

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2023

**TOMÁŠ
CHVOSTA**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Výskyt dutin v pájených spojích pro elektrotechniku.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Tomáš Chvosta

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Tomáš Gurčík

DRUHÝ VEDOUCÍ PRÁCE: prof. Ing. Karel Dušek, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: N0715A270001 Výrobní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: N071TVIN Bez specializace

PRAHA 2023



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Chvosta** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **473482**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Výskyt dutin v pájených spojích pro elektrotechniku

Název diplomové práce anglicky:

Occurrence of voids in soldered joints for electrical engineering

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologiemi pájení na elektronických komponent na desky plošných spojů a s vybranými chybami, které se zde mohou vyskytnout.
- 2) Připravte si vzorky na kterých provedete analýzu dutin (voidů)
- 3) Výsledky analýzy vyhodnotte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Pietriková, Alena, Juraj Ďurišin a Pavel Mach. Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike. 1. vydanie. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.
- [2] Starý, Jiří, Kahle, Petr. Plošné spoje a povrchová montáž. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003.
- [3] ABEL, Martin a Vladimír CIMBUREK. Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi. Vyd. 1. Pardubice: ABE.TEC, 2005, 179 s. ISBN 80-903-5970-1.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Tomáš Gurčík ústav strojírenské technologie FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

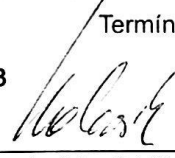
doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL

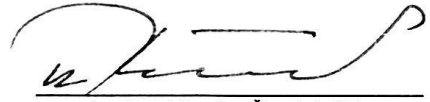
Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**


Ing. Tomáš Gurčík
podpis vedoucí(ho) práce


doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

23.5.2023
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Tomáše Gurčíka a prof. Ing. Karla Duška, Ph.D, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucím diplomové práce prof. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. a Ing. Tomášovi Gurčíkovi za pedagogickou, metodickou a odbornou pomoc, za cenné rady a podporu v náročných chvílích při zpracování mé práce. Následně děkuji Ing. Jiřímu Šmarhákovi, Ph.D. ze společnosti G.L. Electronic za zprostředkování tématu, odborné rady a pomoc při realizaci idejí.

Anotace

Název DP:	Výskyt dutin v pájených spojích pro elektrotechniku
Autor práce:	Bc. Tomáš Chvosta
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Gurčík
Druhý vedoucí práce:	prof. Ing. Karel Dušek, Ph.D
Zadavatel tématu:	G. L. Electronic s.r.o.
Akademický rok:	2022/2023
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	Doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Rozsah práce:	72 stran, 17 tabulek, 34 obrázků
Klíčová slova:	Bezolovnaté pájení, pájka, pájecí pasta, tavidlo, RTG analýza

Annotation

Title of the final thesis:	Occurrence of voids in soldered joints for electrical engineering
Author:	Bc. Tomáš Chvosta
Supervisors:	Ing. Tomáš Gurčík
Second supervisor:	prof. Ing. Karel Dušek, Ph.D
Submitter of the theme:	G. L. Electronic s.r.o.
Academic year:	2022/2023
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	Doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Extent:	72 pages, 17 tables, 34 pictures
Keywords:	Lead-free soldering, solder, solder paste, flux, X-ray analysis

OBSAH

1	Úvod	12
2	Pájení.....	13
2.1	Vliv olova na lidské tělo	13
2.2	Legislativa.....	14
2.2.1	EU.....	14
2.2.2	Česká republika.....	14
2.2.3	USA.....	14
2.2.4	Čína	15
2.2.5	Japonsko	15
3	Bezolovnaté pájení.....	16
3.1	Pájecí pasty	16
3.2	Bezolovnaté pájecí slitiny	17
4	Technologie pájení	21
4.1	Pájení vlnou.....	21
4.2	Pájení přetavením	22
4.2.1	Ohřev konvekcí	25
4.2.2	Ohřev vedením tepla	26
4.2.3	Pájení laserem	26
4.2.4	Ohřev kondenzací nasycených par	26
5	Chyby pájených spojů.....	27
5.1	Intermetalické sloučeniny.....	27
5.1.1	Vznik a význam sloučenin	27
5.1.2	Mechanismus růstu intermetalické vrstvy	28
5.1.3	Analytické vyjádření intermetalické vrstvy	29

5.1.4	Vlastnosti intermetalických sloučenin.....	30
5.2	Dutiny v pájce	31
5.2.1	Planární mikro dutiny	34
5.2.2	Intermetalické dutiny	34
5.2.3	Špendlíkové dutiny	35
5.2.4	Dutiny vzniklé objemovým smršťováním	35
5.2.5	Makrodutiny	36
6	Metody hodnocení kvality pájeného spoje.....	38
6.1	Metalografický výbrus příčného spoje	39
6.2	Vibrační zkouška	40
6.3	Zkouška teplotním cyklováním	40
6.4	RTG analýza.....	41
7	Experimentální část.....	43
7.1	Návrh DPS	43
7.2	Výroba DPS.....	44
7.3	Tisk pasty, osazení a pájení.....	45
7.3.1	Tisk pájecí pasty	45
7.3.2	Osazení DPS	48
7.3.3	Pájení	50
7.4	Zhotovení RTG snímků	51
7.5	Zpracování RTG snímků	54
7.6	Analýza dat.....	60
7.7	Výsledky analýzy	64
8	Závěr.....	66
9	Bibliografie	68

Seznam zkratk

RoHS	Restriction of Hazardous Substances directive (Směrnice o zákazu užívání nebezpečných látek)
Wee	Waste form Electrical and Electronic Equipment directive (Směrnice o dopadu z elektrických a elektronických zařízení)
EWRA	Electronic Waste Recycling Act (Zákon o recyklaci elektrického odpadu)
ENIG	Electroless Nickel Immersion Gold (Povrchová úprava nikl-zlato)
DPS	Printed circuit board (Deska plošného spoje)
BGA	Ball grid array (Programovatelné hradlové pole)
FBGA	Field Programmable Gate Array (Programovatelné hradlové pole)
SMT	Surface Mount Technolog (Technologie povrchové montáže)
SMD	Surface Mount Device (Součástka pro povrchovou montáž plošných spojů)
RSS	Ramp Soak Spike (Rampa špičky smáčení)
RTS	Ramp to Spik (Rampa ke špičce)
RTG	Radioistope thermoelectric generator (Rentgenové záření)
USA	United States of America (Spojené státy americké)
IMC	Intermetallic compound (Intermetalická sloučenina)
TAL	Time Above Liquidus (Čas strávený nad teplotou tavení)
ENIG	Electro-less Nickel/Immersion Gold
HASL	Hot-Air Solder Level (Tenká vrstva pájky na desce plošného spoje)
OSP	Organic Solderability Preservative (Ochranná organická vrstva)
RoHS	Restriction of Hazardous Substances (Omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních)
SAC	Sn + Ag + Cu (slitiny v kombinaci cín, stříbro a měď)

Seznam použité symboliky

x	[m]	tloušťka intermetalické vrstvy
t	[s]	čas
x_0	[m]	počáteční tloušťka v čase $t = 0$ s
A_0	[m·sn]	exponenciální faktor
n	[-]	časový exponent
E_a	[J/mol]	aktivační energie
R	[J · mol ⁻¹ · K ⁻¹]	molární plynová konstanta
T	[K]	teplota
$\Delta\varepsilon$	[ppm]	poměrné posunutí spoje
L	[m]	délka součástky
$\Delta\alpha$	[ppm · K ⁻¹]	rozdíl součinitelů délkové teplotní roztažnosti DPS a pouzdra součástky
ΔT	[K]	rozdíl teplot
h	[m]	výška pájeného spoje

1 Úvod

Historie pájení se datuje již od roku 3000 před naším letopočtem, kdy egyptští zlatníci spojovaly zlaté předměty tvrdým pájením. Pomocí této technologie vyráběly náhrdelníky, sošky a další ozdobné doplňky. Měkké pájení (o 1000 let déle) se objevilo poprvé v Řecku, a to aplikované na olověné vodovodní potrubí zhotovené svinováním olověných desek za využití cínové pájky. 1000 let před naším letopočtem se začínají využívat pájky ze slitin mosazi a cínu pro spojování zlata, stříbra, mědi a mosazi. Další rozvoj nastal v období středověku, kdy se tvrdé pájení využívalo pro zhotovení zbraní a kroužkové zbroje. [1]

Vývoj odvětví je úzce spjat s hutnictvím a s rozvojem zdroje tepelné energie. Velký pokrok nastal při vynálezu Petra Theodora Bertina, který si nechal patentovat pájecí lampu v roce 1798. Od té doby se pájení hojně využívá v mnoha oblastech. Největší příspěvek na dnešní podobu pájení má automobilový průmysl, letectví, vesmírné vědy a především elektrotechnický průmysl. V souvislosti s rozvojem pájení je nutné zmínit také miniaturizaci, díky které se metody zpřesňují, zrychlují a specifikují pro jednotlivá průmyslová odvětví. [1]

Za další milník můžeme označit přechod na bezolovnaté pájení, nesoucí s sebou mnohá úskalí související se změnami využívaných materiálů. Bezolovnaté pájení se stále vyvíjí a v některých odvětvích průmyslu se teprve zavádí do běžných výrobních procesů.

Tato diplomová práce se zaměřuje na zmíněnou technologii bezolovnatého pájení, konkrétněji na výskyt dutin vzniklých při procesu výroby a jejich diagnostiku.

2 PÁJENÍ

Pájení je způsob metalografického spojování dvou kovů za pomoci roztaveného třetího, který má nižší teplotu tání než spojované části. Během procesu dochází k difúzi atomů pájky do spojovaných materiálů. V pájecích slitinách se hojně využívala kombinace cínu s olovem. Olovo je nejen ekologicky, ale i zdravotně závadné, a proto byl tento prvek ze slitin odstraněn a nahrazen jinými kovy.

V pájkách se olovo objevuje pouze v nepatrném množství, ovšem většina elektrických zařízení obsahující olovnatou pájku jsou nepatřičně recyklovány a končí na odpadních skládkách, kde hrozí kontaminace např. vodních zdrojů. [2]

2.1 VLIV OLOVA NA LIDSKÉ TĚLO

Olovo, stejně jako některé další těžké kovy (např. kadmium a stříbro) jsou pro živé organismy toxické. Využití zmíněného kovu je však v elektrotechnice velice časté, a proto se začal zjišťovat vliv na lidský organismus.

Jedním z negativních účinků působení olova na člověka je např. ovlivnění centrálního nervového systému. Základní přehled viz Tab. 1. [3][4]

Tab. 1: Vliv olova na lidský organismus [4]

oblast	projev
centrální nervová soustava	ztráta paměti, zhoršená schopnost učit se
	odumírání mozkových buněk
	encefalopatie
	mozkový edém
srdeční oblast	vysoký krevní tlak
krev	zhoršená syntéza hemoglobinu
ledviny	poškození celkové funkce
	dna
kostra	vývoj kostí a zubů
	zhoršená syntéza osteocalcinu a proteinů
reprodukce	spontánní potrat
	vliv na kvalitu a počet spermií

2.2 LEGISLATIVA

Bezolovnaté pájení je jednou z technologií, na kterou je kladen velký důraz, a to nejen kvůli spotřebě materiálu, ale rovněž kvůli negativním vlivům na lidský organismus.

2.2.1 EU

Směrnice RoHS (Restriction of Hazardous Substances directive) platná od 1. července 2006 definuje, jaké látky nesmějí být obsaženy v nových elektrických a elektronických zařízeních jdoucích na trh.

Jedná se o:

- Rtuť
- Kadmium
- Olovo
- Šestimocný chróm
- Polybromované bifenyly
- Polybromovaný difenylether [5]

2.2.2 ČESKÁ REPUBLIKA

Novela zákona o odpadech č.185/2001 Sb. schválená v prosinci 2004 obsahuje směrnice o dopadech stanovené EU: WEE (Waste form Electrical and Electronic Equipment directive) a RoHS. Dne 13.8. 2005 nabyl účinnosti zákon č.7/2005 Sb. o zpětném a odděleném odběru odpadních elektrických a elektronických zařízení. [3][6]

2.2.3 USA

Zatím neexistuje žádný federální zákon o omezení nebo zákazu používání olova v elektronice. Legislativa je zaměřená na elektronický odpad a připravována k přijetí v mnoha státech. Nejdále je v tomto ohledu stát Kalifornie se zákonem EWRA (Electronic Waste Recycling Act) z roku 2007. Zákon se vztahuje k zákazu prodeje elektrických zařízení, které obsahují stejné látky jako definuje RoHS a jmenuje zařízení, ke kterým se vztahuje. Jedná se o displeje typu CRT a LCD s úhlopříčkou větší než 10 cm a od roku 2010 se vztahuje i k světelným zdrojům. [3]

2.2.4 ČÍNA

V současné době nejsou zákony ani předpisy redukující, nebo zakazující užívání olova v elektronice. Obecně se však předpokládá, že legislativa zaměřená tímto směrem je připravována. Od 1. března 2007 platí pro zařízení obsahující některou z látek RoHS, že musí být označené, ovšem mohou se objevit na trhu. Označení obsahuje čas, po který se již daná látka při výrobě nepoužívá. Zařízení, které nebezpečné látky neobsahuje je náležitě označeno. [3]

2.2.5 JAPONSKO

Existuje řada zákonů a předpisů zabývajících se redukcí a vyloučením užívání olova v elektrickém průmyslu. Od roku 2004 se výroba spotřební elektroniky redukovala na téměř 100% pájení bez Pb. Prozatím nebylo přijato nařízení pro regulaci používání Pb v pájkách, ovšem od roku 2001 vešel v platnost zákon, nepřímo nutící výrobce elektroniky k bezolovnatému pájení. Dále od 1. června 2006 vyšlo nařízení specifikující označení elektrických zařízení obsahujících specifickou látku v množství větším, než je stanovená hodnota. [3]

3 BEZOLOVNATÉ PÁJENÍ

Zavedením bezolovnatého pájení přišlo několik komplikací souvisejících se změnou materiálů pájecích slitin, DPS (deska plošného spoje) a výrobních technologií. Adaptace na RoHS a přizpůsobení parametrů pro nové slitiny vedla k nákladným investicím. Mimo jiné se změnila mechanická vlastnost slitin a zvýšily se jejich teploty likvidu. U bezolovnatých pájek se jedná o 20 až 45 °C vyšší hodnoty než u olovnatých slitin. S nárůstem teploty souvisí i potřebná dodaná energie na roztavení pájky a současně i výraznější namáhání osazených komponent. Tento aspekt může negativně ovlivňovat životnost součástí i vlastní DPS jako např. vznik zkratů u některých částí nebo rozpojení vodivých cest. [7]

Mezi další obtíž lze uvést např. špatnou roztékavost bezolovnaté pájky, horší odolnost vůči mechanickému zatížení jako jsou vibrace, zvýšená tvorba intermetalických sloučenin, větší náchylnost na oxidaci a snížení životnosti pájecího hrotu.

Pájitelnost je odvozena od schopnosti smáčet povrch. Pro vytvoření kvalitního spoje je nezbytné, aby došlo mezi pájkou a pájeným povrchem ke smočení. Tuto vlastnost lze u materiálů zjistit různými způsoby, jako např. testem roztékavosti pájky. [2]

3.1 PÁJECÍ PASTY

Pájecí pasta se používá při pájení přetavením u SMT (Surface Mount Technology). Skládá se z homogenní směsi prášku pájecí slitiny s průměrem 5-160 μm, tavidla, pojiva a dalších přísad potřebných ke správné viskozitě, roztékavosti a lepivosti směsi. Lepivost je důležitá pro fixování součástky před samotným přetavením. Tavidlo a další přísady tvoří okolo 11 % hmotnosti pájecí pasty.

Je důležité, aby pojivo zůstalo konzistentní i při teplotách, kdy dochází k tavení pájky. Pokud tomu tak není, často dochází během prodlevy teplotního profilu k roztékání pasty nanesené prostřednictvím šablonového tisku. Tento efekt vede ke vzniku vodivých můstků mezi sousedními vývody. S přechodem na jemnější rozteč vývodů roste potřeba odolnosti pájecí pasty proti roztékání.

