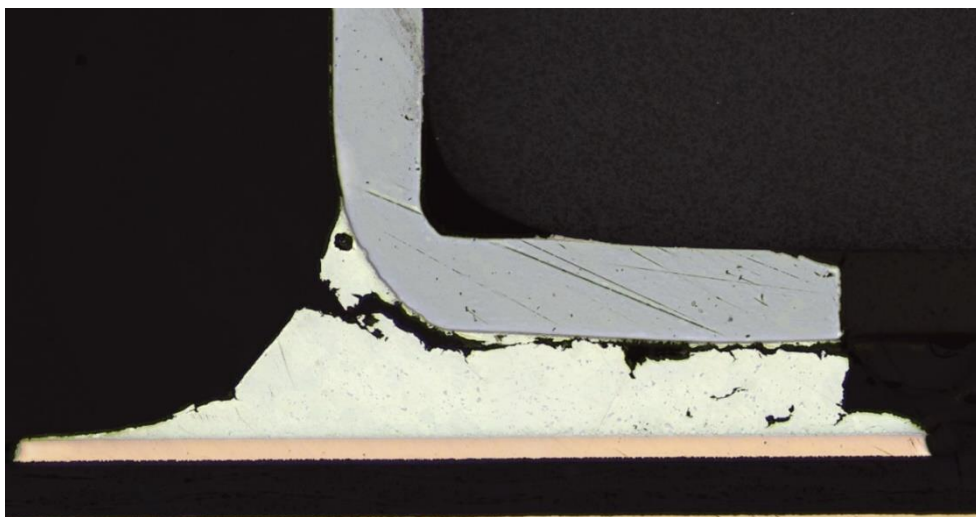
Na obrázku nahoře je vidět materiálografický výbrus jedné strany pájeného spoje, už v náhledu je patrné, že mezi mědí a pájkou vyniká tmavší vrstva. Tento pohled na intermetalickou vrstvu za pomoci výpočetního tomografu prakticky není možné získat, kontrast mědi, pájky a intermetalické vrstvy je sice velmi nízká, ale v okolí je spousta dalších typů materiálů, jejichž kontrast je naopak velmi vysoká. Docílit tak velkého detailu CT skenu by se bez vyříznutí pozorované oblasti neobešlo, čímž se ztrácí význam výpočetního tomografu jako nedestruktivní diagnostiky.



Obrázek 40 Detail intermetalických vrstev

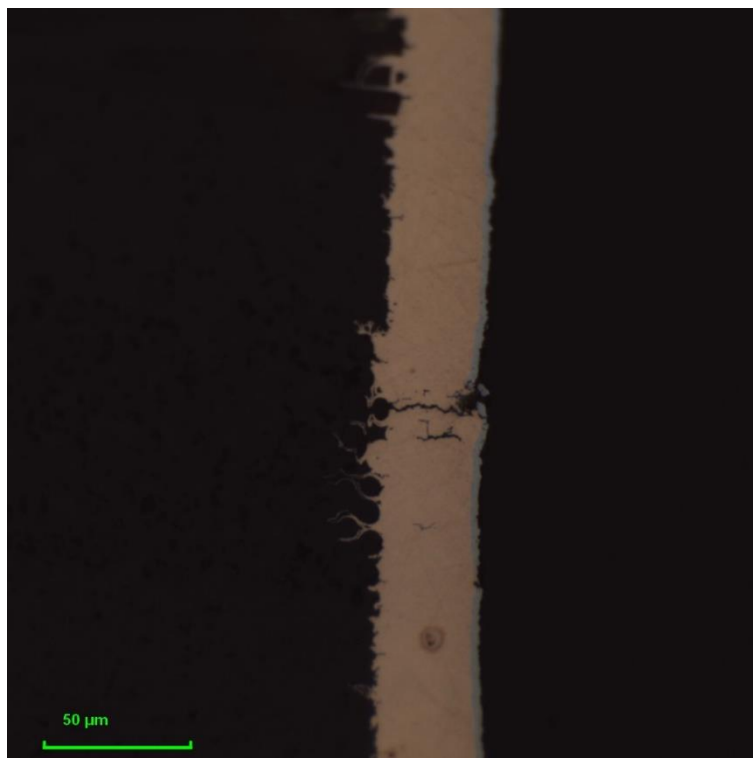
Jak je již výše zmíněno, negativní vlastnost intermetalických vrstev je křehkost. Na obrázku nahoře je patrné, že intermetalická vrstva drží v oblasti voidů částečně pohromadě a místy je vidět že vrstva chybí nebo je prasklá. Toto je způsobeno jak tloušťkou intermetalické vrstvy, tak přítomností voidů v pájce.

Na dalším obrázku je zřetelná extrémní prasklina pájeného spoje podél kontaktu součástky, tento defekt by se dal zjistit i za pomoci výpočetního tomografu. Prasklina je pravděpodobně způsobena nadměrným namáháním (zkouška teplotní změnou), nebo hnutím součástky při nedostatečně vychladlé pájce. Vliv na tento defekt mohou mít i voidy v pájce.



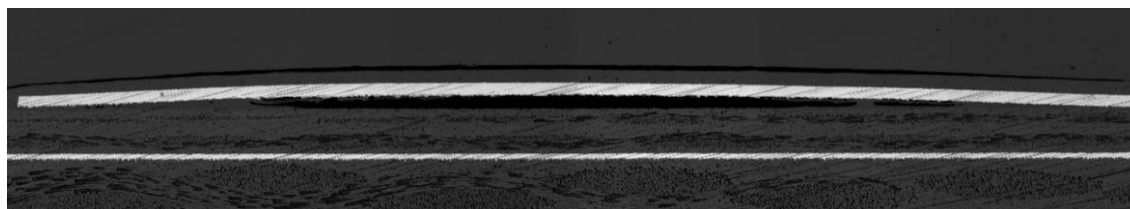
Obrázek 41 Odtržený kontakt

Co se týče diagnostiky defektů v prokovených otvorech, tak je materiálografický výbrus nejlepší řešení. Při srovnání s nedestruktivní metodou za pomoci rentgenového záření je obecně možné u výbrusů získat mnohem větší detail než z rentgenových snímků, protože výpočetní tomograf nemůže zajistit srovnatelnou kvalitu s optickým mikroskopem. Při pozorování materiálografických výbrusů je možné využít i elektronových mikroskopů, které umožňují až 100 000x zvětšení. Na obrázku níže je vidět mikroskopická trhlinka v prokoveném otvoru, kterou by standardní výpočetní tomograf nezaznamenal.