Bezolovnatá pasta by v ideálním stavu měla obsahovat podíl kovových částic 85-95 % o hustotě 1 g/ml, aby se co nejvíce přiblížila vlastnostem olovnaté pájecí pasty. Kovový prášek pro pájení přetavením je nejčastěji na bázi SnAgCu. S velikostí zrn dochází ke změně množství oxidů na povrchu, což se negativně projeví na výsledné kvalitě pájeného

spoje. Úkolem výroby je zajistit konzistentní strukturu s minimálním rozdílem velikostí zrn pro snadnější aplikaci pasty. [3][8]

Způsoby aplikování pájecí pasty na DPS:

- Protlačení přes síto – sítotisk
- Protlačení přes šablonu - šablonový tisk
- Injekčně nebo dávkováním, za použití vysokého tlaku

Vliv vnějších technologických činitelů na vlastnosti pájecí pasty:

- Vlhkost
- Nadměrná teplota
- Podmínky tisku
- Příprava pájecí pasty (aklimatizace)
- Nanášení pájecí pasty na šablonu
- Skladování [8]

3.2 BEZOLOVNATÉ PÁJECÍ SLITINY

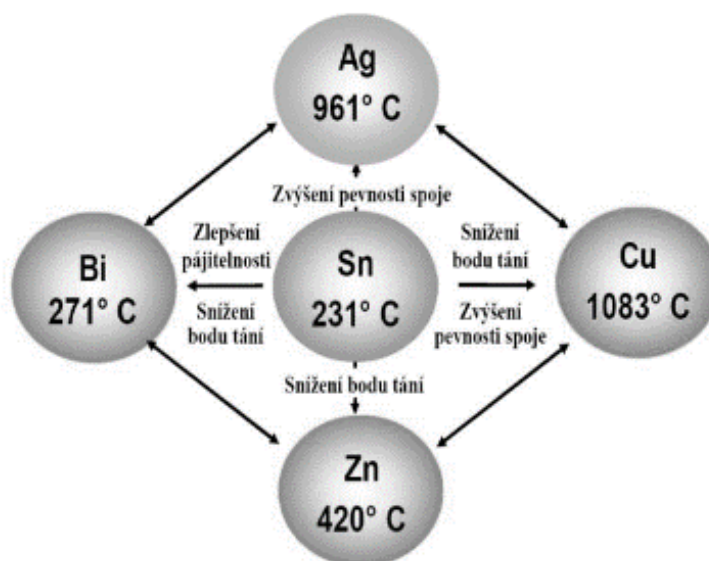
Bezolovnaté pájky mají podobné vlastnosti jako olovnaté, liší se např. ve spolehlivosti a životnosti spojů. Z tohoto důvodu je stále povoleno využívat olovnaté pájky např. ve vojenském a kosmickém průmyslu. Ovšem i v těchto odvětvích je vyvíjen tlak na přechod k bezolovnatým pájkám. [7] Vzhledem k celosvětovým požadavkům na minimalizaci využívání olova v pájených spojích je nezbytné, aby slitiny splňovaly určité požadavky, jako:

- | | |
|--|----------------------------|
| • Nízká teplota tání | • Elektrická vodivost |
| • Blízké teploty solidu a likvidu (<30 °C) | • Tepelná vodivost |
| • Dobrá smáčivost | • Mechanická pevnost |
| • Dobrá dostupnost kovů | • Odolnost vůči korozi |
| • Nízké náklady | • Stabilita při skladování |
| | • Ekologická nezávadnost |

Pro dosažení výše uvedených vlastností se často ve slitinách objevuje třetí nebo čtvrtý prvek. Hlavní náhradou olova je cín v kombinaci se zinkem, bismutem, stříbrem, niklem nebo mědí (Tab. 2 a Obr.1). Z hlediska osazení DPS jsou hlavními sledovanými parametry teplota tání a smáčivost. Typická teplota pájení je o 30 °C vyšší než teplota tání pájky. S vývojem bezolovnatých pájek vzrostly nároky na regulovanou teplotu v peci a s tím spojené požadavky na ochrannou atmosféru. Vlivem vyšší teploty dochází k chemické reakci s kyslíkem a vyšší oxidaci. K vytěsnění kyslíku se využívají např. inertní atmosféry, ovšem jedná se o finančně nákladnější proces. [9],[10]

Tab. 2: Chemické prvky obsažené v pájkách a jejich vliv [9]

Stříbro	Ag	Snížení bodu tavení, lepší smáčivost a pevnost spoje
Měď	Cu	Lepší pevnost spoje
Zinek	Zn	Nižší teplota tavení, zlevňuje slitinu
Bizmut	Bi	Nižší bod tavení
Antimon	Sb	Lepší pevnost spoje, nižší povrchové napětí, prevence nadzvednutí součástí
Indium	In	Nižší bod tavení
Nikl	Ni	Prevence odsmáčení
Germanium	Ge	Prevence oxidace



Obr. 1: Základní kombinace slitin, teploty tavení jednotlivých prvků a vlivy na vlastnosti pájky [11]

Jednou z hojně využívaných pájek je typ SAC (SAC 305), tedy pájka s kombinací cínu, stříbra a mědi. Teplota tání se pohybuje okolo 217 °C až 220 °C. Tato pájka se využívá pro pájení vlnou a ruční pájení. Je však nevhodná pro povrchové úpravy SnZn a SbPb. [9] Využívaná náhrada olova je také Bismut, kvůli jeho vlivu na slitinu a nízkou cenu. Pájka Sn₄₂Bi₅₈ dosahuje teploty tání do 141 °C a využívá se k pájení systémů citlivých na tepelné zatížení během procesu pájení. Objevuje se také kombinace se stříbrem pro zlepšení smáčivosti a pevnosti spoje. Přehled vybraných bezolovnatých pájek znázorněn v Tab. 3 - 5. [10]

Tab. 3: Přehled vybraných dvousložkových bezolovnatých pájek a jejich teplota tání [7]

system	složení	teplota tání (°C)
Sn-Ag	Sn-3,5Ag	221
Sn-Cu	Sn-0,7Cu	227
Sn-Sb	Sn-5Sb	232 až 240
Sn-Zn	Sn-9Zn	199
Sn-Bi	Sn-58Bi	138
Sn-In	Sn-52In	118

Tab. 4: Přehled vybraných třísložkových bezolovnatých pájek a jejich teplota tání [7]

system	složení	teplota tání (°C)
Sn-Ag-Cu	Sn-3,8Ag-0,7Cu	217
	Sn-3,1Ag-1,5Cu	217
	Sn-3,5Ag-0,75Cu	218
	Sn-3Ag-0,5Cu	220
Sn-Ag-Bi	Sn-3,3Ag-4,7Bi	219 až 220
	Sn-3,5Ag-1Bi	210 až 215
	Sn-1,5Ag-6Bi	187,6 až 228,9
Sn-Ag-In	Sn-2,8Ag-20In	178
Sn-Cu-Se (nebo Te)	Sn-4,75Cu-0,25Se (Te)	210 až 217
Sn-Zn-Bi	Sn-8Zn-3Bi	193

Tab. 5: Vlastnosti vybraných bezolovnatých pájek [7]

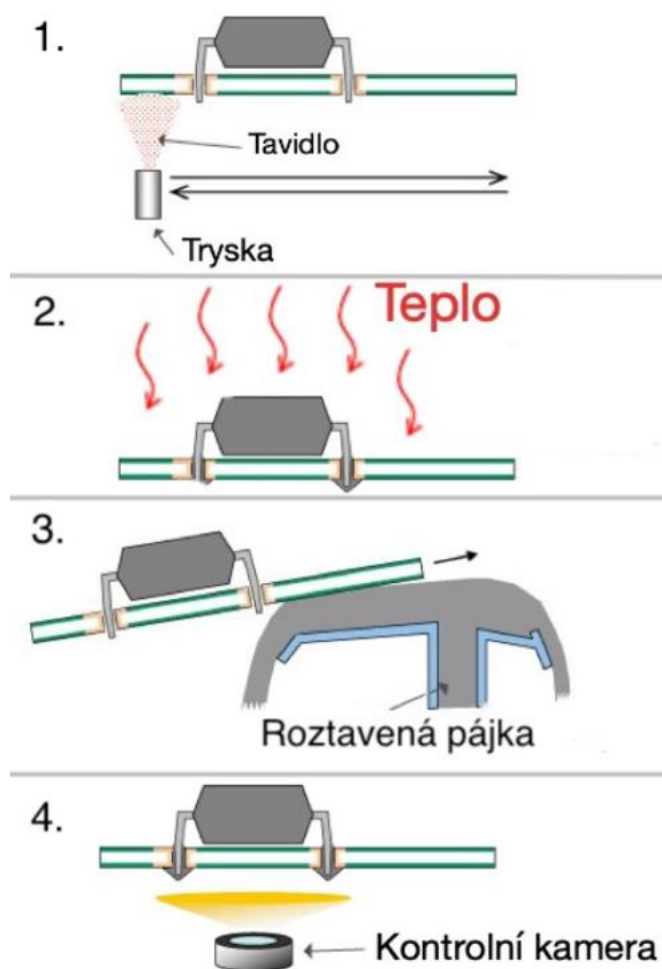
	Sn-37Pb	Sn-3,5Ag	Sn-0,7Cu	Sn-3,8Ag-0,7Cu
teplota tání (°C)	183	221	227	217
hustota (g·cm ⁻³)	8,36	7,36	7,31	7,5
rezistivita (μΩ·cm)	15	10,8	10 až 15	13
pevnost v tahu (MPa)	46	35	23	48
pevnost ve smyku* (MPa)	23	27	20 až 23	27
mez kluzu (MPa)	37	49	37	45
prodloužení (%)	31	39	45	-

4 TECHNOLOGIE PÁJENÍ

4.1 PÁJENÍ VLNOU

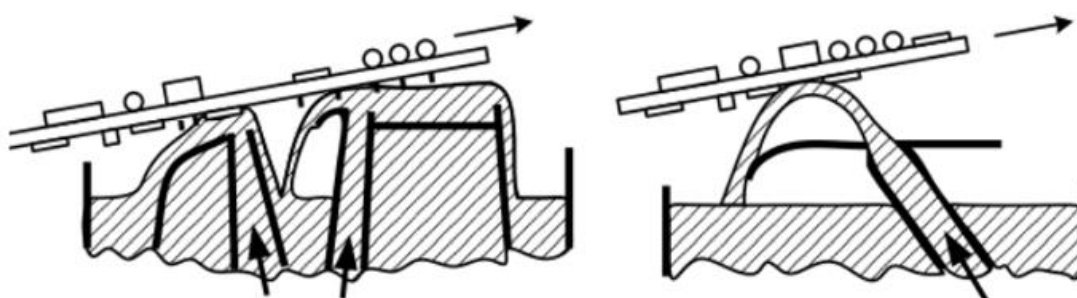
Jedná se o strojovou technologii, kde prvním krokem je vložení DPS nad trysku, nanášecí tavidlo (zajištění vyšší smáčivosti). Následuje zóna předehřevu, kde se spoj přiblíží teplotě likvidu. Aktivuje se tavidlo a postupným zahříváním se zamezí výraznému teplotnímu skoku. [3]

Následuje samotná pájecí vlna. Materiál je za pomoci čerpadla přemísťován na konec trysky, kde vzniká vlna z pájky. Přes vlnu přejezdí dopravníkový pás s DPS osazenou součástkami, které se tímto způsobem zapájí. Na konci procesu je umístěna kamera na kontrolu provedení spoje. V případě nesplnění požadavků na kvalitu je potřeba spoj přepájet. Princip procesu pájení vlnou je nastíněn na Obr. 2. [3][12]



Obr. 2: Schéma procesu pájení vlnou [12]

Zařízení, u kterých je kladen důraz na spolehlivost spoje, je sučástí procesu i čištění prostřednictvím chemikálií (např. izopropylalkohol) pro odstranění agresivních nečistot a oplach neionizovanou vodou. Vlnu můžeme dělit na dvojitou a dutou (Obr.3). Dvojitá vlna vzniká při využití dvou trysek. Jedna z nich míří ve směru pohybu dopravníku a druhá v protisměru. Dutá vlna je tryskána v protisměru pohybu dopravníkového pásu. Výhodou je snadné odpojení slitiny od pájené součástky a možnost pájet větší množství DPS najednou, nevýhodou pořizovací náklady.[3][12]



Obr. 3: Schéma dvojité a duté vlny u pájení vlnou [12]

Dvojitá vlna

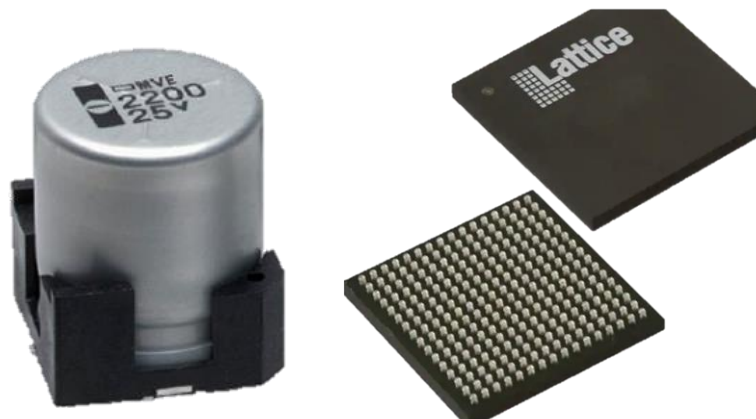
Dutá vlna

Selektivní pájení vlnou

Selektivní pájení se liší od běžného pájení vlnou, především v metodě nanesení pájky, která je aplikována na předem definovaná místa DPS. Hlavní výhodou selektivní vlny je menší tepelný vliv na zbytek DPS. Využívá se u elektrolytických kondenzátorů, u skleněných displejů a další součástek, u kterých hrozí poškození vlivem vysoké teploty. [3]

4.2 PÁJENÍ PŘETAVENÍM

Technologie pájení přetavením, zvaná Reflow soldering je jednou z nerozšířenějších metod pro povrchové montáže neboli SMT. Aplikuje se jak pro kusovou, tak i hromadnou výrobu. Na rozdíl od pájení vlnou lze Reflow soldering aplikovat na husté osazení, díky omezení tvorby můstků, mezi jednotlivými sousedními spoji. [3][12]



Obr. 4: SMD elektronický kondenzátor 47UF a FBGA LIFCL_40_7BG256C [12]

Před samotným pájením je potřeba nanést pájecí pastu na pájecí plošky (pady), a to prostřednictvím tisku přes šablonu, sítotiskem nebo pomocí dávkovače (dispensorem). Následuje osazení DPS SMD součástkami (příklady komponent viz Obr. 4) vysušení pasty pro odstranění kapalných složek pasty a aktivace tavidla (80-150 °C dle využití pasty). Nedostatečné vysušení pasty má za následek změnu polohy součástky a negativní vliv na kvalitu spoje. Tyto defekty jsou zapříčiněny uvolňováním par při samotném procesu pájení. [3][12]

Pájení přetavením můžeme rozdělit následovně:

- Ohřev horkým plynem
- Ohřev vedením tepla
- Pájení laserem
- Ohřev kondenzací nasycených par
- Ohřev infračervenými zářiči

Vlivem povrchového napětí roztavené pájky dochází k „automatickému“ vystředění součástek na pájecích ploškách DPS. Aktuálním doplňkem je využití pokovení pájecích plošek DPS niklem a zlatem, cínovou pájkou, nebo jinými povrchovými úpravami zvyšujícími kvalitu pájeného spoje. [3]

Teplotní profil

Teplotní profil je definován závislostí teploty pájení na čase. Správně zvolený teplotní profil je primárním předpokladem pro pájení součástek bez vzniku defektů. Při stanovení

teplotního profilu je třeba respektovat maximální teplotu, kterou pojmu osazené součástky, teplotu tavení pájky a další aspekty. [13]

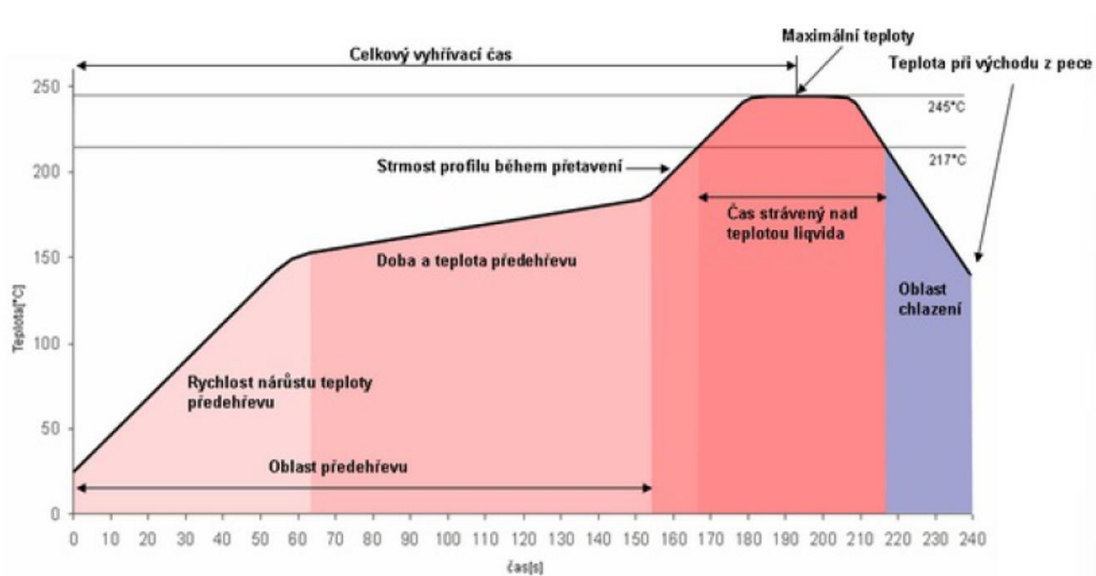
Při nastavování pájecího profilu je potřeba dbát na dosažení cílové teploty v místě pájky. Zejména u součástek s vývody BGA (ball grid array), které mají samy o sobě velkou tepelnou kapacitu, je potřeba dostatečného prohřátí součástky. Při pájení přetavením lze za nejdůležitější parametry pokládat strmost profilu v průběhu předehřevu, maximální teplotu a čas strávený nad teplotou likvidu (TAL). Tyto parametry ovlivňují výskyt dutin, a tím i kvalitu a životnost spoje. Na Obr. 5 jsou vidět příklady deformací pájeného spoje s přihlédnutím na vliv teploty.[8]



Obr. 5: BGA vývody, vliv vhodně zvoleného teplotního profilu na připájení vývodů

Vlevo nedostatečné smočení materiálu vlivem nízké teploty. Vpravo deformovaný spoj vlivem příliš vysoké teploty.[8]

Teplotní profil můžeme rozdělit na lineární a sedlový. Lineární průběh se označuje jako RTS (Ramp to Spike), kdy dochází k lineárnímu nárůstu až do maximální teploty. Strmost profilu nepřesahuje 2 °C/s, TAL 30-60 s, maximální teplota 260 °C a celý proces (mimo chlazení) by měl trvat do 5 min. Proces chlazení by neměl přesáhnout hranici 4 °C/s. Tohoto profilu se však v praxi dosahuje jen obtížně. Častěji se setkáme s RSS (Ramp Soak Spike) tedy se sedlovým teplotním profilem (Obr. 6). Rychlost předehřevu pro sedlový typ by neměla přesáhnout 3 °C/s po dobu 60 – 90 s. Nadměrná strmost způsobuje rozstříknutí tavidla nebo nežádoucí vytváření kuliček pájky vlivem odpařování látek o nižších teplotách varu. Teplotní vyrovnání se nachází v oblasti 150-170 °C pro dobu pájení nepřesahující 75 s. v dalších fázích se již shodujeme s RTS profilem, tedy čas nad teplotou likvidu do 60 s, maximální teplota do 260 °C a doba pájecího profilu do 4,5 min. [8][14]



Obr. 6: Sedlový teplotní profil [14]

Rozdíly u jednotlivých RSS profilů jsou zapříčiněny snahou minimalizovat množství dutin, prostřednictvím změny oblasti teplotního vyrovnání, úpravou teploty a dobou trvání. [14]

Měření teplotního profilu je nedílnou součástí určování podmínek přetavení. Zpravidla se využívají termočlánky připojené na datalogger, které společně s testovanou DPS prochází přednastavenou pecí. Termočlánky by měly být umístěny na testovací DPS v místech, s očekávanou nejnižší nebo nejvyšší teplotou, v rohu pájené součástky a co nejbližše středu. [13]

Při rychlém nárůstu teploty může dojít ke špatné smáčivosti, tvorbě kuliček pájky v okolí pájeného spoje, případně defekt součástek. Pro prudké ochlazení je typické potlačení růstu intermetalických sloučenin a praskání spojů. [14]

4.2.1 OHŘEV KONVEKČÍ

Jedná se o nejrozšířenější technologii pro hromadné pájení. Pece zahrnují generátor horkého plynu s velice účinným akcelerátorem teploty. Plyny dosahují vyšších teplot o desítky stupňů, oproti teplotě přetavení pájecí pasty. Tuto metodu lze aplikovat po celé ploše výrobku prostřednictvím přetavovací pece, nebo pouze na vybraná místa, pro kterou se využívají horkovzdušné pájecí stanice. Pece s dopravníkovým pásem na principu proudění plynu mají obvykle několik zón ohřevu (3-12), pro přesnější dodržení teplotního profilu. Nejčastějším plynným médiem je vzduch, nebo dusík. [15]

4.2.2 OHŘEV VEDENÍM TEPLA

Ohřev vedení tepla představuje velice často využívanou metodu pro výrobu hybridních integrovaných obvodů a nekonvenčních aplikací na keramických podložkách. Dopravníkový pás prochází přes dvě teplotní zóny (předehřev a přetavení). Tato metoda se již téměř nepoužívá, kvůli závislosti kontaktu DPS s vyhřívacím pásem a vhodnosti metody jen pro malé a jednostranné osazení DPS (eliminace výhod SMT). [3][12]

4.2.3 PÁJENÍ LASEREM

Laserový paprsek (rovnoběžný svazek koherentního monochromatického světla) se soustředí na určený bod, při dopadu záření se povrch pájeného místa odrazí a dochází k jeho rozptylu a absorpci, která má za následek zahřátí a následné přetavení pájecí pasty. K přetavení dochází tedy s maximální přesností v minimálním čase (10^{-1} s). Tato metoda je ovšem velmi finančně nákladná, nelze pomocí ní pájet vývody pod pouzdrem součástky, a proto se jedná o jeden z méně využívaných způsobů. [3][12]

4.2.4 OHŘEV KONDENZACÍ NASYCENÝCH PAR

K přetavení dochází za využití kapalného média, které se v průběhu procesu mění do plynného stavu a následně ohřívá DPS. Na médium je kladen důraz v ohledu stability v širokém rozsahu teplot a bez chemické agresivity. Tyto kapaliny mají teplotu přechodu vyšší, než je teplota tání pájky. Během procesu dochází ke kondenzaci par na DPS, předání tepla a následné přetavení. Zkondenzovaná pára se odvádí a opětovně využívá. Pájení v parách lze aplikovat v dávkách, nebo kontinuálně. Hlavní výhodou této technologie je rovnoměrný ohřev DPS. [3][12]

5 CHYBY PÁJENÝCH SPOJŮ

Nedodržením vhodného teplotního profilu daného výrobcem nebo špatného výběru pájecí slitiny vůči povrchové úpravě DPS může dojít po pájení, nebo v průběhu procesu výroby k defektům. Mezi nejčastější defekty se řadí: [7][12]

- Kuličky pájky (nevhodně provedené nanesení pájky, příliš vysoká teplota pájky nebo aktivní tavidlo)
- Můstky (příliš velké množství nanesené pájky, nevhodné tavidlo)
- Tombstoning (velké rozdíly povrchových energií na pájecích ploškách, teplotní rozdíly na substrátu, nevhodný návrh pájecích plošek)
- Pootočení komponenty (rozdílné povrchové napětí, nevhodně nanesená pasta)
- Nedostatek nanesené pájky
- Špatná smáčivost (špatná povrchová úprava, nevhodné nebo slabé tavidlo)
- Dutiny v pájce (nedodržený předepsaný teplotní profil, nevhodné tavidlo)

5.1 INTERMETALICKÉ SLOUČENINY

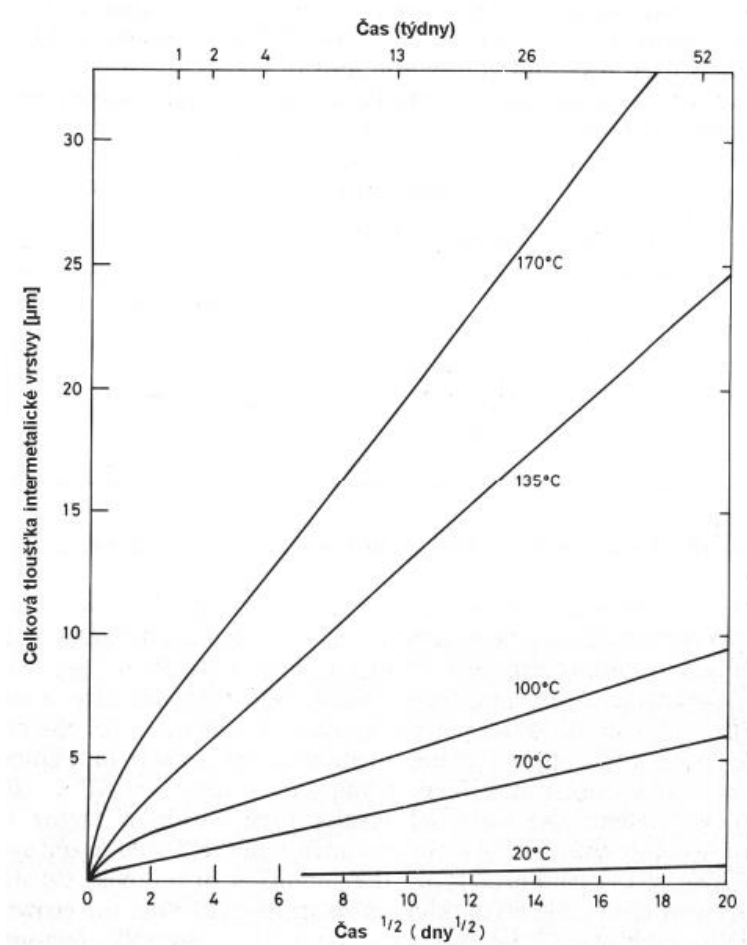
Intermetalické sloučeniny jsou nedílnou součástí pájení. Vznikají během procesu smáčení, čímž zvyšují pevnost pájeného spoje. Intermetalické sloučeniny mají odlišné rozložení atomů v krystalografické mřížce od materiálu pájky, a tím výrazně ovlivňují mechanické vlastnosti, životnost, křehkost rezistivitu a teplotní vodivost. Téměř vždy se jedná o negativní efekt, který je potřeba minimalizovat. [9]

5.1.1 VZNIK A VÝZNAM SLOUČENIN

Intermetalické sloučeniny vznikají vlivem difuze, kterou ovlivňují adhezní a kohezní síly, a to převážně na rozhraní mezi substrátem a pájecí slitinou. Vytvořená vrstva intermetalické sloučeniny obsahuje řádově desítek μm a lze její velikost ovlivnit. Při vyšších teplotách roste její tloušťka. Vytvoření kvalitního spoje je podmíněno vznikem této mezivrstvy. [11]

5.1.2 MECHANISMUS RŮSTU INTERMETALICKÉ VRSTVY

Tloušťka intermetalické vrstvy není konstantní, ovšem mění se s časem a teplotou (nárůst tloušťky lze pozorovat i při pokojové teplotě). Jedná se o dynamický růst, který má ve spojení s rostoucí teplotou strmější průběh viz Obr. 7. kde je znázorněn růst intermetalické vrstvy v závislosti na čase při různých teplotách pro pájecí slitinu Sn-37Pb na měděném povrchu. [7][12]



Obr. 7: Růst intermetalické vrstvy v závislosti na čase při různých teplotách [12]

IMC (Intermetallic compound) vrstvy mají vyšší bod tání a rozdílný součinitel délkové teplotní roztažnosti v porovnání s mědí a substrátem DPS, což může vést k mechanickému namáhání spoje při teplotním namáhání. [12]

5.1.3 ANALYTICKÉ VYJÁDŘENÍ INTERMETALICKÉ VRSTVY

Následující rovnicí lze popsat kinetický růstu IMC.

$$x = x_0 + A \cdot t^n \cdot e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad (1.1)$$

x [m]	tloušťka IMP,
x_0 [m]	počáteční tloušťka v čase $t = 0$ s,
A_0 [m·s ⁿ]	exponenciální faktor,
t [s]	čas,
n [-]	časový exponent,
E_a [J/mol]	aktivační energie,
R [J/mol·K]	molární plynová konstanta,
T [K]	teplota.

Na základě změřených tloušťek v různých časech a za rozdílných různých teplot lze určit hodnoty A_0 , n a E_a . Po dosazení parametrů do rovnice lze stanovit závislost tloušťky intermetalické vrstvy v čase za působení konkrétní teploty. Tab. 6 zobrazuje přehled parametrů rovnice 1.1 pro různé pájky a podklady dle různých autorů. Pevná fáze v tabulce představuje solid a kapalná fáze likvid. Z tabulky si lze všimnout, že hodnoty se od jednotlivých autorů liší. [7][11]

Tab. 6: Přehled parametrů rovnice růstu intermetalické vrstvy pro různé pájky a podklady dle různých autorů [7]

pájka	podklad	autor	fáze	parametry			
				$x_0 \cdot 10^{-6}$ (m)	A_0 (m·s ⁻ⁿ)	n (-)	E_a (J/mol)
Sn-37Pb	Cu	Hwang[27]	pevná	1,26	1,08E-02	0,36	45500
Sn-37Pb	Cu	Chan[29][30]	pevná	1,25	1,27E-02	0,5	52585
Sn-37Pb	Cu	Tu[28]	pevná	0,99	1,67E-05	0,497	29540
Sn-37Pb	Ni	Tu[28]	pevná	0,24	1,85E-03	0,463	45400
Sn-4,0Ag-0,5Cu	Cu	Hwang[27]	pevná	1,70	1,78E-02	0,52	57700
Sn-3,2Ag-0,8Cu	Cu	Siewert[31]	pevná	neudáno	2,18E-04	0,5	35000
Sn-3,5Ag-0,7Cu	Cu	Li G.[32]	pevná	1,48	4,59E-07	0,5	16335
Sn-3,8Ag-0,7Cu	Ni	Xu[33]	pevná	1,35	4,92E+00	0,51	72900
Sn-3,0Ag-0,5Cu	Cu	Zhao[34]	pevná	1,49	9,60E-08	0,5	13850
Sn-3,8Ag-0,7Cu	Cu	Li X.[35]	pevná	6,73	5,86E-04	0,5	40500
Sn-3,5Ag	Cu	Hwang[27]	pevná	1,83	2,04E-02	0,5	56700
Sn-3,5Ag	Cu	Vianco[36]	pevná	0,88	2,21E-01	0,42	59000
Sn-3,5Ag	Cu	Siewert[31]	pevná	neudáno	1,12E-03	0,5	41000
Sn-0,7Cu	Cu	Siewert[31]	pevná	neudáno	1,24E-04	0,5	33000
Sn-3,8Ag-0,7Cu	Cu	Liang[37]	kapalná	1,24	1,82E-04	0,5	31800
Sn-3,5Ag-0,5Cu	Cu	Tsao[38]	kapalná	neudáno	2,69E-04	0,5	32845
Sn-3,5Ag	Cu	Liang[37]	kapalná	1,18	6,33E-05	0,5	28700
Sn-0,7Cu	Cu	Liang[37]	kapalná	1,33	1,58E-05	0,5	22200

5.1.4 VLASTNOSTI INTERMETALICKÝCH SLOUČENIN

Vlastnosti intermetalických sloučenin se liší v návaznosti na vlastnostech použitých materiálů pájek i substrátů. Z mechanických vlastností se jedná např. o tvrdost dle Vickerse, která je u IMC o řád vyšší než u slitiny pájky. Rozdílná tvrdost materiálů negativně ovlivňuje životnost pájeného spoje a projevuje se vytvářením prasklin, zejména při tepelném cyklování nebo vystavení se vibracím. Tab. 7 zachycuje přehled rozdílných fyzikálních vlastností jednotlivých prvků a intermetalických sloučenin. [7][11]

Tab. 7: Tabulka přehledu fyzikálních vlastností kovů a intermetalických sloučenin [11]

Fyzikální vlastnosti, 25°C	Sn	Cu	Cu ₆ Sn ₅	Cu ₃ Sn
ρ_m objemová hmotnost [10 ³ ·kg·m ⁻³]	7,30	8,90	8,28	8,90
ρ elektrická rezistivita [10 ⁻⁸ · Ω·m]	11,50	1,70	17,50	8,93
α_E koeficient teplotní roztažnosti [10 ⁻⁶ ·K]	23,00	17,10	16,30	19,00
Yongův modul [GPa]	41,00	117,00	85,56	133,30
Vickersova tvrdost [MPa]	1000,00	300,00	3780,00	3650,00

Další z rozdílných vlastností je rezistivita nebo teplota tání, která je u IMC několikanásobně vyšší než u vlastních pájek. Problém může nastat při dlouholetém skladování, kdy vrstva IMC proroste až na povrch, a tím výrazně klesne pájitelnost ochráněného povrchu. [11]

5.2 DUTINY V PÁJCE

Obecně lze konstatovat, že přítomnost dutin (neboli voidů) se častěji vyskytuje u bezolovnatých pájek. Vliv jejich výskytu, velikost, množství a umístění má značný důsledek na snížení mechanické odolnosti, spolehlivosti a vodivosti pájeného spoje. Přesná úroveň dutin zatím nebyla definována, přesto je vzhledem ke zmíněným bodům snaha jejich množství a velikost minimalizovat. [16]

Hlavní vlivy na výskyt voidů u bezolovnatých pájek:

- Vyšší povrchové napětí
- Nižší rychlost smáčení
- Vyšší teploty tavení
- Vyšší koncentrace rozpouštědel v tavidlech

Další faktory ovlivňující výskyt dutin: [7]

- Pasta
 - Materiál kuliček pájky
 - Tavidlo
 - Pojivo
- Teplotní profil
 - Strmost
 - Teploty
 - Časy
- Povrchové úpravy
 - HASL
 - OSP
 - ENIG
 - Imersní Cín
- Šablona
 - Materiál
 - Tloušťka
 - Druh předlohy
 - Velikost apertury
 - Technologie výroby
- Tavidlo
 - Aktivita tavidla
 - Bod varu rozpouštědla
 - Rozpustnost
 - Viskozita
 - Aktivátor (halogeny, nehalogenové, chlorid amonný, aminy, amoniak kyselina fosforečná...)
 - Množství aktivátoru
- Ochranná atmosféra

Pro vytvoření kvalitního spoje je podmínkou dodržování mezních parametrů stanovených výrobcem, a to nejen pro zmíněné body, ale také je potřeba dbát na dodržení teplot v souladu s jednotlivými komponentami obsaženými na DPS. [7]

Dle studie Minimizing BTC Voids [17] je patrné, že vyšší maximální teplota pájecího profilu má za následek vyšší množství dutin ve spoji. Vyšší teplota způsobuje rychlejší vysoušení tavidla a zvyšuje se viskozita. Naopak prodloužením TAL mají plyny dostatek času na sublimaci z kapalně pájky a množství voidů vzniklých z odpařování plynů se sníží. Tento pokles je však v porovnání se správně zvolenou maximální teplotou nevýrazný. [17]

Velikost dutin má zásadní vliv na vlastnosti. Větší průměry dutin ovlivňují pájený spoj více než dutiny menšího průměru. Vlivem snižujícího se průřezu s rostoucí dutinou se zvyšuje odpor a snižuje se schopnost odvádět nežádoucí teplo. [18]

V současnosti existuje několik norem, zabývajících se touto tematikou, v nichž jsou dutiny označovány jako anomálie, procesní indikátory nebo např. defekt pájení. Povolená velikost dutin v kuličkách BGA udává např. norma IPC-7095 (Tab. 8). [19]

Tab. 8: Třídění dutin dle normy IPC-7095C pro kuličky o průměrech 1-1,5 mm [19]

Umístění dutiny	Třída I	Třída II	Třída III
Voidy v pájce před zapájením	Až 90 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 20 % plochy kuličky.		
Voidy na rozhraní pouzdra před zapájením	Až 80 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 15 % celkové plochy.	Až 70 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 10 % celkové plochy.	Až 50 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 5 % celkové plochy.
Voidy ve spoji po přetavení	Až 100 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 25 % plochy kuličky.		
Voidy na rozhraní pouzdra po přetavení	Až 100 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 25 % celkové plochy.	Až 80 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 20 % celkové plochy.	Až 60 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 15 % celkové plochy.
Voidy na rozhraní substrátu po přetavení	Až 100 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 25 % celkové plochy.	Až 80 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 20 % celkové plochy.	Až 60 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 15 % celkové plochy.

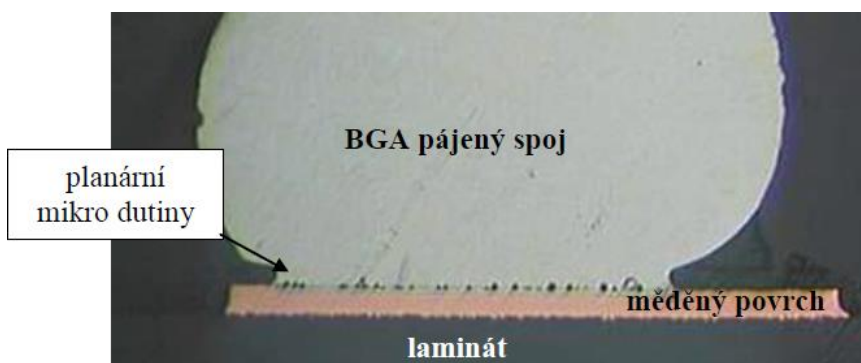
Norma ECSS stanovuje maximální velikost voidu na 10 % pájené plochy s tím, že hodnota součtu jednotlivých dutin v jednom pájeném spoji nesmí přesáhnout 25 %.