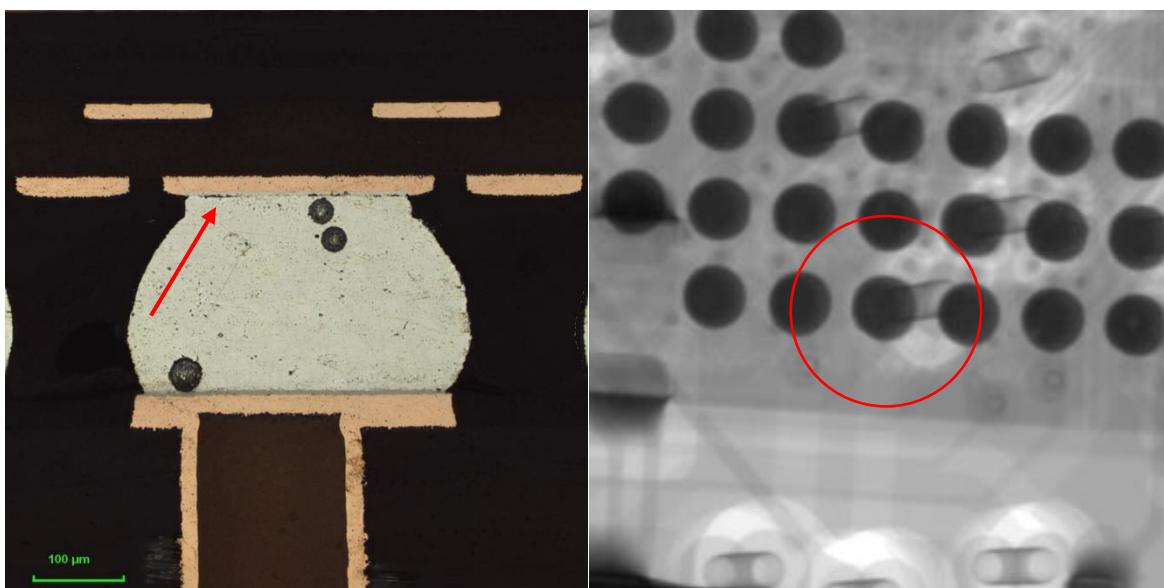
Obrázek 42 Prasklý prokovený otvor

Diagnostika defektů jako je delaminace desky plošných spojů se dá odhalit již při optickém pozorování povrchu desky, pro bližší analýzu jako je zjištění rozsahu odlepení vrstev, nebo její výšku, je ideální použití materiálografického výbrusu. Tato deska, případně celá elektronická sestava již není vhodná pro další využití.



Obrázek 43 Delaminace DPS

Podobný problém jako u praskliny prokoveného otvoru je odtržení pájeného spoje na dalším obrázku, i podle výbrusu je prasklina nepatrná a na rentgenovém snímku neidentifikovatelná.



Obrázek 44 Prasklý pájený spoj na prokoveném otvoru (vlevo výbrus, vpravo rentgenový snímek)

3.3.2 Nevhodná diagnostika destruktivními metodami

Obecně není vhodné využívat destruktivní metody na funkční elektronické sestavy. Tato metoda je vhodná na zpětné zjišťování poruch a jejich rozsahu.

3.4 Srovnání

3.4.1 Výhody diagnostiky RTG a CT

Hlavní výhodou výpočetní tomografie je její schopnost nahlédnout do vnitřních struktur bez potřeby objekt rozebírat. V případě diagnostiky za pomoci 2D rentgenových snímků je výhodou rychlost získání informace a možnost automatizace detekce vad ve výrobních linkách. V případě 3D diagnostiky, je zase za pomoci observačních softwarů možné získávat měřitelná data, která jsou v případě objektivní diagnostiky zapotřebí.

Rentgenová diagnostika se tedy využívá pro kontrolování pájených spojů, které není možné vizuálně detekovat. Kontrolu voidů uvnitř pájených spojů, při výpočetní tomografii je možné získat prakticky totožné pohledy v různých řezech jako za pomoci materiálografických výbrusů. Další rychlou diagnostikou je pozorování přerušovaných kontaktů a vodivých cest, u prasklin v pájených kontaktech je toto pravidlo zavádějící. U malých prasklin záleží na rozlišení detektoru, aby byl schopen je rozpoznat, u větších

prasklin již není problém. Díky 3D rekonstrukci je možné identifikovat vady uvnitř materiálů komponentů, jako jsou různé delaminace, nebo praskliny součástek. V případě kontroly bondování stačí 2D RTG diagnostika.

3.4.2 Výhody destruktivních metod

Když vezmeme v potaz, že je možné sledovaný objekt zničit, tak hlavní výhodou destruktivních metod je jejich výsledná kvalita. K pozorování je možné použít mikroskopii, která díky optickému zvětšení umožňuje získat data bez digitálních ztrát. Tato metoda je oproti potřebě vlastnit rentgenové záření poměrně levná, poměrně myšleno z důvodu, že k zpracování materiálografických výbrusů jsou výhodou brusné stroje a k pozorování je za potřebí mikroskopie. Tyto zařízení jsou oproti pořízení výpočetního tomografu levnější.

Proto je možné identifikovat praskliny velmi malých rozměrů. Oproti výpočetní tomografii je možné pozorovat struktury intermetalických vrstev, které bývají příčinou různých problémů.

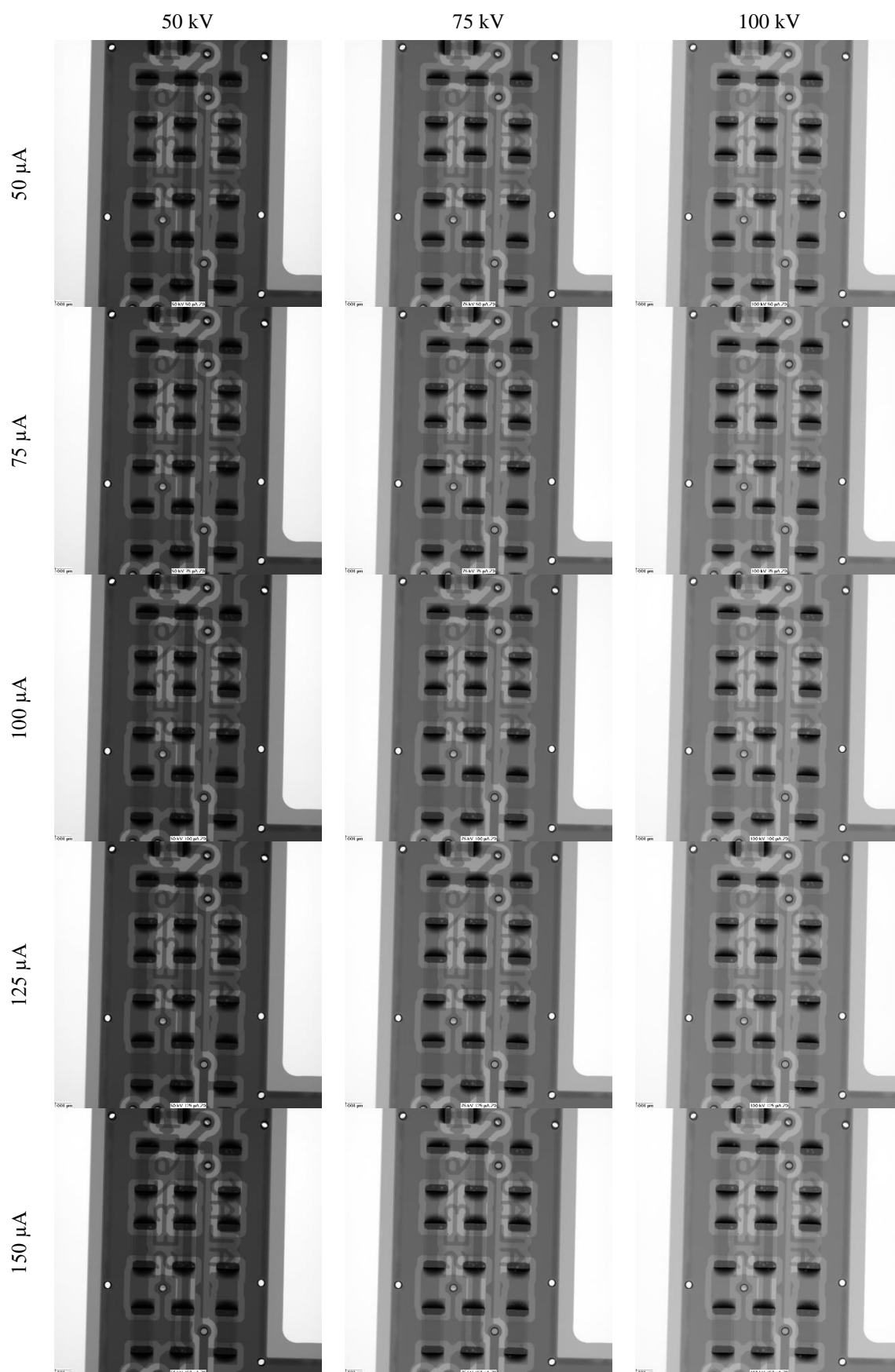
3.5 Parametry nastavení rentgenového záření

Při skenování má na kvalitu výsledku vliv nastavení výkonu rentgenové trubice. Na rentgenové trubici se zpravidla nastavují dva hlavní parametry, a to napětí a proud, těchto dvou parametrů se držíme. Další vedlejší parametry jsou doba expozice na jeden snímek a citlivost detektoru. U nastavování hodnot napětí a proudů je třeba se držet pravidla, že pro kovové objekty je třeba větší velikost napětí a nižší hodnota proudu, naopak u plastových předmětů je třeba nižší hodnota napětí a vyšší hodnota proudu.

Tyto pravidla vycházejí z potřeby držet co největší rozestup v histogramu mezi vzduchem a skenovaným objektem. Urychlovací napětí zlepšuje propustnost rentgenových paprsků objektem, z čehož vyplývá, že pro kovový materiál, který má zpravidla vyšší hustotu než plastový materiál, je potřeba vyšší napětí. Co se týče proudu, tak ten nám díky termoemisi udává množství vystřelených elektronů a dále fotonů rentgenového záření, díky čemuž získáváme ostřejší vizuální výsledek na detektoru. Do vyšších proudových hodnot se jde hlavně když je nízké urychlovací napětí, protože energie daná množství fotonů není tak velká, aby skrz objekt prostoupily až do detektoru v dostatečném množství, proto je třeba jejich množství zesílit.

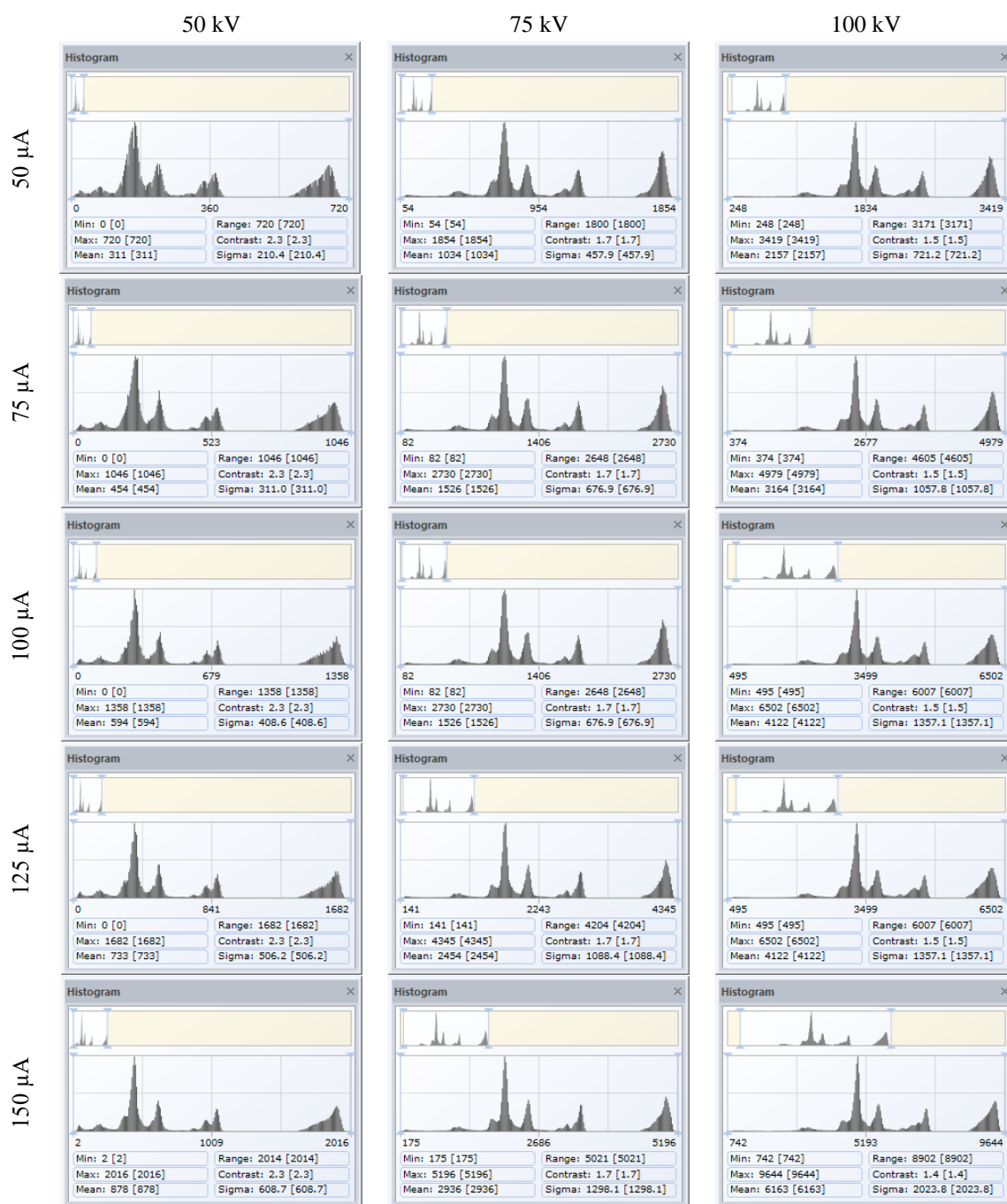
Z tohoto důvodu byl proveden experiment pro vizuální zobrazení vlivů nastavení jednotlivých výkonů rentgenové trubice na výsledný snímek z detektoru. Použité hodnoty byly voleny s pravidelným krokem, aby bylo možné získat určitou souvislost s jednotlivými změnami. Pro experiment byl zvolen vzorek osazené desky plošných spojů, kde je možné pozorovat odstíny měděných vodivých cest, postupný útlum odstínu černé u smáčené pájky a prakticky nezatelné odstíny součástek. Dalším výsledkem experimentu jsou histogramy pro jednotlivé nastavení, histogramy jsou získané ze stejného vzorku a za stejných podmínek. Histogram je velmi důležitý pro nastavení rentgenové trubice, díky čemuž získáme optimální obraz.