Dle příčiny vzniku lze dutiny rozdělit na několik typů: [17]

- Planární mikro dutiny
- Intermetalické dutiny
- Špendlíkové dutiny
- Dutiny vzniklé objemovým smršťováním
- Makrodutiny - vzniklé během procesu pájení

5.2.1 PLANÁRNÍ MIKRO DUTINY

Planární mikrotrhliny neboli Champagne voids se vyskytují na rozhraní intermetalických vrstev a pájek. Snižují pevnost spoje a urychlují šíření trhlin a prasklin při mechanickém nebo tepelném namáhání. Dosahují rozměrů do jednoho μm , a jsou často zaměňovány s jiným typem mikro dutin (Kirkendallový). Na Obr. 8 je znázorněn řez BGA s planárními mikro dutinami. Planární mikro dutiny vznikají obdobně jako procesní dutiny. [20]

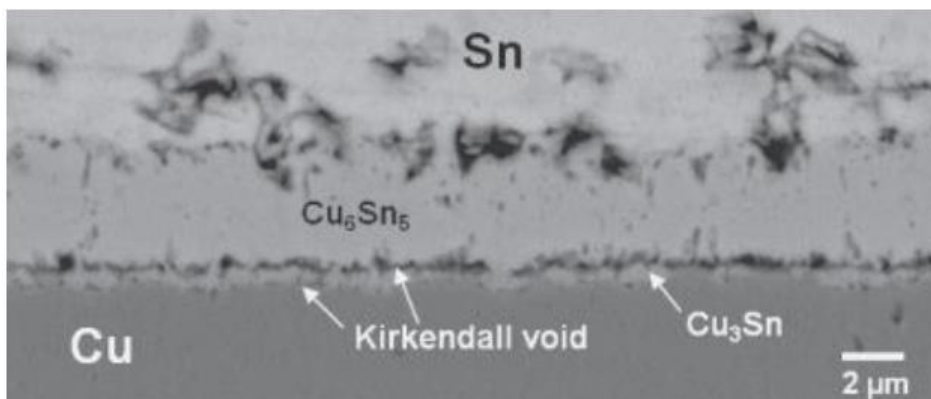


Obr. 8: Planární mikro dutiny u BGA [20]

5.2.2 INTERMETALICKÉ DUTINY

Intermetalické dutiny, zvané také jako Kirkendallový dutiny, vznikají na rozhraní dvou materiálů vlivem difúze kovů, které jsou ve styku za dlouhodobého teplotního namáhání. Tyto dutiny jsou zjištělné prostřednictvím analýzy metalografických výbrusů.

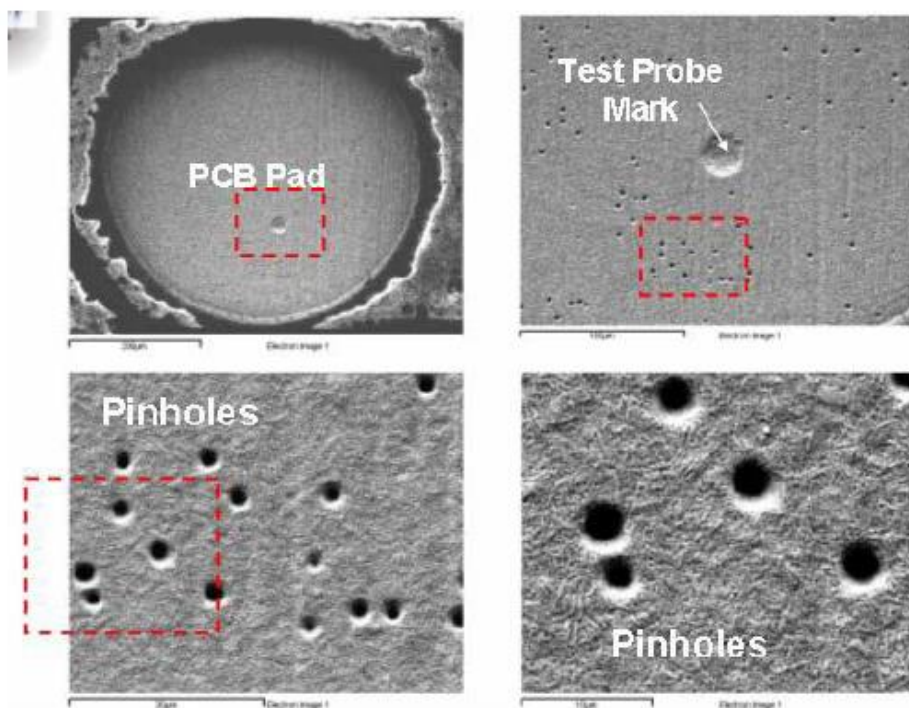
Během interdifúze vzniká intermetalická sloučenina. Jeden z materiálů difunduje rychleji, a tím vznikají malé defekty, které se spojují a vzniká dutina. Příklad těchto dutin viz Obr. 9. [20]



Obr. 9: Kirkendallový dutiny [20]

5.2.3 ŠPENDLÍKOVÉ DUTINY

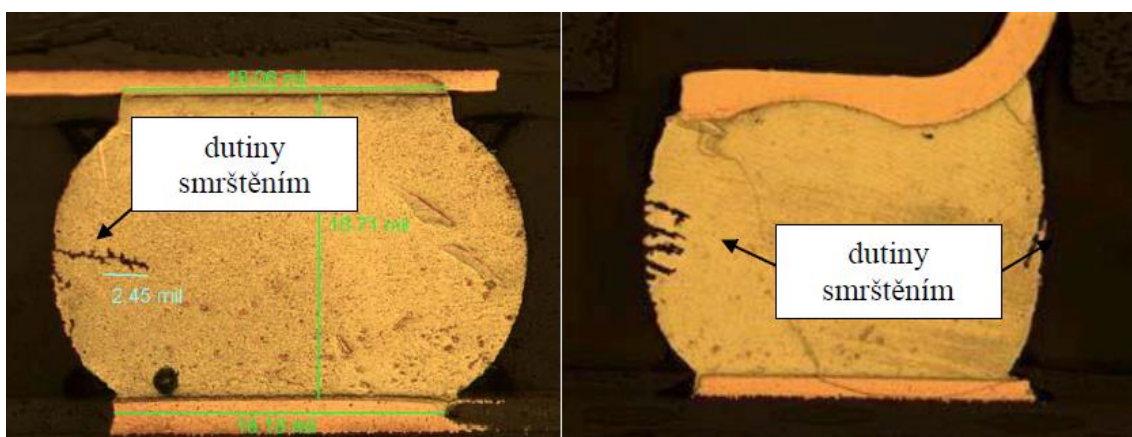
Špendlíkové dutiny, neboli Pinhole se objevují na plošce DPS. Vznikají v průběhu procesu pájení přetavením, únikem plynů z pokovených pájecích ploch. Příklady špendlíkových dutin lze vidět na Obr. 10. [20]



Obr. 10: Pinhole dutiny [20]

5.2.4 DUTINY VZNIKLÉ OBJEMOVÝM SMRŠŤOVÁNÍM

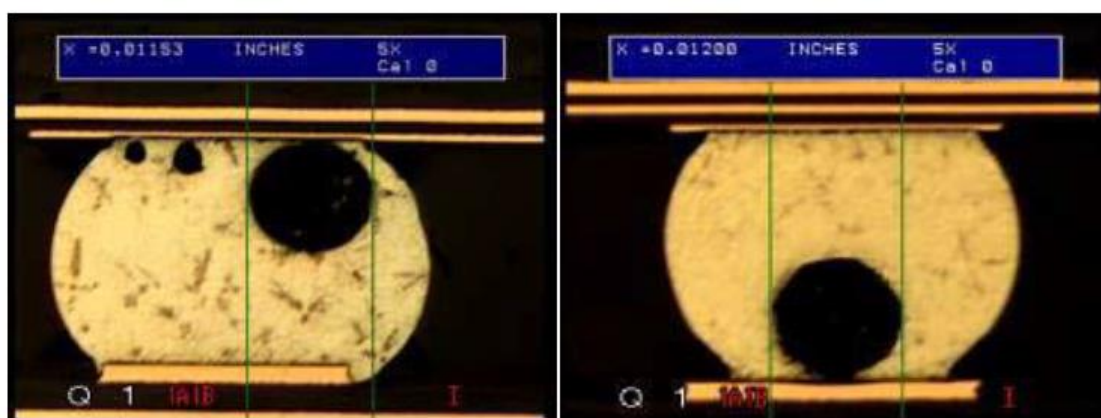
Schrinkhole voids, neboli dutiny v pájce vzniklé vlivem objemového smršťování (viz Obr. 11). se nejčastěji vyskytují u pájecích slitin SAC. Vlivem rychlosti tuhnutí se převážně objevují na povrchu pájky, kde materiál tuhne jako poslední. Vliv na spolehlivost spoje je zanedbatelný a množství dutin se nemění s teplotním ani mechanickým zatížením. [20]



Obr. 11: Shrinkhole dutiny [20]

5.2.5 MakroDUTINY

Makro dutiny, jinak zvané procesní voidy, vznikají v průběhu pájení uvolněním těkavých složek rozpouštědel, tavidel a pájecích past, kvůli nedostatečnému času k uniknutí před zatuhnutím pájky. Dosahují průměru od 100 až po 300 μm a mohou se vyskytovat kdekoliv v pájeném spoji a nejsou omezeny na ulpívání u povrchu či v přechodových oblastech. Norma IPC uvádí maximální plochu zabíranou dutinami na 25 %. Příklad metalografického výbrusu BGA spoje s makro dutinou viz Obr. 12.



Obr. 12: Makro dutiny v pájených spojích [21]

Na vznik makro dutin má vliv mnoho faktorů, z nichž nejzásadnější je chemické složení pájecí pasty (tavidla), využitý teplotní profil a ochranná atmosféra (pozitivní vliv zejména dusíková).

Díličí vlivy na vznik makro dutin:[21]

- Pájecí pasta
 - Množství
 - Vlastnosti pájky
 - Aktivita tavidla a jeho množství
- Pájecí profil
 - Vrcholová teplota
 - Čas nad likvidem
 - Doba aktivace tavidla
 - Strmost profilu
- DPS a součástky
 - Povrchová úprava
 - Znečištění
 - Velikost a design desky
 - Obsah oxidů na pájeném povrchu
- Všeobecné faktory
 - Teplota a vlhkost okolí
 - Znečištění vnějšími vlivy

Teplotní profil se koriguje např. naddimenzováním teploty v peci, což má však neblahý účinek na životnosti součástek a deformaci DPS. Pro korekci se dále aplikuje zkrácení profilu na nejnižší možnou dobu. Tím se však zkrátí doba nad likvidem, a tedy i doba na odstranění tavidlových zbytků (zejména rozpouštědla). Strmost profilu je spjata dále např. i s vytvářením prasklin a dalšími defekty.

6 METODY HODNOCENÍ KVALITY PÁJENÉHO SPOJE

Testování pájených spojů vychází z norem, níže je uvedeno několik českých a mezinárodních norem:

- **ČSN EN 6137-1-1.** Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – Část 1-1: Zkouška odolnosti proti odtržení.
- **ČSN EN 62137-1-2.** Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1–2: Zkouška pevnosti ve smyku.
- **ČSN EN 62137-1-3.** Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti pro povrchově montované pájené spoje – část 1– 3: Zkouška cyklickým padáním.
- **ČSN EN 62137-1-4.** Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti pro povrchově montované pájené spoje – část 1– 4: Zkouška cyklickým ohybem.
- **ČSN EN 62137-1-5.** Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti pro povrchově montované pájené spoje – Část 1– 5: Mechanická únavová zkouška smykem.
- **ČSN EN 62137-3.** Technologie montáže elektroniky – Část 3: Směrnice pro volbu metod zkoušek vlivu prostředí a zkoušek trvanlivosti pro pájené spoje.
- **ČSN EN 62137-4.** Technologie montáže elektroniky – Část 4: Metody zkoušek trvanlivosti pro pájené spoje povrchově montovaných pouzder s vývody typu plošné pole. [22]
- **IEC 62137–1–2: 2007** – Metoda zkoušení vlivu prostředí a odolnosti na pájený spoj při povrchové montáži - Zkouška pevnosti ve smyku
- **IEC 60068–2–21: 2006** – Zkušební metoda pro pájitelnost a odolnost proti pájecímu teplu
- **IEC 2137–1–5: 2009** – Metoda zkoušení prostředí a odolnosti na povrchu - Mechanická zkouška únavovou zlomeninou
[22]

Hodnocení kvality pájeného spoje lze provést několika metodami, které lze rozdělit následovně:

Nedestruktivní

- Optická analýza
- Měření přechodového odporu spoje
- RTG analýza
- Funkční test

Destruktivní

- Metalografický výbrus
 - analýza optickým, nebo elektronovým mikroskopem
- Mechanická zkouška např:
 - Zkouška tahem nebo stříhem
 - Vibrační zkouška
 - Zkouška teplotním cyklováním

6.1 METALOGRAFICKÝ VÝBRUS PŘÍČNÉHO SPOJE

Proces metalografického výbrusu lze rozdělit do několika fází.

- a) Řezání vzorku
- b) Preparace vzorku
- c) Broušení
- d) Leštění
- e) Leptání

Nejprve je potřeba separovat analyzovanou oblast. Pro zmenšení vzorku a přiblížení se k analyzované oblasti, se nejčastěji využívají rezačky s diamantovým, nebo karbidovým kotoučem. Jako chladicí kapalina se obvykle využívá voda.

Dalším krokem je preparace zahrnující broušení za pomoci brusných papírů s hrubostí 120 až 2000. Účel této fáze spočívá ve vyhlazení nerovností po řezu a přesnější určení oblasti analýzy (lze provádět ručně i automaticky). V průběhu procesu je důležitý konstantní přísun vody a oplachování vzorků, aby nedošlo k poškození nebo změně vlastností vzorku.

Následné leštění již neslouží primárně k úběru materiálu, nýbrž se definuje rovina řezu. Principiálně jsou si však procesy leštění a broušení velice podobné. Vzorek je pod určitou silou

přítlačení k rotujícímu kotouči za přítomnosti leštícího média v podobě prášku, pasty, nebo emulze. Pro některé média je doporučeno využívat pomocné chladící nebo smáčivé médium. Emulze mohou být na olejové, lihové nebo vodní bázi s přídavkem diamantového prachu o různých hrubostech, nebo např. Al_2O_3 Cr_2O_3 , případně MgO . V příručkách je obvykle zmíněno, který leštící kotouč je vhodný, pro jaké leštící médium a pro jakou konkrétní hrubost obsaženého leštícího prostředku. [22]

6.2 VIBRAČNÍ ZKOUŠKA

Jedná se o jednu z nejrozšířenějších mechanických zkoušek, testující odolnost elektrické sestavy vůči vibracím (mechanickému poškození). Testování je definováno normou ČSN EN 60068-2-47 a mnoha dalšími. Výhodou jsou dobře zpracované teoretické základy, které umožňují lehčí nastavení zkoušky. Lze nastavovat jak vertikální, tak i horizontální frekvenční rozsahy (jednotky Hz až 2 kHz) a dobu trvání zkoušky. V průběhu testování lze současně vyhodnocovat, zda nedošlo k přerušení spoje na DPS. [22]

6.3 ZKOUŠKA TEPLOTNÍM CYKLOVÁNÍM

Podstatou je cyklické namáhání změnou teploty, volitelně pak i s řízenými změnami vlhkosti. Zkouška se provádí v cyklovací komoře při pomalých změnách teplot, nebo v šokových komorách, kde je vzorek přemísťován mezi chladnou a vyhřátou komorou. Lze nastavovat gradienty růstu a klesání teplot, maximální hodnoty a případně také prodlevy. Rovněž se hojně využívá signalizace přerušení testovaných pájených spojů.