Na následující sérii obrázků je možné pozorovat změny v odstínech jednotlivých obrázků v závislosti na nastavení výkonu rentgenové trubice. V případě zvyšující se hodnoty napětí se snímek jeví jako světlejší, právě z důvodu snazšího prostupu rentgenových paprsků materiálem díky vyššímu urychlovacímu napětí. Změny v nastavení proudu nejsou tolik patrné, ale s vyšší hodnotou proudu se zlepšuje kvalita snímku.



Obrázek 45 Srovnání parametrů nastavení pro rentgenové zařízení

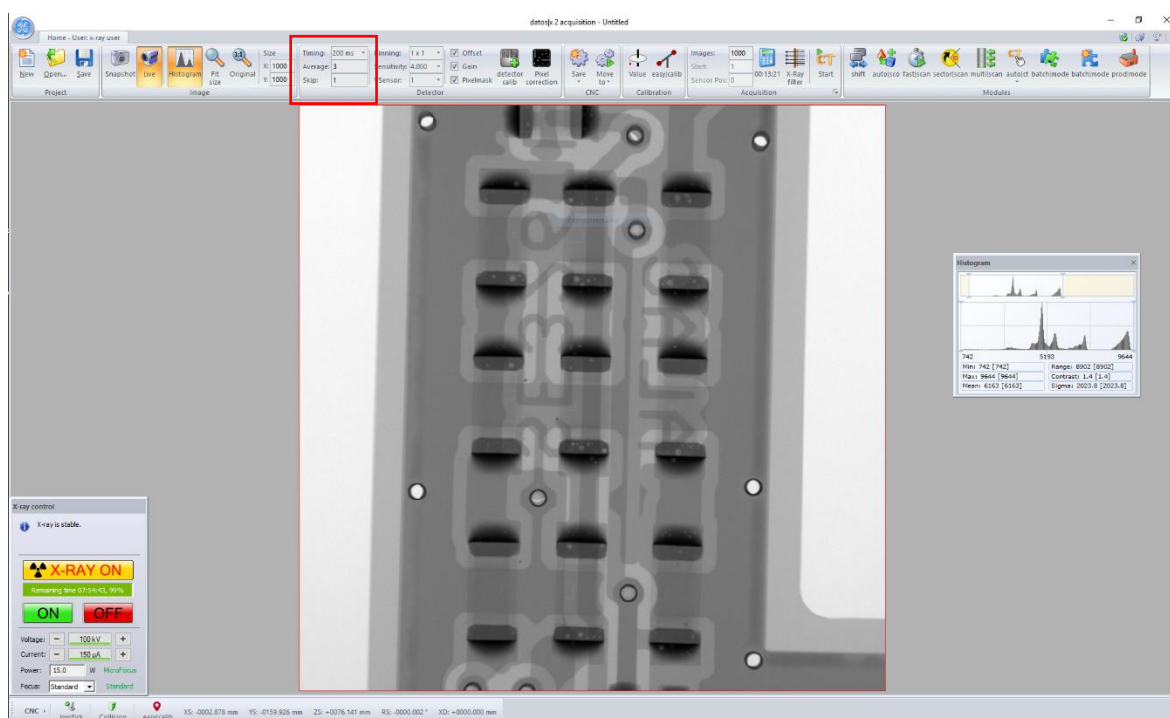
Na dalším snímku je možné pozorovat změny v histogramu snímku. Histogram udává množství jednotlivých složek materiálů, včetně okolního vzduchu. Při nastavování vhodných parametrů rentgenového trubice je tato informace nejdůležitější. V ideálním případě je třeba aby se nejmenší hodnota pohybovala kolem hodnoty 200 a nejvyšší kolem hodnoty 10 000. Tímto si zajistíme dostatečnou kontrast mezi vzduchem a nejhustším materiálem.



Obrázek 46 Srovnání parametrů nastavení pro histogramy rentgenových snímků

Při nejmenším výkonu je možné vidět, že minimální hodnota je v nule, což znamená že nedošlo k dostatečnému prosvitu všech materiálových částí v objektu. V tomto případě se jedná o pájené spoje, a další materiál s nedostatečným prostupem jsou vodivé spoje z mědi.

Při maximálním výkonu je patrné, že je rozsah maximálních a minimálních hodnot největší, což je žádoucí. Minimální hodnota je sice vyšší, než je doporučené, ale v praxi probíhá nastavování parametrů v jiné poloze natočení objektu, než je zde uváděno. Správně má být objekt natočený tak, aby byly všechny části modelu v zákrytu. Jinak řečeno v nejhůře prozářitelné podobě, což je při pohledu z boku. Tím zajistíme, že dojde k průsvitu i v té nejhůře poloze.



Obrázek 47 Rozhraní akvizčního softwaru pro CT (sw phoenix datasjx 2.0)

Jako vedlejší parametry nastavení výpočetního tomografu jsou označeny v obrázku nahoře. Parametr *Timing* udává dobu expozice jednotlivých snímků, tento parametr se zvyšuje v případě, že dochází ke skenování hůře propustných materiálů, díky delší době expozice je možné získat informaci i za použití menšího výkonu rentgenové trubice, ale na úkor doby skenování. S tím souvisí další parametry *Average* a *Skip*. Parametr *Average* udává z kolika snímků se počítá průměr jedné pozice natočení objektu a parametr *Skip* je zde pro obnovení vlastností scintilátoru v detektoru, aby nedocházelo ke vzniku stínů z předchozích snímků.