V důsledku rozdílného součinitele teplotní roztažnosti součástky a DPS, vzniká v pájeném spoji mechanické napětí, jehož vlivem dochází k poměrnému posunutí, které popisuje vztah 1.2

$$\Delta\varepsilon = \frac{L\Delta\alpha\Delta T}{2h}, \quad (1.2)$$

kde $\Delta\varepsilon$ - poměrné posunutí spoje [ppm], L – délka součástky [m], $\Delta\alpha$ – rozdíl součinitelů délkové teplotní roztažnosti DPS a pouzdra součástky [$\text{ppm} \cdot \text{K}^{-1}$], ΔT – rozdíl teplot [K] a h – výška pájeného spoje [m]. [22]

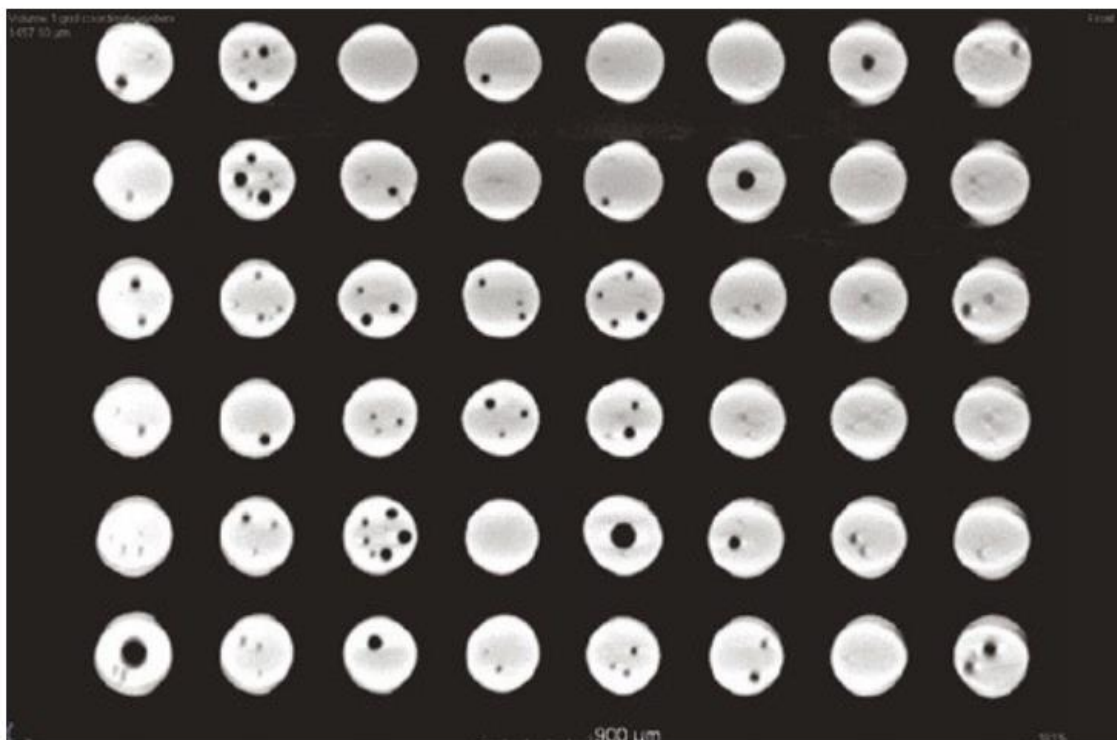
6.4 RTG ANALÝZA

Při charakteristickém RTG záření dochází k uvolnění urychlených elektronů z rentgenky (obsahuje anodu a katodu nejčastěji z wolframu, na elektrody přiváděno vysoké napětí) na anodu (wolfram) a předávají svou energii elektronům v atomech anody. Dále dochází k **excitaci** (vyražení elektronů na vyšší energetickou hladinu), případně **ionizaci** (vytržení elektronu z obalu atomu). Rozdílná energie mezi jednotlivými hladinami je konstantní a závislá na materiálu anody (vyšší energie pro vyšší protonové číslo prvku anody). Vzniká RTG záření pouze o určité stanovené délce. [23]

RTG analýzu je možné aplikovat u sledování většiny typů dutin, výjimkou jsou např. mikrovoidy, pro jejichž diagnostiku je zmíněná metoda jen těžko využitelná a je potřeba aplikovat metalografie. Nedestruktivní RTG inspekci lze rozdělit na dvourozměrné (časově méně náročné a limitované rozměry zkoumaného dílu) a třírozměrné testy, využívající tomografické metody. Dále je potřeba zvolit vhodné upnutí a umístění vzorku. Při potřebě získat vyšší zaostření se díl umístí blíže k bodovému zdroji RTG. Pro 3D testy se využívají především CT inspekce, pro kterou se využívají vzájemnou rotaci vzorku a RTG zářič/detektor, případně jejich vzájemný posuv, který je limitován rozměry. [23]

Při inspekci voidů v materiálu může nastat situace, kdy sumační snímek 2D inspekce je plně postačující. Sumačním snímkem se zde rozumí pomyslný paprsek RTG záření postupující materiálem tlumící se o jednotlivé vrstvy materiálu. Výsledná intenzita je utlumena sumou útlumů všech vrstev, kterými musel projít. Finální obraz je tedy nezávislý na faktu, zda je zkoumaný vzorek (deska plošných spojů), orientován součástkami vzhůru nebo dolů.

Pro získání 2D snímků lze využít i automatickou inspekci, kde algoritmus na základě rozložení odstínů šedi určí prahovou hodnotu pro detekci přítomnosti pájky. Pomocí rozpoznávání objektů v obrazu, pak může automaticky spočítat velikosti ploch a hodnotit tak i velké série spojů. Automatická inspekce se může značně zkomplikovat např. přítomností prokůvů pod pouzdrem součástky (BGA), kdy je potřeba automatický algoritmus obohatit o mechanismus pro vyhledání nebo substrakci rušivých elementů. Případně lze využít CT technologii. Při získání dostatečného množství vstupních 2D obrázků pro výpočet CT obrazu zkoumaného objektu, lze získat dostatečný nástroj pro analýzu pájeného spoje ve všech třech rovinách. Automatickou inspekci pak není ovlivněna přítomností dalších součástek nebo prokůvů (Obr. 13). Rovněž je možné identifikovat i vznik dutin. [23][24]



Obr. 13: Příklad snímku RTG BGA [24]

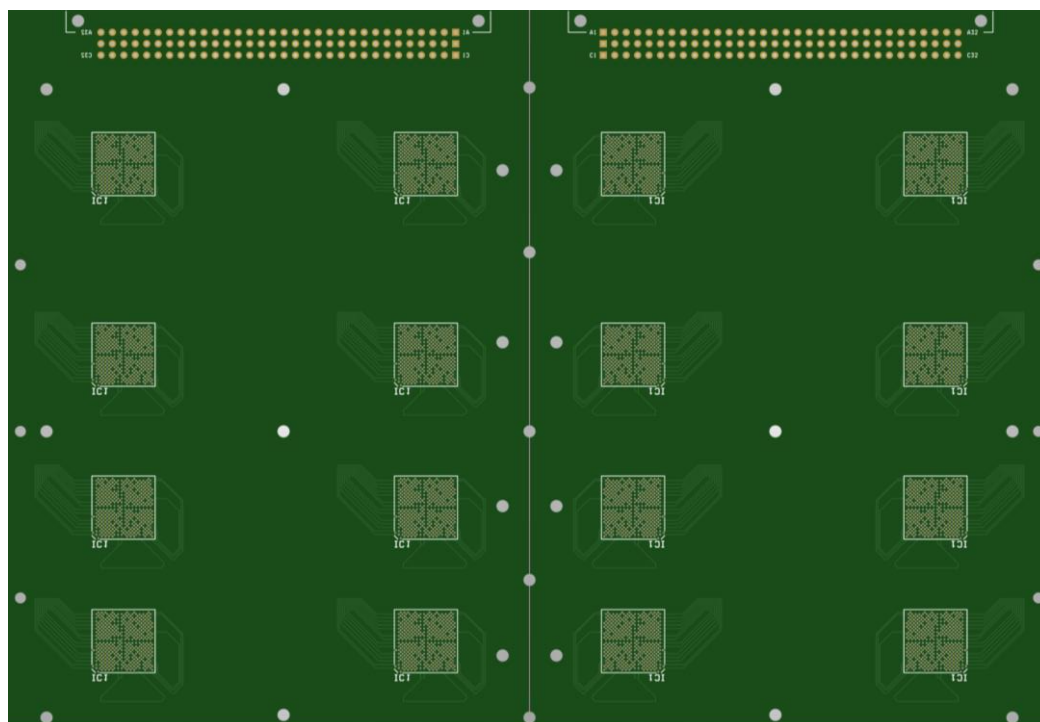
7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Praktická část popisuje technologické zpracování 4 vzorků DPS s povrchovou úpravou ENIG. Nastavení teplotního profilu, osazení 26 FBG (LIFCL-40-7BG256C) do dvou pájecích past (LFM-48W TM-HP a LFM-48W TM-HP(L)) a pájení přetavením pro jeden průchod.

Závěrem je pak vyhodnocen vliv využitých past, potažmo tavidel a teplotního profilu na kvalitu pájeného spoje prostřednictvím analýzy zhotovených RTG snímků.

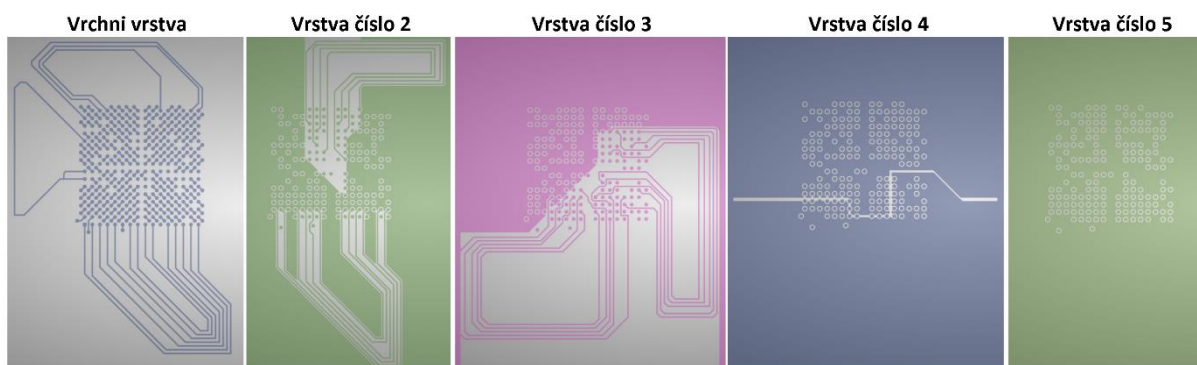
7.1 NÁVRH DPS

Pro testovací účely byly vytvořeny dva návrhy DPS v programu CAM 350. Obr. 14 zobrazuje motivy použitých DPS, s tím že se jedná o jeden návrh a jeho zrcadlově převrácenou kopii.

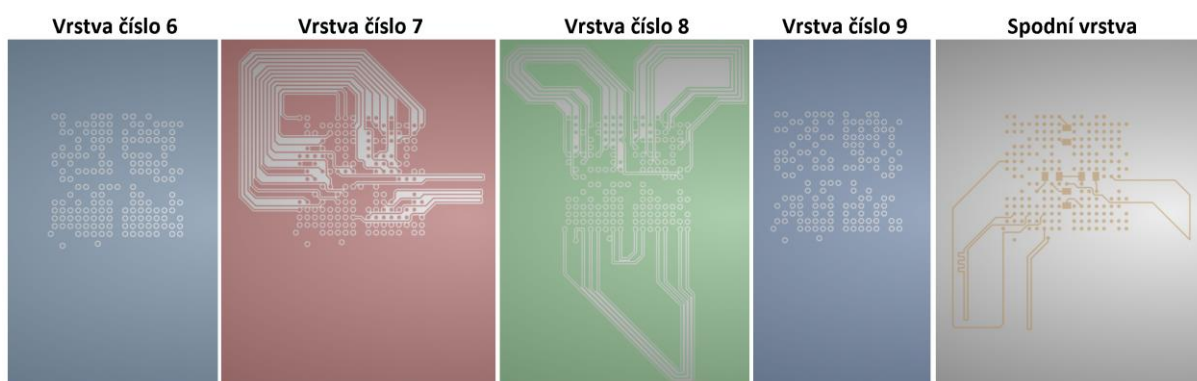


Obr. 14: Motivы testovaných DPS

Na každé testovací desce jsou vytvořeny pozice pro 8 kusů FBGA. Vývody jsou postupně zapojovány v 10 vrstvách, jejich schéma je zobrazeno na Obr. 15 a 16.



Obr. 15: Schéma vodivých cest pro jednotlivé vrstvy DPS 1-5

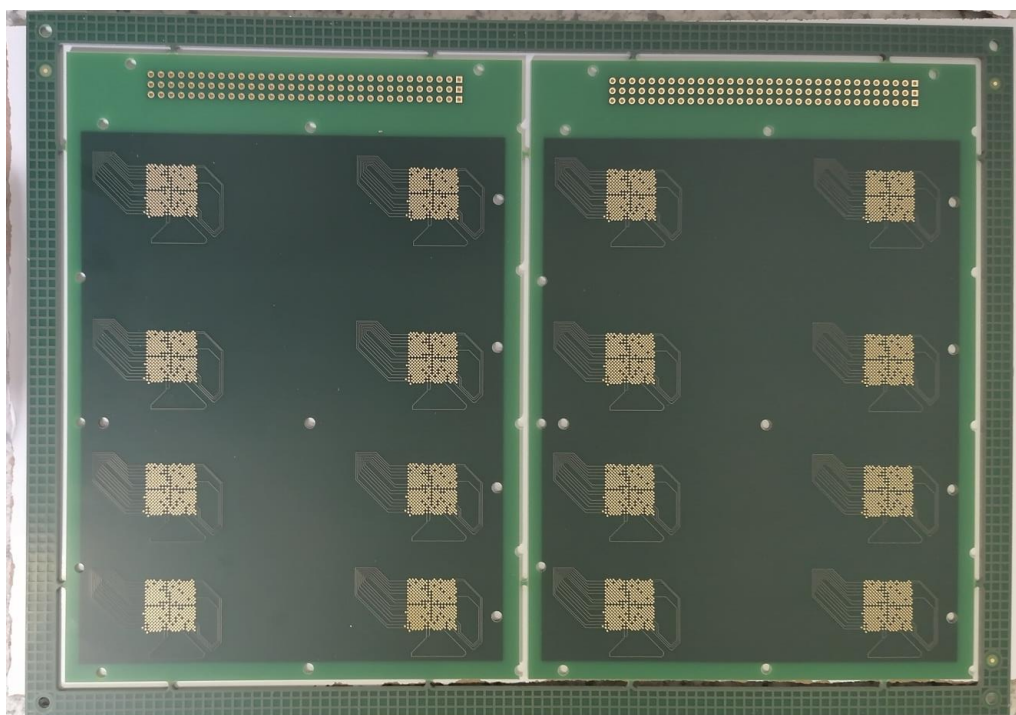


Obr. 16: Schéma vodivých cest pro jednotlivé vrstvy DPS

Návrh PCB byl zpracován s důrazem na požadavky na navazující testování. Měděné motivy vodivých cest byly navrženy v návaznosti na věrohodnost výsledků ze zkoušky teplotním cyklováním kvůli teplotní vodivosti materiálu. Rovněž je v návrhu vymezený prostor pro pájení konektoru, který je přítomen pro reálnější podmínky vibračního testu.

7.2 VÝROBA DPS

Výroba testovacích DPS proběhla subtraktivní technologií s fotorezistem ve společnosti PragoBoard. Rozměry DPS odpovídají 116,5 x 160,0 mm. Při výrobě byl použit základní materiál FR-4 (Isola IS400, 1,6 mm, Tg 180°) se základní vnější vrstvou mědi tloušťky 12 μm (+ nakovení 20 - 25 μm) a vnitřní vrstvou o tloušťce 18 μm , přičemž byl vytvořen motiv pro vnější vrstvy a vnitřní profil fólie byl zajištěn odleptáváním. Kvůli ochraně motivu je použita (zelená) nepájivá maska. Průřezy vrtání vias nastaveny na 0,15 mm a spoje, mezery a mezikruží zvoleny na hodnotu 100 μm . Celkem byly zhotoveny 4 kusy DPS s povrchovou úpravou ENIG. Vyrobené, neosazené DPS lze vidět na Obr. 17.



Obr. 17: Vyrobené, neosazené DPS

7.3 TISK PASTY, OSAZENÍ A PÁJENÍ

Technologické operace tisku pájecí pasty, osazení a pájení DPS proběhlo ve společnosti Safiral s. r. o. dle předpisů normy ECSS-Q-ST-70-61C.

Testovací vzorky, čipy FBGA LIFCL-40-7BG256C, byly rozděleny do skupin po osmi a pěti dle účelu zpracování vzorků. Nižší počet plánovaný pro následnou zkoušku vibracemi a vyšší pro experimentální účely. Modifikace souvisí s minimálním množstvím komponent (5), které musejí úspěšně projít vibračními testy pro uznání a kvalifikaci výrobního postupu splňující ESA standardy, ke kterým se váže tato diplomová práce.

7.3.1 TISK PÁJECÍ PASTY

Vybrány byly dvě bezolovnaté pasty o podobném složení, lišící se typem tavidla.

- **LFM-48W TM-HP**
 - Zrnitost: Type4(W) 20-38 μ
 - Typ tavidla **TM-HP**
 - Klasifikace tavidla: **ROL1**
 - Množství tavidla: 12 %
 - Teplota 217 - 220°C

- Klíčová vlastnost: vysoká odolnost vůči PH, dobré tvarovací schopnosti [26]
- **LFM-48W TM-HP (L)**
 - Zrnitost: Type4(W) 20-38 μ
 - Typ tavidla: **TM-HP L**
 - Klasifikace tavidla: **ROL1**
 - Množství tavidla 12 %
 - Teplota 217 - 220 °C
 - Klíčová vlastnost: Lepší formovací schopnosti na desce šablony a prodloužení životnosti šablony [27]

Výhodou zvolených no clean past je, že nezanechávají velké množství tavidlových zbytků, a proto není nutné jejich následné očištění. Dále obsahují tavidla o výborné teplotní stabilitě. Tavidlo TM-HP L se vykazuje lepšími formovacími schopnostmi na desce šablony, a tím pádem i menší pravděpodobností vzniku Tombstone defektům.

Tisk pájecí pasty byl plánován provést na zařízení Motoprint AVS, ovšem kvůli komplikacím souvisejícím s realizací šablony (chyba na straně výroby) bylo nutno přistoupit k ručnímu nanesení pasty. Modifikace má minimální vliv na kvalitu výroby a spíše se jednalo o zpomalení procesu, kvůli přesnému přiložení šablony k DPS. Úprava postupu byla v souladu s normami ECSS, které definují nutnost opakovatelnosti procesu, ovšem nikoliv její automatizaci. Šablona (Obr. 18) vyrobena z nerezové oceli tloušťky 130 μ m, otvory zhotoveny laserem.