Další možnosti v rozhraní softwaru nemají tak velký vliv na výsledek skenu, ale je lepší je používat. *Detector calib* před skenováním softwarově vynuluje detektor, aby se zbavil defektů scintilátoru, které vznikají při každém skenování. Parametr *Images* zase určuje, kolik snímků se získá z modelu při otočení kolem své osy, hodnota 1000 znamená, že krok otáčení bude 0,36. Výsledný model se nemusí ani otáčet o celých 360°, k tomuto je další funkce pro velké objekty, že se model otáčí v menším úseku, aby nenarazil do rentgenové trubice.

Všechny tyto nastavení na sebe mají navzájem vliv a cílem obsluhy výpočetního tomografu je najít nejlepší kompromis mezi vším, aby výsledný model poskytl co nejvíce nezkreslených informací.

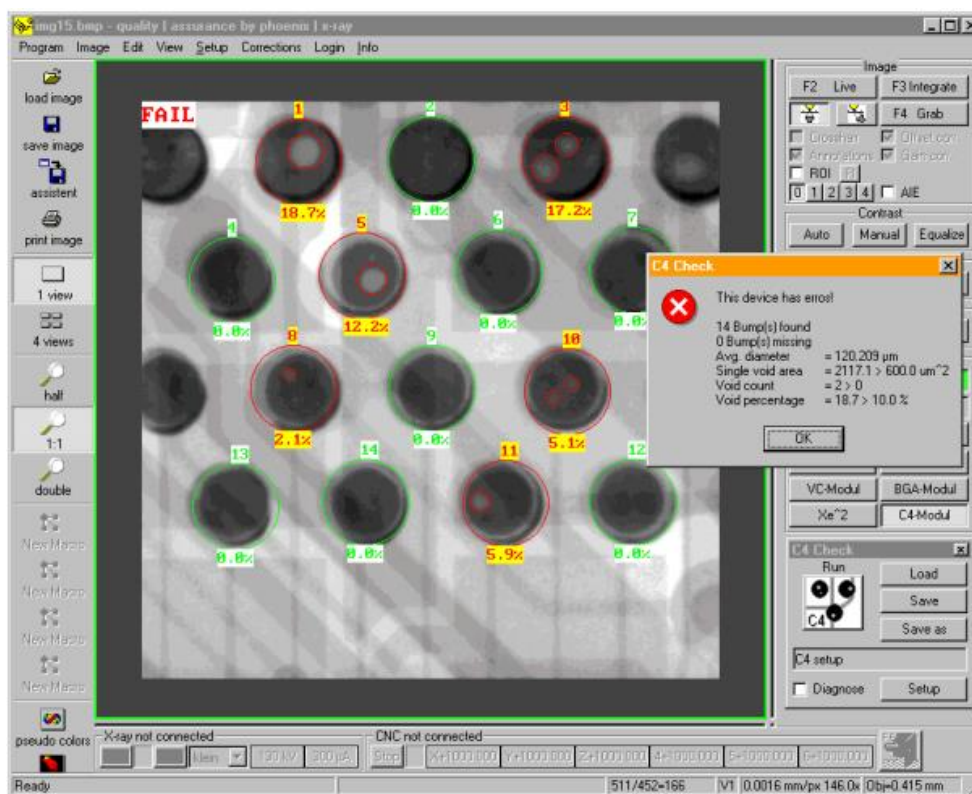
4 Praktické využití v průmyslu

Výpočetní tomografie se jak ve zdravotnictví, tak v průmyslu využívá již spoustu let. V podvědomí lidí je ale označení CT spojené spíše s nemocniční procedurou. V průmyslu je ale jeho potřeba při diagnostice stále důležitější. Největší roli zde hraje pořizovací cena, kterou si ne každá firma může dovolit. Z tohoto důvodu je výpočetní tomograf vhodnou investicí i pro externí firmy, jež mohou investici zpeněžit za pomoci zakázek. S pořízením výpočetního tomografu ale investice nekončí, pro zpracování výsledků z výpočetního tomografu je potřeba software umožňující práci s naskenovanými objekty. Vzhledem ke úzkému využití programu není jeho pořízení levné. V celkovém měřítku velmi málo firem využívající výpočetní tomografii a pro zaplacení vývoje je tedy logické, je nutné zaplatit větší část. Nehledě na další konkurenci, která si již tak malý trh dále dělí. V případě potřeby dalších funkcí, jako např. analýzu voidů, doplněk umožňující pozorování kompozitních materiálů vyztužených vlákny, jež dokáže identifikovat jednotlivá vlákna a jejich směry, nebo porovnat naskenovaný objekt s CAD modelem, jehož výsledkem je vizuální zobrazení rozdílů povrchových hodnot.

V dnešní době informačních technologií, jsou možnosti, jak zpracovat model prakticky neomezené. Jediný markantní požadavek jsou finance. Z tohoto důvodu je spíše poptávka po práci na výpočetním tomografu outsourcuje, než aby si jej firma pořídila.

4.1 X-ray diagnostika

Výpočetní tomograf obecně umožňuje práci ve 2D režimu, která není tak časově náročná a pro určité problémy stačí. V průmyslu se většinou jedná o rentgenové zařízení připojené k výrobnímu procesu desek, kde je možné automatizovat detekci jednotlivých oblastí a specifických poruch. Tyto zařízení využívají technologii AXI, což je automatizovaná xray inspekce. Software pro automatickou kontrolu je schopný provádět analýzu fází, která slouží pro změření podílu voidů vůči celé zapájené ploše, jež umožní automaticky označit nevhodně zapájené kontakty. Dále zvládá například automaticky identifikovat množství pájky v prokovených otvorech.



Obrázek 48 Kontrola pájených vývodů BGA pozder (sw phoenix datos/x)

Specifické moduly observačních softwarů zvládají automaticky identifikovat nezapájené vývody u BGA pouzder. Software zvládá vyhodnocovat vychýlení bondovaných drátků. Obecně veškeré defekty, jež se objevují dle nějakého vzorce, se dají za pomoci modelů odhadnout a identifikovat bez nutnosti zásahu člověka. Všechny tyto funkce umožňuje x-ray diagnostika v reálném čase běhu výrobní linky. Zde je největší překážka ve znalém a zaškoleném personálu.