Obr. 18: Nerezová šablona pro nanesení pájecí pasty

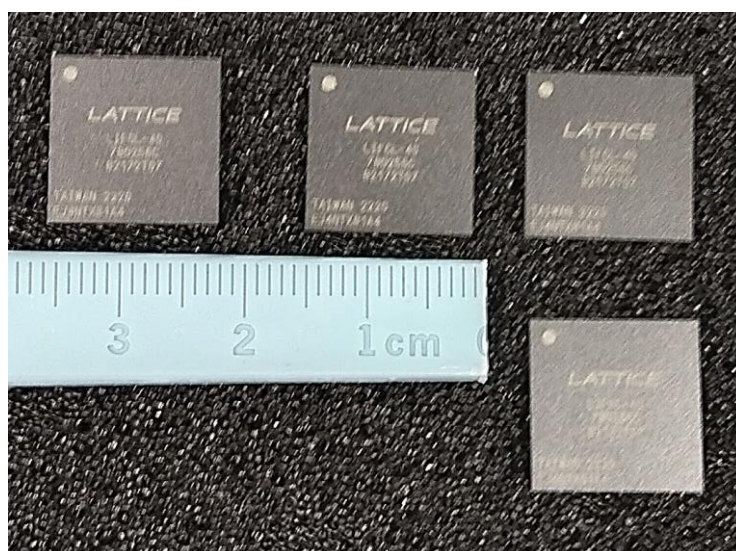
Před každou aplikací šablony bylo provedeno několik úkonů, spočívajících v očištění DPS a šablony. Jednalo se o otření suchým a čistým ubrouskem, opláchnutí isopropanolem a následný čištění stlačeným vzduchem o tlaku 10 bar. Po nanesení pasty se přistoupilo k inspekci pod lupou, kde se sledovala rovnoměrnost nanesení a správné umístění pasty. Pokud kus prošel inspekcí, přistoupilo se k přípravě (čištění) dalšího.

Enviromentální podmínky:

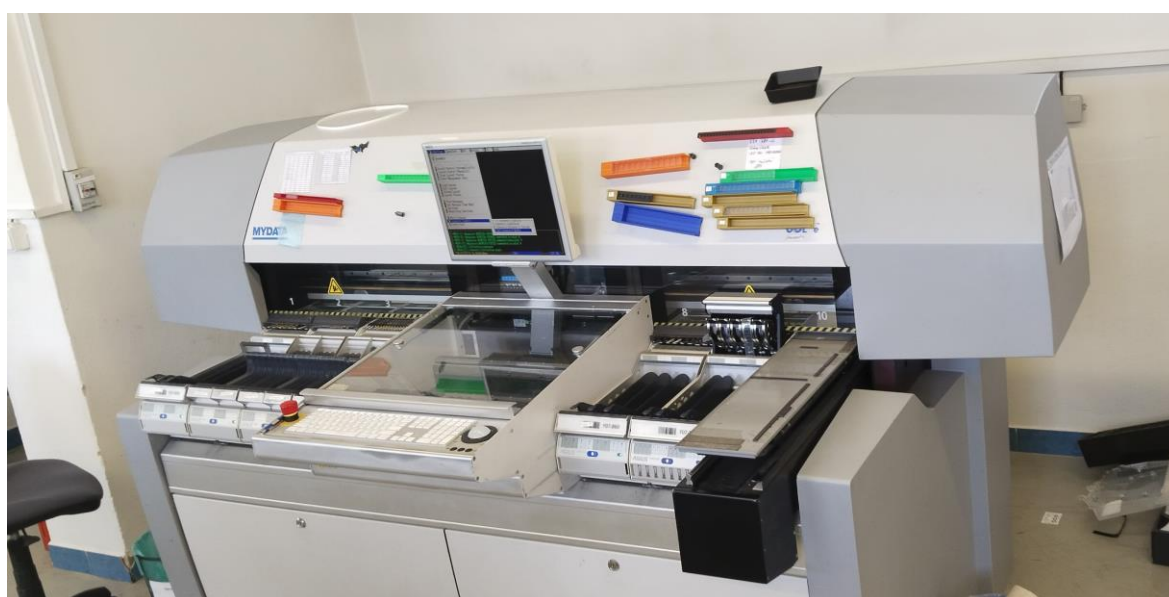
- Teplota vzduchu: 26 °C
- Relativní vlhkost: 45%
- Atmosférický tlak: 101,3 kPa

7.3.2 OSAZENÍ DPS

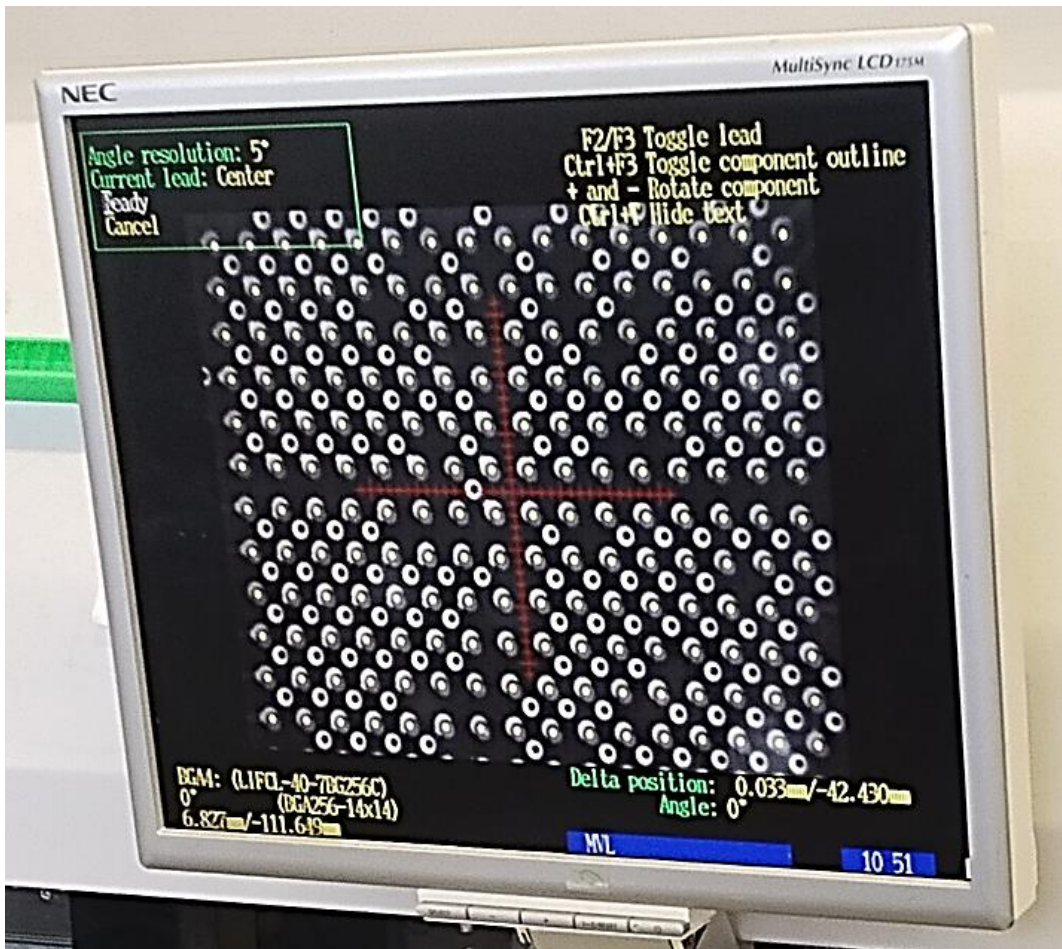
Osazení FBGA LIFCL-40-7BG256C (Obr. 19) proběhlo na automatu MYDATA MY200LX (Obr. 20) s nastaveným přítlakem 3,5 N. Zvolené FBGA bylo vybráno od výrobce Lattice, rozměry 14 x 14 x 0,8 mm, 256 pinů (materiál nikl/cín). Komponenty se umístily do plastového přípravku se stanovenými pozicemi pro jednotlivá FBGA. Zkontrolovalo se jejich umístění a rozměry. Neosazené DPS byly vloženy do stroje a zaměřily se pozice pro umístění čipů (Obr. 21). Vycentrování proběhlo za pomoci osového kříže (červená barva) a doplňkového pole znázorňujícího pozice pinů (žluté body). Takto se zavedly potřebné souřadnice u jedné DPS a u ostatních se již jednalo o aplikování nastavených parametrů.



Obr. 19: Fotografie čipu FBGA LIFCL-40-7BG256C

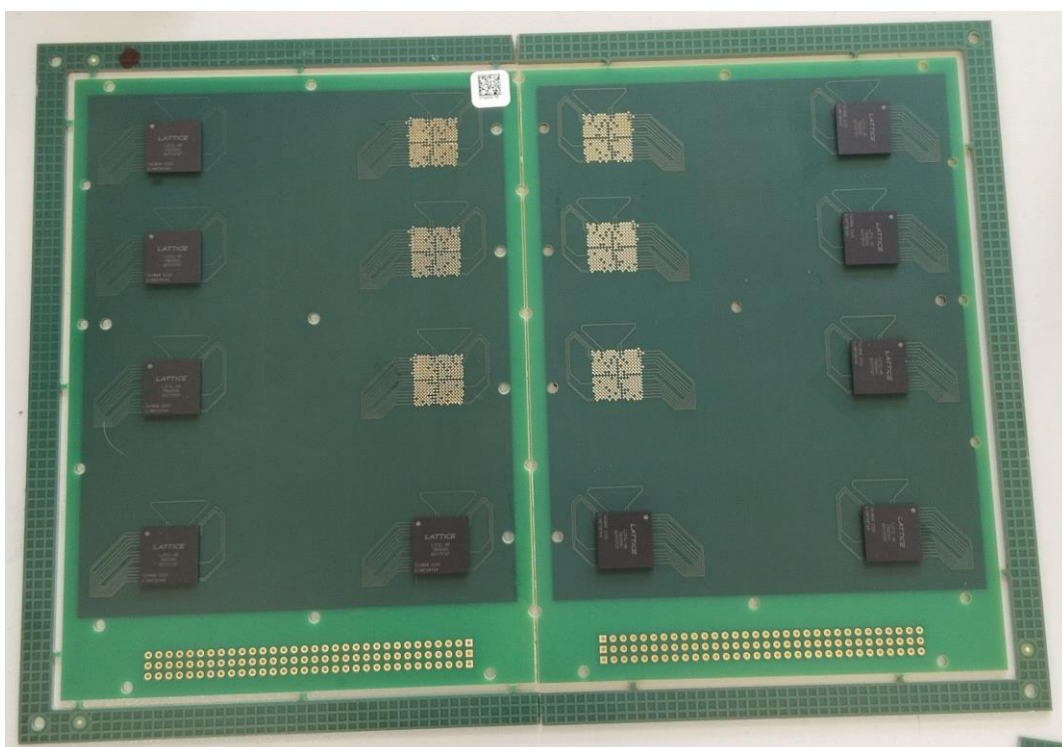


Obr. 20: Fotografie stroje MYDATA MY200LX



Obr. 21: Proces vycentrování polohy umístění FBGA na DPS

Na Obr. 22 si lze povšimnout již osazených DPS připravených na proces pájení.



Obr. 22: Osazené DPS připravené na průchod pecí

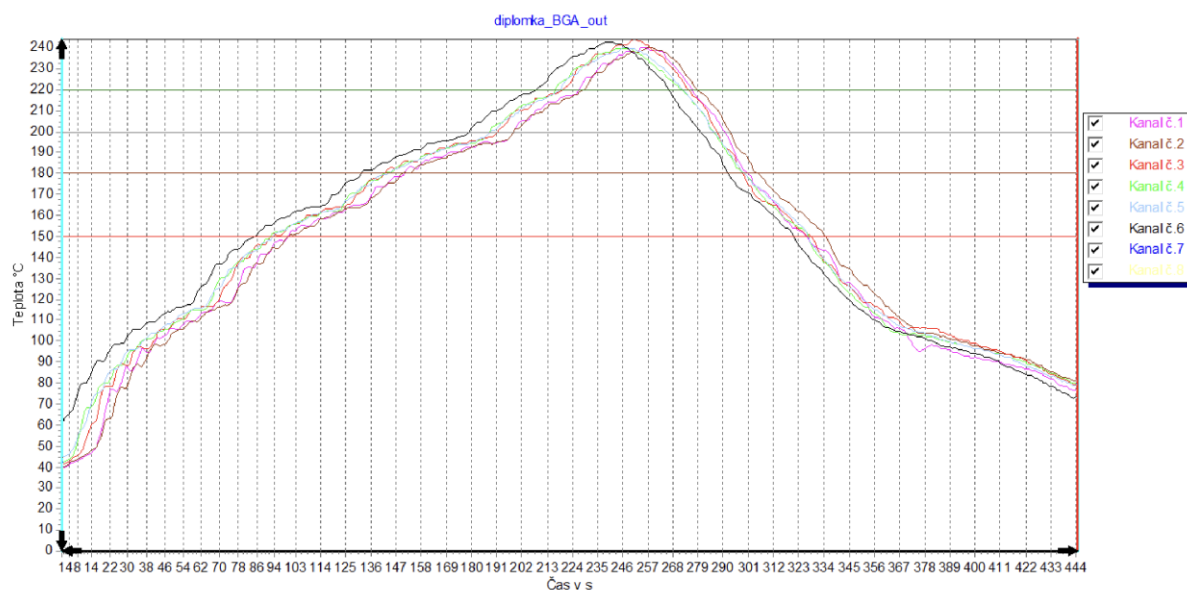
7.3.3 PÁJENÍ

Pájení přetavením se uskutečnilo bez přídavné atmosféry na sedmi zónové peci SMT Quattro Peak M (Obr. 23). Pro pec se pevně nastavil teplotní profil dle parametrů dokumentace pájecích past, komponent a konzultace s ESA (European Space Agency). Po zahřátí jednotlivých zón byla nejprve poslána DPS s pájecí pastou LFM-48W TM-HP, na které se odzkoušel aplikovaný teplotní profil. Následovala rychlá vizuální kontrola (lesk pájené pasty na neosazené pozici a soudečkový tvar pájených spojů) a kontrola prostřednictvím RTG zaměřující se na tvar pájených kuliček. Na RTG snímcích se objevily přijatelné odchylky od kruhovitosti a prokazatelně byl vidět výskyt několika málo voidů, splňující podmínku přípustnosti dle normy ECSS-Q-ST-70-61C (méně než 25% pájené plochy). Vzhledem k výsledkům inspekce mohly být poslány do výroby i zbylé DPS. Průjezd pecí včetně chladnutí trval 7,5 min.



Obr. 23: SMT Quattro Peak M

Pro každý typ DPS je doporučeno nastavovat vlastní odzkoušený teplotní profil. V této práci byly parametry voleny v návaznosti na výsledky z již existujícího projektu VPX Cards (spolupráce ESA se společností G.L. Electronic), kde byla využita pájecí pasta LFM-48W TM-HP a obdobné FBGA s většími rozměry kuliček (1 mm). Konkrétní nastavená teplotní křivka poskytnuta v typu souboru .png je znázorněna na Obr. 24.

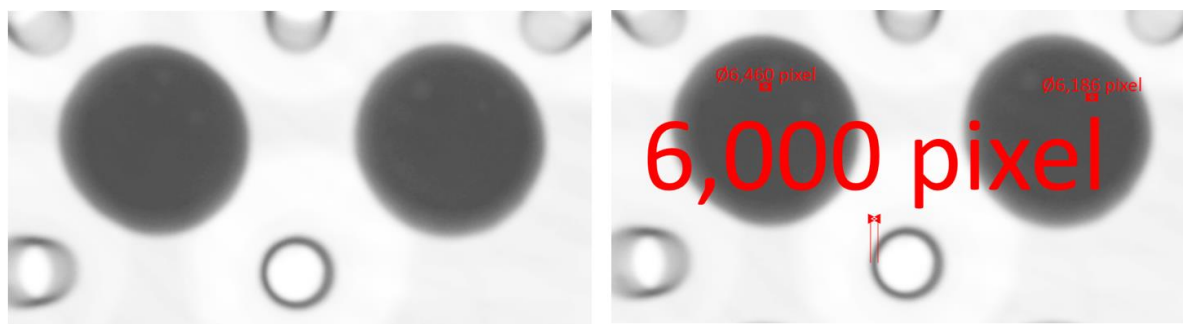


Obr. 24: Odzkoušený a nastavený teplotního profil

7.4 ZHOVENÍ RTG SNÍMKŮ

Norma ECSS-Q-ST-70-61C § 5.5.19, zaměřující se RTG inspekční vybavení, udává minimální detekovatelný rozměr, jako kuličku o průměru 0,03 mm a dále zmiňuje možnost automatického vyhodnocování jako formu průběžné kontroly procesu výroby, ovšem neměla by nahradit finální vizuální inspekci (ECSS-Q-ST-70-61C § 5.5.19 e.)

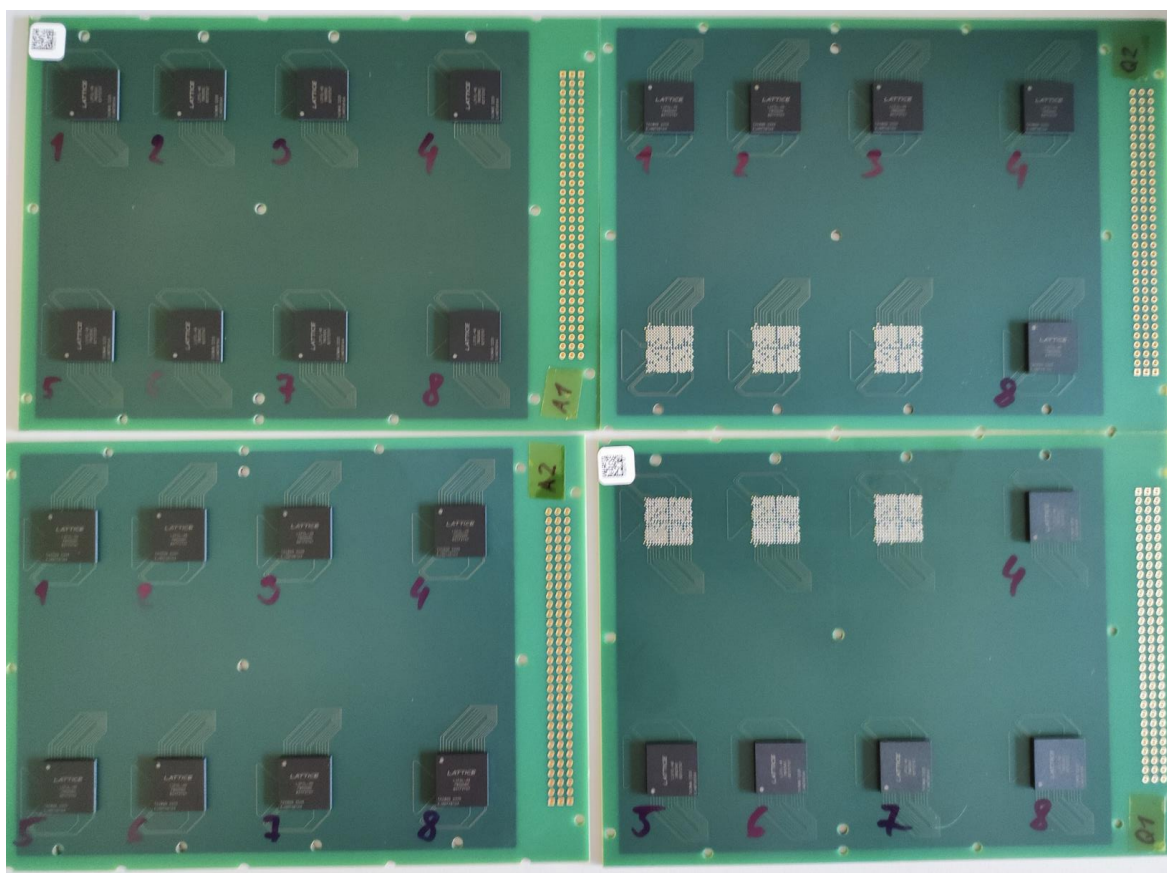
Demonstrační vzorky rozměru byly zvoleny vias, respektive jejich pokovená část dosahující rozměrů 0,02-0,025 mm (viz 7.2) dle objednaných a udávaných hodnot výrobcem. Na pravé části Obr. 25 je v programu ZEN-Core vyjádřena šířka prokůvů jako 6,00 px a průměry detekovaných indikací 6,17 a 6,48 px. Levá část ukazuje výstřižek z upraveného RTG snímku.



Obr. 25: Ověření minimálního detekovatelného rozměru

Pro zhotovení snímků byl využit GE PHOENIX X-RAY NANOMEX 180T [28] s nanofocus RTG technologií a možností automatické inspekce při bočním 70° pohledu. Zvětšení až 23320x (s 4" dvojitým obrazovým zesilovačem) zajišťuje detekovatelnost rozměrů voidů až 0,2 μm . Maximální voltáž tuby 180 kV a výkon na výstupu RTG tuby je 20 W. Ovládací systém je možné uzpůsobit mnoho konfiguracím, mezi které patří i software pro automatické vyhodnocování pájených spojů.

Orientace ve snímcích byla zajištěna označením jednotlivých DPS a FBGA (Obr. 26 a Tab. 9).

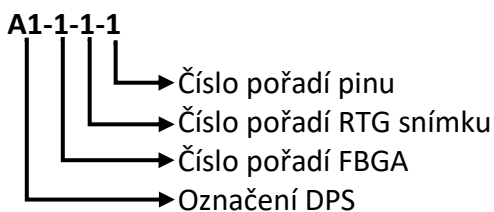


Obr. 26: Označení DPS

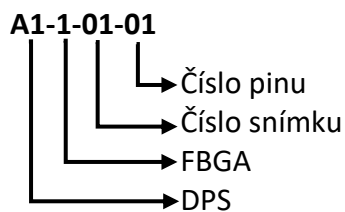
Tab. 9: Označení DPS a FBGA

Označení DPS	A1	A2	Q1	Q2
Typ pasty	LFM-48W TM-HP	LFM-48W TM-HP (L)	LFM-48W TM-HP	LFM-48W TM-HP (L)
Označení FBGA	1-8	1-8	1,2,3,4,8	4,5,6,7,8

Označení pinů v matici 4x4:

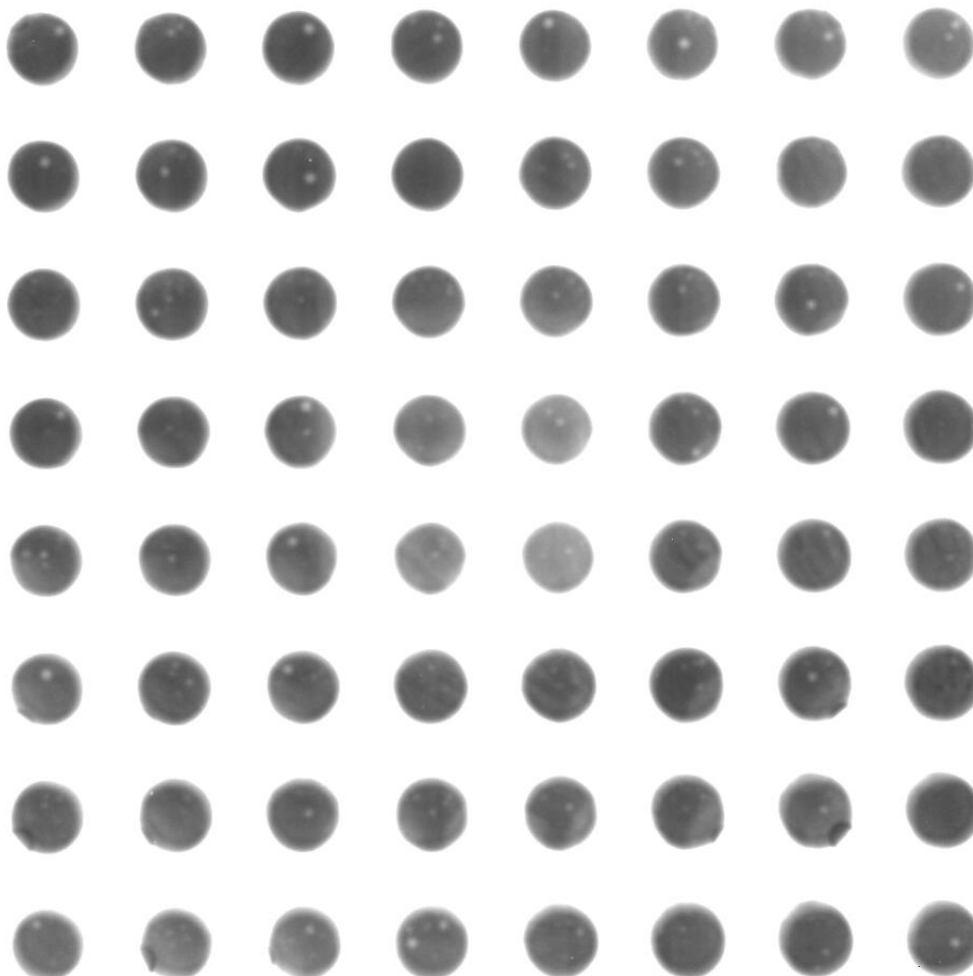


Označení pinů v matici 8x8:

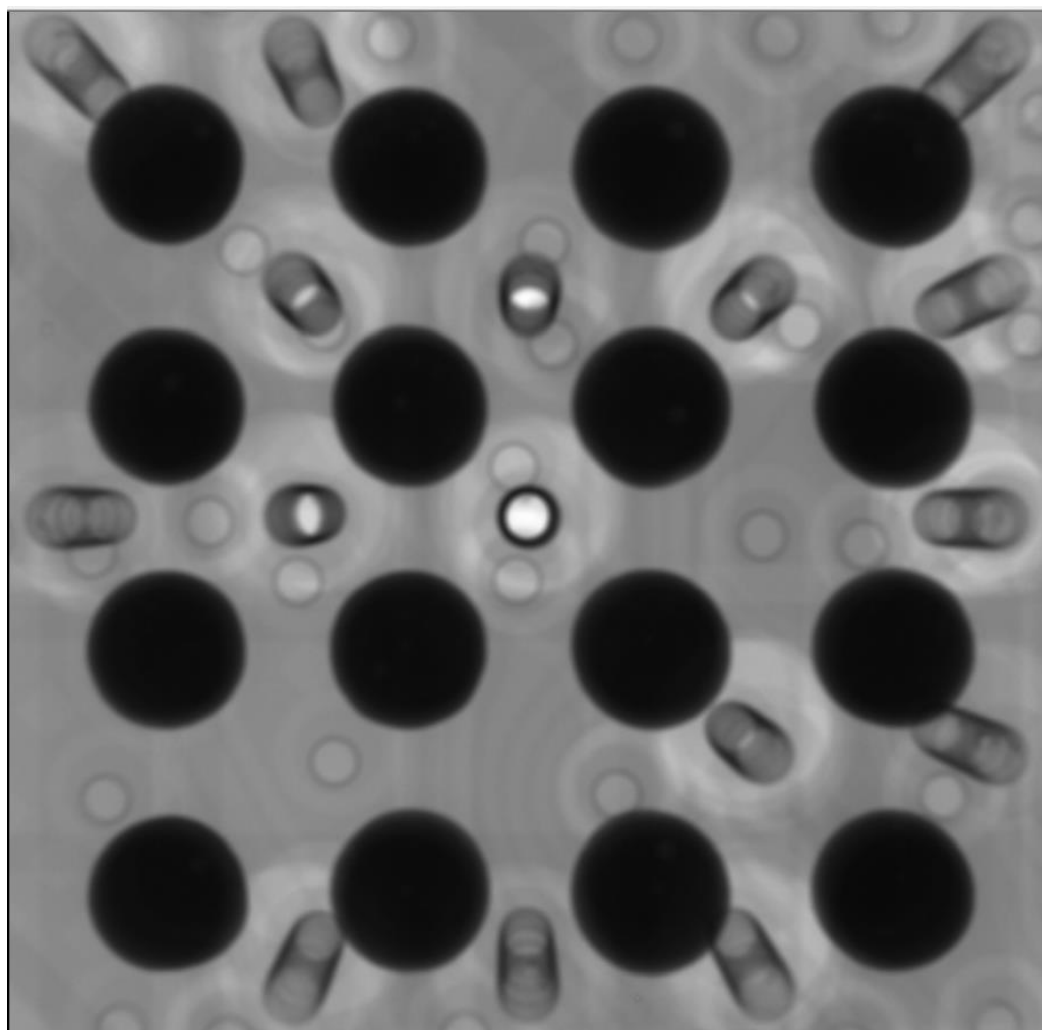


DPS A1 a A2 jsou připraveny pro návazné testování teplotním cyklováním a Q1 a Q2 se dále využijí pro vibrační testy a rovněž teplotní cyklování. Oba typy testů jsou nezbytné pro dokončení kvalifikace bezolovnatého pájení, ovšem nejsou stěžejní částí této diplomové práce. Z tohoto důvodu není průběh ani výsledek testů v této práci obsažen.

Celkový počet 520 snímků byl pořizován v maticích 8x8 (104 snímky) ve formátu .jpg a 4x4 (416) ve formátu .tif. Původní snímky s větším množstvím kuliček na čip a menším přiblížením bohužel nedosahovaly potřebného rozlišení pro automatické vyhodnocení, a proto bylo potřeba pořídit snímky nové. Příklady snímků jsou znázorněny na Obr. 27 a 28.



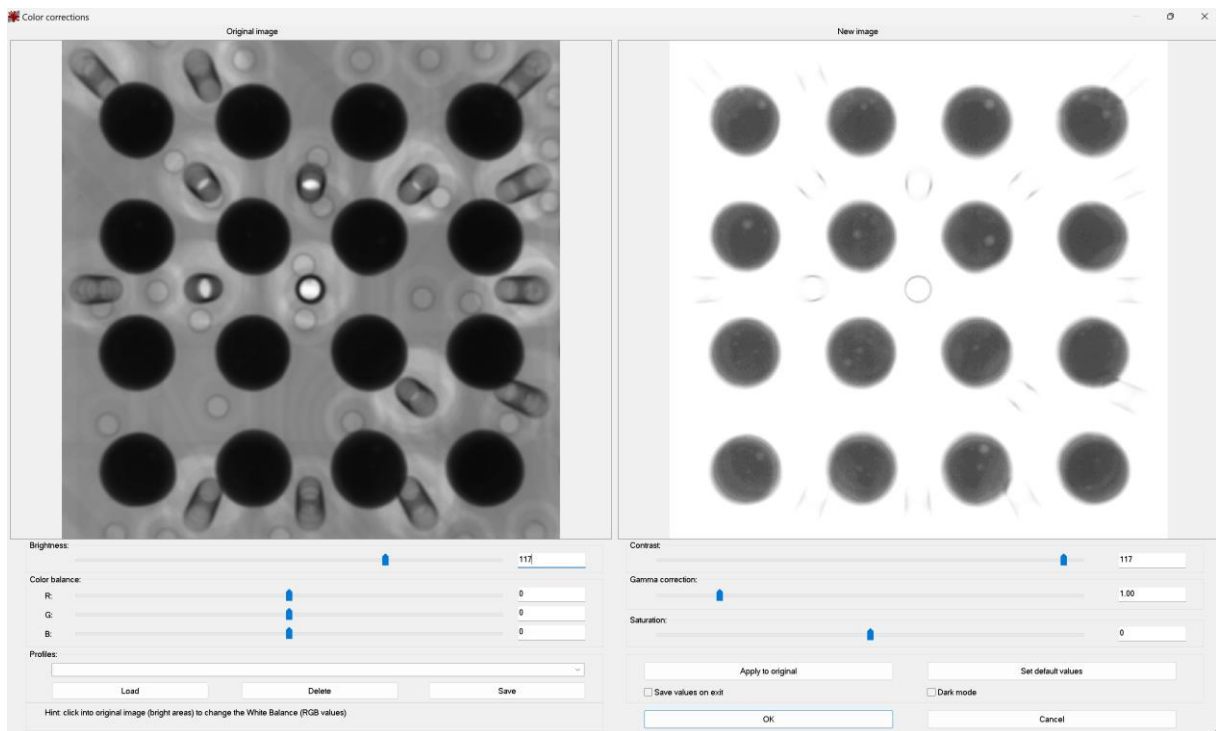
Obr. 27: RTG Snímek matice 8 x 8 (A1-1-1)



Obr. 28: RTG snímek matice 4 x 4 (A1-01-01)

7.5 ZPRACOVÁNÍ RTG SNÍMKŮ

Vyhodnocování RTG snímků se mimo jiné odvíjí od kvalitního, a především korektního zpracování obrazu. Jedná se zejména o úpravy kontrastu a jasu. Při využití nevhodných grafických nástrojů, jako např. gama korekce, dochází k potlačení indikací, které může vést k znehodnocení výsledků. Úpravy snímků byly provedeny v programu IrfanView. Jas byl zvýšen na rozmezí hodnot 116-125 a kontrast 116-120 (Obr. 29).

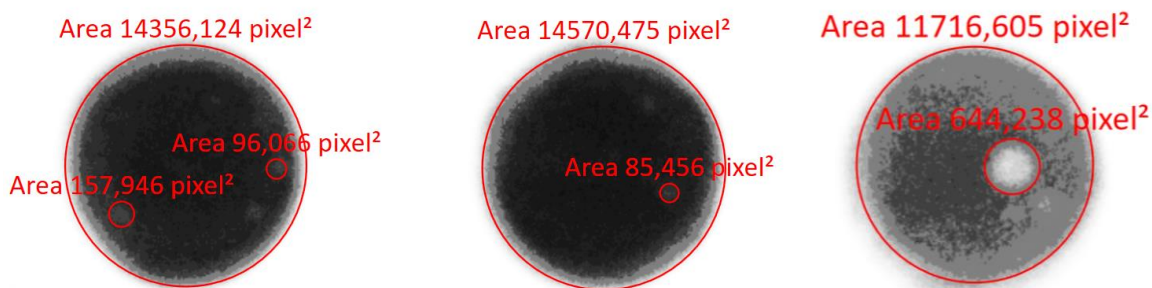


Obr. 29: Úprava RTG snímku A1-01-01

Automatické vyhodnocování nebylo využito, z důvodu nerovnoměrně zvýrazněného kontrastu na jednotlivých snímcích s tím, další úpravy snímků vedly k výraznému snížení automatické identifikovatelnosti voidů. Přistoupilo se tedy možnosti manuálního spočtení a určení velikostí dutin (ECSS-Q-ST-70-61 § 12.4a.5.NOTE 3).

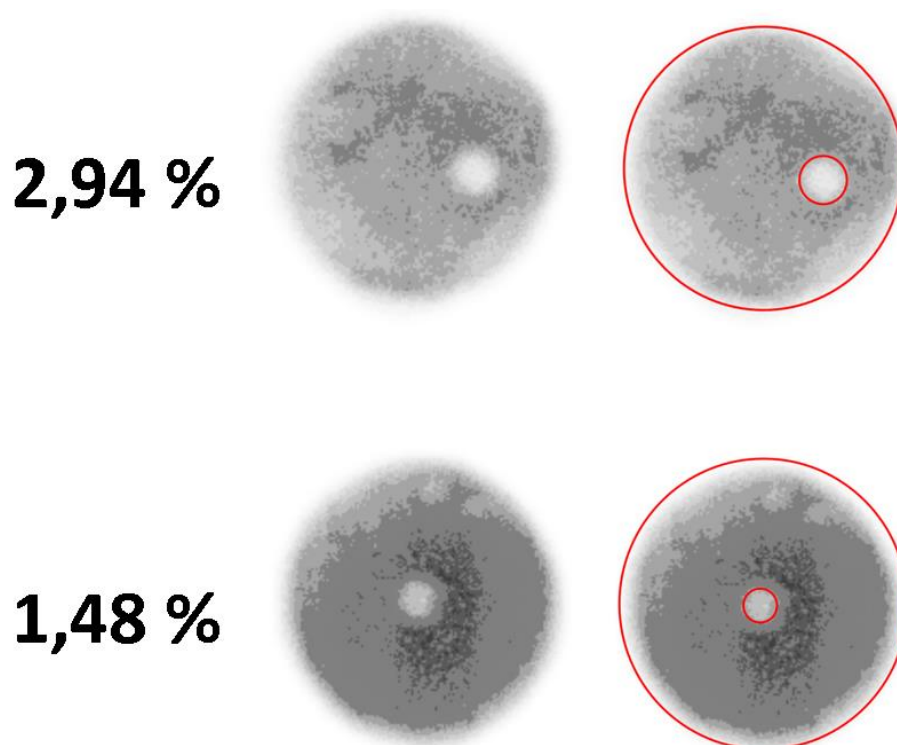
Pro zlehčení a zrychlení analýzy bylo potřeba voidy rozdělit do kategorií dle velikosti, čehož bylo docíleno vyhodnocením několika zvolených pinů FBGA, které byly voleny tak, aby byl proveden výpočet celou škálou velikostí. Toto bylo provedeno prostřednictvím softwaru ZEISS ZEN-Core v3.0, který je obvykle využíváný pro metalografické výbrusy, analýzu voidovitosti krimpovaných spojů, biologické materiály a další.