4.2 CT diagnostika

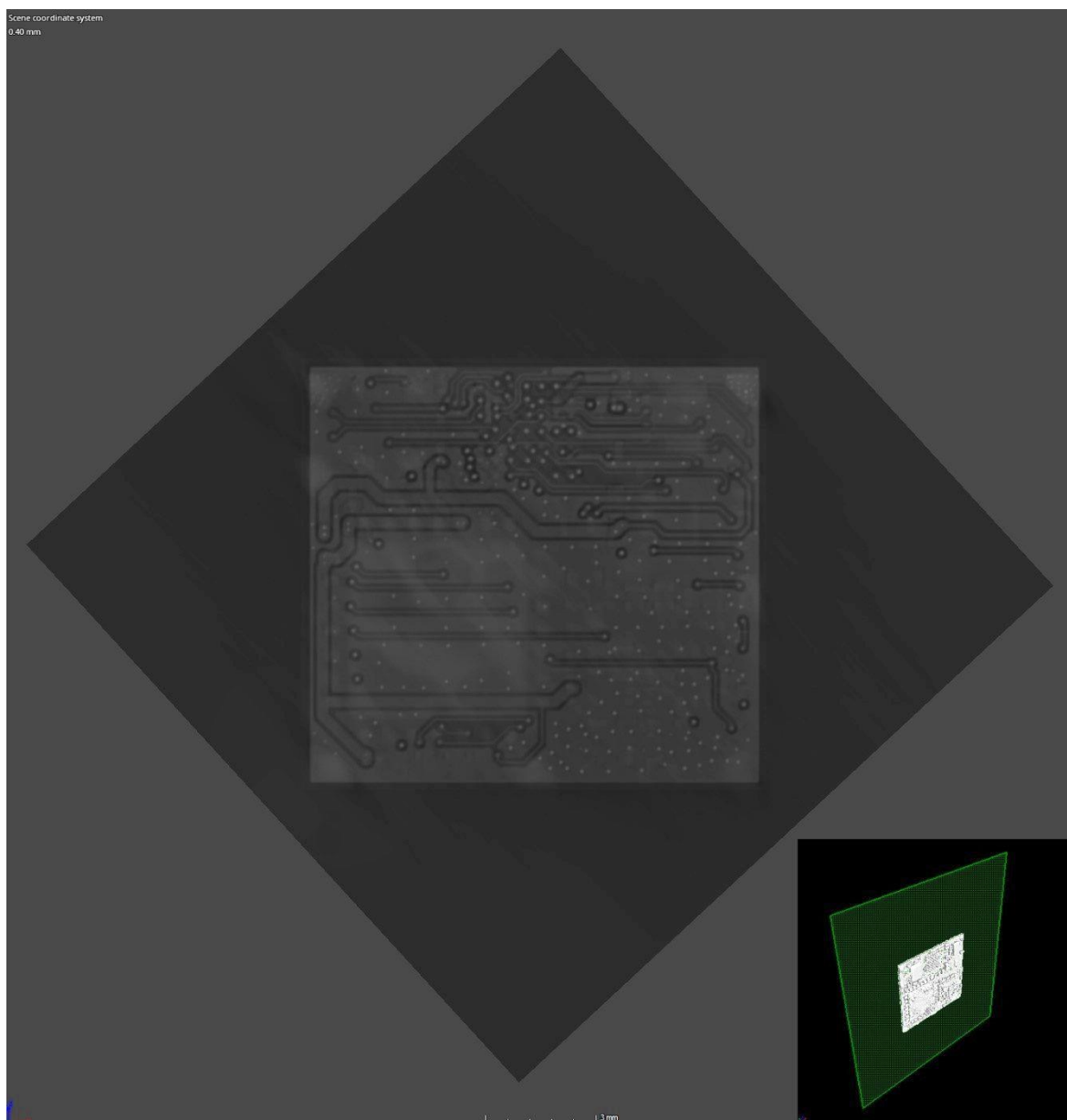
Oproti x-ray diagnostice je CT diagnostika velmi náročná na čas, veškeré analýzy se provádí na hotových scanech, které obecně zaberou zhruba hodinu času, doba trvání scanu je ale velmi závislá na velikosti detektoru. Obecně se používá pravidlo, že počet obrázků neboli na kolik kroků je potřeba rozdělit otočení skenovaného objektu o 360°, je roven jedna celá dva násobku šířky objektu v pixelech. Zde jde tedy hlavně o rozlišení detektoru tomografu, ale také o dobu expozice snímku na jednom kroku. Hodnoty expozice se pohybují ve stovkách milisekund, tato doba je naopak závislá na hustotě materiálu a nastaveném výkonu rentgenové trubice. Jakmile je vytvořen kvalitní CT sken objektu, je s ním možné nadále pracovat bez potřeby další práce s rentgenem.

Analýza pórovitosti neboli analýza voidů využívá algoritmů hledajících přechody hustoty materiálu ve specifických oblastech. Algoritmus hledá nedokonalosti uvnitř materiálu na úrovni voxelů a poskytuje data o jejich poloze, povrchu a objemu. Výsledkem je vygenerovaný report s tabulkou jednotlivých vad a jejich parametrů. Tyto funkce a další poskytují uživateli informace, které by bez destruktivních metod nemohl získat.

4.3 Reverzní inženýrství

Vzhledem k tomu, že je možné za pomoci výpočetního tomografu vidět do míst, kam člověk nemá možnost vidět, se zde naskytá možnost podívat se na již hotové elektronické sestavy a získat z nich informace o jejich provedení. V elektronice se používá zapouzdření osazených desek plošných spojů zalitím, kdy dojde k nevratnému zavření osazené desky do zalévací hmoty. Tato ochrana je na jednu stranu ideální možností, jak zabezpečit elektronickou sestavu proti vlivu okolního prostředí, ale také jak ochránit know-how. Okopírovat layout desky a použít defacto práci někoho jiného pro vytvoření neoriginální kopie elektronické sestavy se děje dnes i denně. Nejčastěji je možné se s tímto přístupem setkat od východních států světa, kde se díky tomuto přístupu vytváří konkurence bez nákladů na vývoj.

Výpočetní tomografie je velmi užitečná při reverzním inženýrství, díky schopnosti nahlédnout skrz pevný materiál. U zapouzdřených elektronických sestav, umožní tomografie zjištění vnitřních struktur součástí, layout desky, nebo typy komponentů. Nemusí se jednat přímo o zapouzdřenou elektronickou sestavu, požadavek může být třeba na zjištění layoutu u vícevrstvých plošných spojů. Na obrázku níže je možné vidět layout naskenované vícevrstvé desky, jež se ukrývá uvnitř a bez odstranění vrchní vrstvy jej není možné odhalit.



Obrázek 49 2D řez z CT skenu desky plošných spojů

Reverzní inženýring se nemusí týkat jen elektroniky, princip je velmi vhodný na pozorování různých mechanismů. Například starověký mechanický artefakt označovaný jako počítač z Antikythéry, který byl objeven ve vraku potopené římské lodi, by bez výpočetní tomografie nebylo možné objevit jeho vnitřní strukturu. [28]

5 Závěr

Práce v první části seznámila obecně s výpočetní tomografií. Lehký náhled do historie za objevem rentgenového záření a jeho vlivem na zdraví. Pro potřeby práce s výpočetní tomografií je potřeba zařízení skládající se z hlavních částí, a to je rentgenová trubice umožňující generovat ionizované záření o dostatečném výkonu, rotační CNC ústrojí umožňující rotaci objektu kolem své osy a detektor, který převádí výsledný stín objektu do digitální podoby pro další zpracování, všechny tyto části jsou uloženy v olovené konstrukci, která chrání obsluhu před ozářením.

Výsledná data zpracovává rekonstrukční software, který za pomoci algoritmů vytvoří 3D voxelový obraz. Z těchto dat je možné za pomoci observačního softwaru provádět různé analýzy a dále zpracovávat data.

Další kapitola shrnula základní vady elektronických sestav a rozdělila je do třech kategorií. První kategorie jsou vady pájení, jež se týkají problémů při procesu pájení, takže různé zkratky, trhliny a voidy v pájce. Vady vodivých cest jsou problémy týkající se desek plošných spojů a problémů s jejich pokovením. Poslední kategorie popisuje vady materiálu nosného substrátu, na kterém jsou nanášeny vodivé cesty, nebo vady materiálu osazených komponent.

Hlavní část diplomové práce srovnává různé vady elektronických sestav a jejich možnou diagnostiku za pomoci destruktivních a nedestruktivních metod. Tyto metody diagnostiky jsou rozděleny do kapitol podle vhodnosti jejich použití. Diagnostika za pomoci výpočetní tomografie je vhodná pro detekci větších vad a pro použití u finančně náročnějších elektronických sestav, naopak destruktivní metody jsou vhodné pro detekci malých chyb a jejich možné následné pozorování za pomoci optické či elektronové mikroskopie. Tyto všechny způsoby diagnostiky vad jsou zobrazeny v závěrečném doporučení, které je určeno pro praktické využití v průmyslu.

Součástí diplomové práce je také posouzení vlivu různého nastavení parametrů rentgenové trubice na výsledný snímek z detektoru. Výsledkem je obecné seznámení s volením parametrů pro skenování. Výsledné hodnoty jsou velmi individuální a vždy záleží

na vzorku a jeho poloze vůči detektoru. Proto není možné doporučit pouze jednu kombinaci hodnot napětí a proudu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] S. Carmignato, W. Dewulf, and R. Leach, *Industrial X-ray computed tomography*. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [2] L. Bond, "History of Radiography," *Nde-Ed*, 2014. <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Introduction/history.htm> (accessed Oct. 19, 2020).
- [3] "X-ray of hand." https://www.nlm.nih.gov/exhibition/dreamanatomy/da_g_Z-1.html.
- [4] P. Villard, "Cathode Rays," *Scientific American*, 1900. <https://courses.lumenlearning.com/introchem/chapter/cathode-rays/> (accessed Oct. 20, 2020).
- [5] W. D. Coolidge, "Tungsten and method of making the same for use as filaments of incandescent electric lamps and for other purposes," 1082933, 1913.
- [6] Irish Times, "CT Scans and the Radon Transform," *ThatsMaths*, 2013. <https://thatsmaths.com/2013/03/07/ct-scans-and-the-radon-transform/>.
- [7] R. Christoph and H. J. Neumann, *Rentgenová tomografie v průmyslové měřicí technice : přesná, hospodárná a univerzální*. Uherský Brod: PRIMA Bilavčík, 2011.
- [8] P. Soltani, "Principle of the micro-computed tomography system," *researchgate*. https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-the-micro-computed-tomography-system_fig1_295656683.
- [9] P. Sprawls, "X-Ray Production." <http://www.sprawls.org/ppmi2/XRAYPRO/>.
- [10] P. Sprawls, "X-Ray Tube Heating and Cooling," *Medical Physics publication*, 1995. http://www.sprawls.org/ppmi2/XRAYHEAT/%5Cnhttp://www.sprawls.org/ppmi2/XRAYHEAT/%5Cnhttps://books.google.co.za/books?id=PiRfPgAACAAJ&dq=The+Physical+Principles+of+Medical+Imaging,+2nd+Ed.+Perry+Sprawls,+Ph.D.&hl=en&sa=X&ved=0CCYQ6AEwAGoVChMI0czS_sPaxgIViK.
- [11] Andor, "What is Indirect X-ray and Neutron Detection and How Does it Work," *Oxford instruments*. <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/what-is-indirect-x-ray-and-neutron-detection>.
- [12] A. Bagnell, "What is Micro-CT? An Introduction," *Micro Photonics Inc*, 2018. <https://www.micropotonics.com/what-is-micro-ct-an-introduction/>.
- [13] Volumegraphics, "Add-on Modules for Material Analyses," *VGSTUDIO MAX*. <https://www.volumegraphics.com/en/products/vgstudio-max/add-on-modules-for-material-analyses.html>.
- [14] Erin, "Are you experiencing SMT Non-Wetting Issues?," *YUN INDUSTRIAL*, 2020. <https://yic-assm.com/are-you-experiencing-smt-non-wetting-issues/>.
- [15] Kate Clayton, "National Physical Laboratory Industry Defects Database," *National Physical Laboratory*. <http://defectsdatabase.npl.co.uk/>.
- [16] "SMT Component Shifting," *eptac*. <https://www.eptac.com/soldertips/smt-component-shifting/>.
- [17] Helen, "13 Common PCB Soldering Problems to Avoid," *SeedStudio*, 2019. <https://www.seedstudio.com/blog/2019/08/07/13-common-pcb-soldering-problems-to-avoid/>.
- [18] Raghav, "What is a Cold Solder Joint?," *PCBDirectory*, 2021. <https://www.pcbdirectory.com/community/what-is-a-cold-solder-joint>.
- [19] E-Tronics, "Řešení defektu Head-in-Pillow," *DPS Elektronika od A do Z*, 2011. <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:5182/reseni-defektu-head-in-pillow>.
- [20] E. T.-P. Directory, "What is a Solder Void?," *PCBDirectory*, 2020. <https://www.pcbdirectory.com/community/what-is-solder-voiding>.
- [21] RNDr. Karel Jurák Ph.D. and Ing. Zuzana Nejezchlebová CSc., "Whiskery cínu v elektronice - Terminologie," *DPS Elektronika od A do Z*, 2020. <https://www.dps-az.cz/zajimavosti/id:70788/whiskery-cinu-v-elektronice-terminologie>.
- [22] S. Sattel, "Tin Whiskers: PCB Soldering Issue," *autodesk*. <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/tin-whiskers-pcb-soldering-issue/>.
- [23] C. Clearance and C. Orientation, "PCB Assembly Guidelines," *EURO circuits*, 2019. <https://www.eurocircuits.com/pcb-assembly-guidelines-tombstoning/>.
- [24] P. Articles, "What Is Measling and Delamination?," *Millennium Circuits Limited*. <https://www.mclpcb.com/pcb-measling-delamination/>.
- [25] IPC, *IPC-A-610E-CZ: Kritéria přijatelnosti elektronických sestav*. 2010.
- [26] Amtech, "Možnosti inspekce DPS pomocí 3D planární počítačové tomografie (pCT)," *DPS Elektronika od A do Z*, 2013. <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:4965/moznosti-inspekce-dps-pomoci-3d-planarni-pocitacove-tomografie-pct->.
- [27] P. Hrabák, "Vznik a růst intermetalických sloučenin u bezolovnatých pájených spojů," 2014.

- [28] M. Edmunds, “Computer Models of the Antikythera Mechanism,” *antikythera mechanism*.
<http://www.antikythera-mechanism.gr/>.

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 RENTGENOVÝ SNÍMEK RUKY MANŽELKY WILHELMA RÖNTGENA [3]	13
OBRÁZEK 2 PRINCIP CT [8]	14
OBRÁZEK 3 ČÁSTEČNĚ OPOTŘEBENÝ TERČÍK Z DIRECT TRUBICE	16
OBRÁZEK 4 DETEKTOR SE SCINTILÁTOREM	17
OBRÁZEK 5 ZPĚTNÁ PROJEKCE [7]	18
OBRÁZEK 6 SKEN KOVOVÉHO JÁDRA V POLYMEROVÉM OBALU	21
OBRÁZEK 7 ROZPTYL PAPERŮ PRŮCHODEM KOVU	22
OBRÁZEK 8 HISTOGRAM NASKENOVANÉHO OBJEKTU Z JEDNOHO MATERIÁLU	24
OBRÁZEK 9 ANALÝZA VLÁKEN KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ V SW VGSTUDIO MAX [13]	26
OBRÁZEK 10 NEDOSTATEČNĚ SMÁČENÉ KONTAKTY NA DPS [15]	28
OBRÁZEK 11 PÁJKA NESMÁČÍ ROVNOMĚRNĚ PLOCHU MEZI KONTAKTEM SOUČÁSTKY A DPS [15]	28
OBRÁZEK 12 SMÁČIVOST PÁJKY	29
OBRÁZEK 13 KULIČKA PÁJKY MEZI KONTAKTY POD KONFORMNÍM POVLAKEM	30
OBRÁZEK 14 NEDOSTATEČNĚ SMÁČENÁ PÁJKA A PRASKLÝ KONTAKT ZPŮSOBENÝ STUDENÝM SPOJEM [15]	31
OBRÁZEK 15 MŮSTKY MEZI PINY ZPŮSOBUJÍCÍ ZKRAT [15]	32
OBRÁZEK 16 KULIČKY PÁJKY V OBLASTI NEPÁJIVÉ MASKY MOHOU BÝT ZPŮSOBENY NEDOSTATEČNĚ OČIŠTĚNOU ŠABLONOU PŘI SÍTOTISKU [15]	33
OBRÁZEK 17 HEAD IN PILLOW DEFEKT [15]	34
OBRÁZEK 18 VOIDY V PÁJCE	35
OBRÁZEK 19 ZDVIŽENÁ SOUČÁSTKA [15]	36
OBRÁZEK 20 NÁHROBNÍ KÁMEN NEBOLI TOMBSTONE [15]	37
OBRÁZEK 21 RENTGENOVÝ SNÍMEK PŘERUŠENÉHO KONTAKTU [15]	37
OBRÁZEK 22 PRASKLÝ KONTAKT	38
OBRÁZEK 23 RENTGENOVÝ SNÍMEK PRASKLÝCH KONTAKTŮ [15]	38
OBRÁZEK 24 ODLOUPNUTÁ PLOŠKA OD ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU [15]	39
OBRÁZEK 25 NEROVNOMĚRNĚ POKOVENÝ OTVOR (XRAY SNÍMEK) [15]	39
OBRÁZEK 26 RENTGENOVÝ 2D SNÍMEK ZKRATU MEZI KONTAKTY POUZDRA TYPU QFN	43
OBRÁZEK 27 RENTGENOVÝ 2D SNÍMEK ZKRATU MEZI KONTAKTY POUZDRA A VYVEDENÝMI KONTAKTY	44
OBRÁZEK 28 RENTGENOVÝ 2D SNÍMEK BONDOVÁNÍ	45
OBRÁZEK 29 RENTGENOVÝ SNÍMEK S VYZNAČENÝM PRASKLÝM KONTAKTEM	45
OBRÁZEK 30 RENTGENOVÝ SNÍMEK PÁJENÝCH SMD KOMPONENTŮ	46
OBRÁZEK 31 ANALÝZA VOIDŮ V PÁJCE POD ČIPEM	47
OBRÁZEK 32 PRASKLINA UVNITŘ KOMPONENTU	48
OBRÁZEK 33 CT SKEN DETAILU BONDOVÁNÍ	49
OBRÁZEK 34 ODTRŽENÝ PÁJENÝ SPOJ	50
OBRÁZEK 35 PRASKLINA V OKOLÍ ZAPÁJENÉHO PINU V PROKOVENÉM OTVORU	51
OBRÁZEK 36 RENTGENOVÝ SNÍMEK ZAPÁJENÉHO PINU V PROKOVENÉM OTVORU	52
OBRÁZEK 37 MATERIÁLOGRAFICKÝ VÝBRUS ZAPÁJENÉHO PINU	53
OBRÁZEK 38 DETAIL PRASKLINY ZAPÁJENÉHO PINU	54
OBRÁZEK 39 MATERIÁLOGRAFICKÝ VÝBRUS PÁJENÉHO SPOJE (INTERMETALICKÉ VRSTVY)	54
OBRÁZEK 40 DETAIL INTERMETALICKÝCH VRSTEV	55
OBRÁZEK 41 ODTRŽENÝ KONTAKT	55
OBRÁZEK 42 PRASKLÝ PROKOVENÝ OTVOR	56
OBRÁZEK 43 DELAMINACE DPS	56
OBRÁZEK 44 PRASKLÝ PÁJENÝ SPOJ NA PROKOVENÉM OTVORU (VLEVO VÝBRUS, VPRAVO RENTGENOVÝ SNÍMEK)	57
OBRÁZEK 45 SROVNÁNÍ PARAMETRŮ NASTAVENÍ PRO RENTGENOVÉ ZAŘÍZENÍ	60
OBRÁZEK 46 SROVNÁNÍ PARAMETRŮ NASTAVENÍ PRO HISTOGRAMY RENTGENOVÝCH SNÍMKŮ	61
OBRÁZEK 47 ROZHRANÍ AKVIZIČNÍHO SOFTWARE PRO CT (SW PHOENIX DATOS x 2.0)	62
OBRÁZEK 48 KONTROLA PÁJENÝCH VÝVODŮ BGA POZDER (SW PHOENIX DATOS x)	65
OBRÁZEK 49 2D ŘEZ Z CT SKENU DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	67