Zpracování spočívalo v ohraničení plochy pájeného spoje a voidu, vyjádření plochy v pixel² (Obr. 30) a následném přepočtu na procenta plochy dutiny vůči pájené části.



Obr. 30: Příklady zpracování snímků v programu ZEISS ZEN-Core v0.3.

Během zpracování byly pozorovány opakující se velikosti voidů, které lze rozdělit do tří kategorií dle velikosti. Reprezentativní vzorky voleny během prohlídky RTG snímků na základě průměrného zastoupení jednotlivých velikostí ploch. Pro zrychlení procesu analýzy a zpřesnění výsledků byl vytvořen vzor pro orientaci v kategoriích (Obr. 31), který znázorňuje hraniční velikosti dutin.



Obr. 31: Vzor pro zařazení voidů do velikostních kategorií

Záznam měření reprezentativních vzorků viz Tab. 10, ve které první sloupec označuje pořadí zvolených voidů, druhý zleva (%) procentuální vyjádření dutiny vzhledem k ploše pinu (červená barva - nejvyšší hodnoty, zelená - nejnižší) a poslední sloupec obsahuje zaokrouhlené hodnoty na celá čísla pro názornější zobrazení a určení velikostních kategorií.

Tab. 10: Přepočty ploch voidů na procentuální vyjádření pro určení velikostních kategorií

Plocha voidu - ZEN core				
#	Plocha pinu [pixel ²]	Plocha voidu [pixel ²]	%	≍
1	11716,605	644,238	5,50	5
2	11380,322	307,693	2,70	3
3	12285,944	105,07	0,86	1
4	12285,944	233,67	1,90	2
5	12878,563	61,133	0,47	0
6	12878,563	322,788	2,51	3
7	10802,966	290,27	2,69	3
8	10549,921	322,982	3,06	3
9	14356,124	157,946	1,10	1
10	14356,124	96,456	0,67	1
11	14570,475	85,456	0,59	1
12	13614,749	53,681	0,39	0
13	9893,607	97,092	0,98	1
14	9893,607	153,797	1,55	2
15	10405,18	136,759	1,31	1
16	11143,83	45,606	0,41	0
17	11143,83	195,833	1,76	2
18	12012,574	91,48	0,76	1
19	12409,597	153,379	1,24	1
20	12409,597	44,475	0,36	0
21	12769,47	149,689	1,17	1
22	12769,47	97,195	0,76	1
23	8083,464	291,591	3,61	4
24	8083,464	79,217	0,98	1
25	8083,464	57,646	0,71	1
26	8083,464	146,914	1,82	2
27	4858,959	220,254	4,53	5
28	14637,876	163,193	1,11	1
29	15305,918	303,175	1,98	2
30	15305,918	94,879	0,62	1

Kategorie lze sumarizovat dle vyznačených oblastí v tabulce následovně:

Velikost voidu 1 Procentuální vyjádření: $\langle 0, 1,5 \rangle$ Uvažovaná hodnota: 1,5 %

Velikost voidu 2 Procentuální vyjádření: $(1,5 - 3 \rangle$ Uvažovaná hodnota: 3 %

Velikost voidu 3 Procentuální vyjádření: $(3, \infty)$ Maximální hodnota: 5,5 %

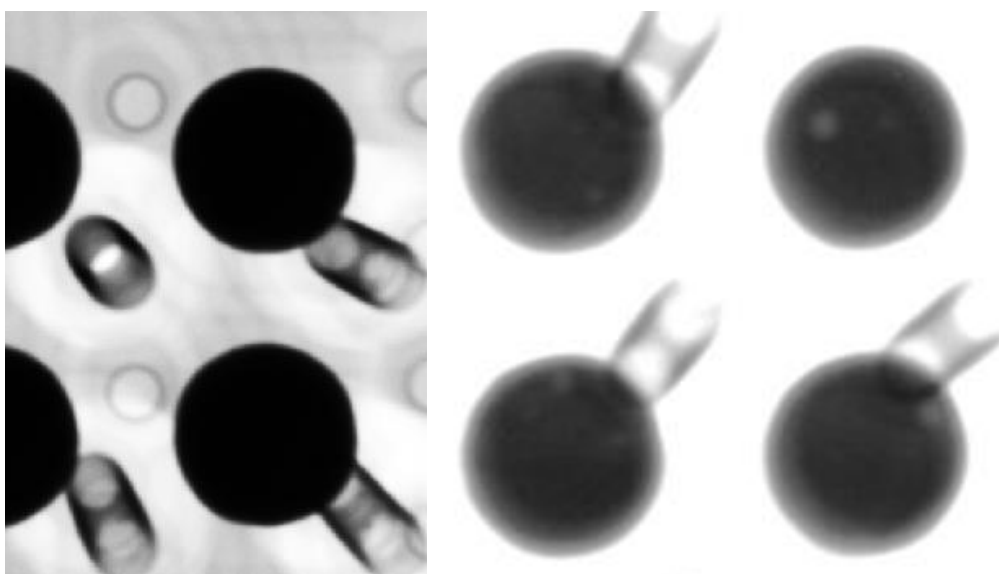
Uvažovaná hodnota je brána jako nejvyšší v daném rozsahu, z důvodu volby přísnějšího hodnocení. Rozsahy jsou voleny v návaznosti na vizuální kontrolu při výrobě DPS a spočtené plochy tak, aby velikost **1** byla v největším zastoupení nalezených anomálií. Barevné zobrazení ve sloupci s procentuální plochou dutiny zobrazuje stupnici, kde jsou nejnižší hodnoty označeny odstíny zelené a nejvyšší červené.

Na snímcích se také objevilo několik indikací, z nichž se nejpočetněji zaznamenal výsečový tvar kruhu na krajní části pinu (Obr. 32), připomínající na první pohled posunutí nebo vyosení komponenty, nedostatečné smočení povrchu a tím pádem nekvalitní pájení.



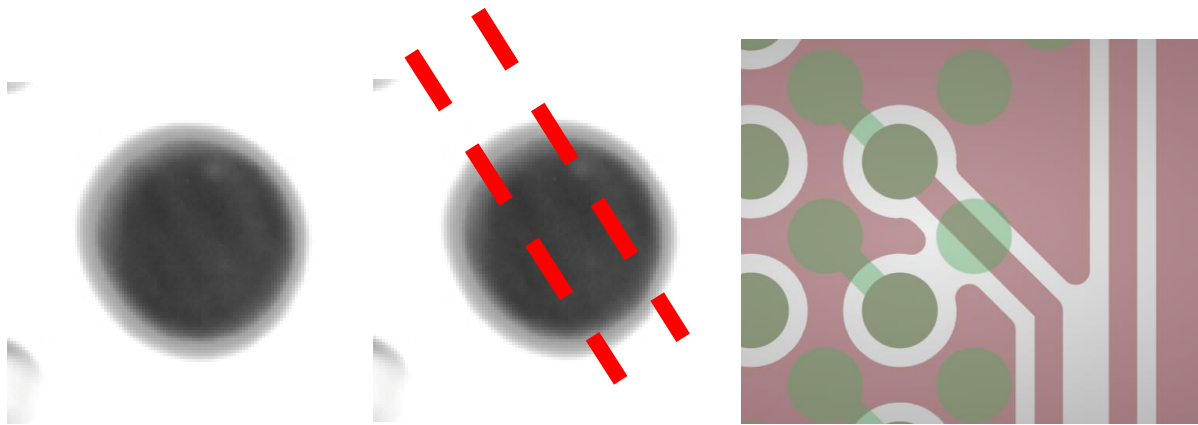
Obr. 32: Indikace na snímku A1-1-1

Indikace se objevovala napříč všemi snímky, a to ve velkém množství. Při úpravě kontrastu (Obr. 33) a porovnání snímků 4x4 a 8x8 se prokázalo, že se jedná o prokované otvory (vias) umístěné v blízkosti pinu, které vlivem úhlu zhotovení snímku a pohlcením intenzity RTG záření materiálem při průchodu DPS vyvolalo falešnou indikaci.



Obr. 33: RTG snímek s vias

Dále byly detekovány RTG šумы, projevující se šikmými tmavými pásy s odlišným stupněm šedi, přičemž některé z nich odpovídaly motivů vodivých cest. Obr. 34 znázorňuje příklad identifikovaného případu, vyznačení a k porovnání s motivem třetí vrstvy DPS. Podobné ruchy se vyskytovaly na většině snímcích.



Obr. 34: Motiv vodivých cest (zelené tečky – pozice pinu, růžová – měděný motiv vodivých cest)

Při porovnání a důkladnější inspekci snímků s návrhem DPS byla tato teorie vyvrácena, jelikož se indikace ve většině případů neshodovaly s motivem. Nález tedy vznikl vlivem rentgenové výbojky a byl označen za falešnou indikaci.

Data byla zaznamenávána ve formě např.: „32211“, což odpovídá jednomu voidu velikosti 3, dvěma velikosti 2 a dvěma o velikosti 1 (Tab. 11).

Tab. 11: Příklad zápisu dat ze vzorku Q1-4-01-01 až 08

	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO
1	Q1-4									
2	Označení vzorku	Počet a velikost voidů v BALL					Počet voidů	Plocha voidů vzhledem k BALL [%]	Suma voidů na snímek	Průměrná procentuální plocha voidů
3			0	1	2	3	518	10		
4	Q1-4-01-01	0	1	0	0	0	0	0	27	4,344
5	Q1-4-01-02	221	0	1	2	0	3	7,5		
6	Q1-4-01-03	21	0	1	1	0	2	4,5		
7	Q1-4-01-04	2	0	0	1	0	1	3		
8	Q1-4-01-05	21	0	1	1	0	2	4,5		
9	Q1-4-01-06	2	0	0	1	0	1	3		
10	Q1-4-01-07	11	0	2	0	0	2	3		
11	Q1-4-01-08	22	0	0	2	0	2	6		

Do výše uvedené tabulky operátor doplňuje pouze sloupec AG a zbytek je doplněn automatickým přepočtem. Řádek 2 udává kategorie velikostí voidů a řádek 3 počítá dílčí sumy počtu voidů pro jednotlivé kategorie.

Během inspekce se provedlo porovnávání snímků matic 8x8 a 4x4, stanovení počtu voidů a jejich zařazení do velikostních kategorií. Vzhledem k náročnosti a povaze této metody, bylo potřeba validovat proces s určením celkové procentuální plochy voidů na jeden pin. K validaci se využilo duplicitní přezkoumání vybraných čipů z desky A1 (matice 8x8) formou

kontroly se záznamem a pomocí interního porovnání inspekce a hodnocení, zpracovaného dvěma různými operátory. Při porovnání výsledků byl rozdíl zanedbatelný a celková procentuální plocha voidů v každém pinu si odpovídala s odchylkou pod 6,5 %, jak je vidět v Tab. 12. Operátor 1 vyšel jako přísnější a volil v několika (6) případech velikost plochy voidů vyšší než operátor 2.

Tab. 12: Porovnání dat dvou operátorů

Operátor	Označení snímku	Počet voidů dle velikosti				Celkový počet voidů	Průměrný počet voidů na pin	Průměrný počet voidů na pin průměrováno na RTG snímek [%]
		0	1	2	3			
1	Q1-4-1	8	88	34	5	127	1,98	4,09
	A2-8-4	18	45	22	18	85	1,33	3,63
2	Q1-4-1	7	69	43	5	117	1,83	4,06
	A2-8-4	18	45	24	16	85	1,33	3,55
Rozdíl hodnot u Q1-4-1		1	19	9	0	10	0,16	0,02
Rozdíl hodnot u A2-8-4		0	0	2	2	0	0,00	0,08
Počet shodných hodnot		127	110	113	126	111		

Počet analyzovaných pinů	128
Počet absolutních shod	109
Počet shodné plochy voidů u jednotlivých pinů	120
Odchylka [%]	6,25

Operátor 1
>
Operátor 2

Důvod vzniklých odchylek je obecně zapříčiněn rutinou procesu a lidským faktorem (ostroost vidění). Pro ověření schopnosti operátora provádět zkoušku se běžně aplikují kontroly zrakových schopností jako např. Jagerův oční test, Landoltův kroužek případně Ishiharův test barvocitu a pro ověření validity měření např. mezilaboratorní porovnání.

7.6 ANALÝZA DAT

Norma ECSS-Q-ST-70-61C § 12.4 zaměřující se na kritéria RTG analýzy, definuje několik kritérií týkajících se velikosti voidů:

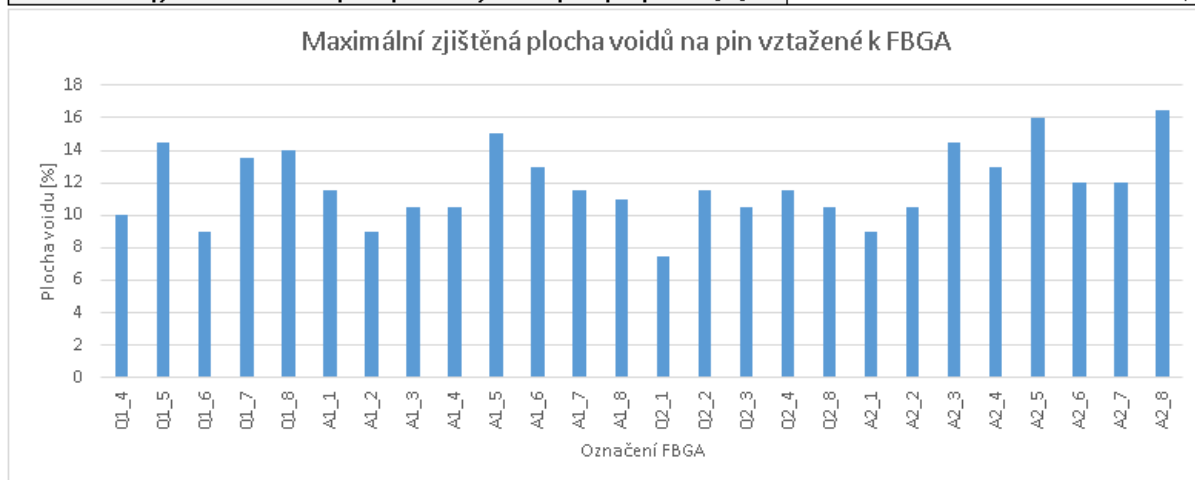
- Maximální velikost dutin vzhledem k ploše pájeného spoje: 25 %
- Maximální velikost jednoho voidu procházejícího skrz hranici pinu: 10 %

Rozhodujícím prvkem při šetření bylo posouzení velikosti voidů a kvalita pájeného spoje. Došlo k analýze 6 656 jednotlivých pájených spojů z důvodu náhodné povahy tvorby dutin. Pro analýzu byl předpřipraven soubor excelu s funkcemi pro automatické přepočty velikostí ploch voidů vztažené pro jednotlivé piny, průměry pro analyzované snímky, plochy umístěné ve středu i na krajích čipu i pro celé FBGA. Dále sumy voidů velikosti 0 - 3 a celkové množství voidů vzhledem k FBGA a využití pastě. Zpracování dat proběhlo i pro identifikování umístění voidů velikosti 0 a 3.

Výsledky analýzy ve smyslu kritéria přípustnosti maximálního rozměru plochy voidů na pin (25%), jsou znázorněny v Tab. 13.

Tab. 13: Maximální voidovitost připadající na jeden pin průměrovaná na FBGA

Vyjádření maximální plochy voidů připadající na jeden pin, pro jednotlivá FBGA [%]			
Označení vzorku	Vyjádření plochy [%]	Označení vzorku	Vyjádření plochy [%]
Q1_4	10	Q2_1	7,5
Q1_5	14,5	Q2_2	11,5
Q1_6	9	Q2_3	10,5
Q1_7	13,5	Q2_4	11,5
Q1_8	14	Q2_8	10,5
A1_1	11,5	A2_1	9
A1_2	9	A2_2	10,5
A1_3	10,5	A2_3	14,5
A1_4	10,5	A2_4	13
A1_5	15	A2_5	16
A1_6	13	A2_6	12
A1_7	11,5	A2_7	12
A1_8	11	A2_8	16,5
Kritérium přípustnosti [%]			25
Procentuální vyjádření maximální plochy voidů v jednom pinu pro pastu 1 [%]			15
Procentuální vyjádření maximální plochy voidů v jednom pinu pro pastu 2 [%]			16,5



Výsledné hodnoty prokázaly splnění kritéria pro všechny pájené spoje. Porovnání past poté ukazuje na menší hodnoty objevující se u pasty 1, kde zjištěná maximální plocha voidů

dosahuje velikosti 15 % a tím pádem se liší od pasty 2 o hodnotu 1,5% odpovídající identifikaci voidu velikosti 1 (viz 8.2 Tab. 10). Zprůměrované výsledky určující plochy voidů vztažené na větší úseky (celé BGA, snímek 4x4 atd) viz Tab. 14.

Tab. 14: Přehled hodnot voidovitosti připadající na jeden pin průměrovaných k různým analyzovaným oblastem

Průměrná plocha voidů na pin vztažená k různým oblastem analyzované oblasti					
Označení vzorku	Vyjádření průměrné plochy voidů [%]				
	FBGA	Analyzovaný snímek	Piny ve středu FBGA	Krajní piny FBGA	
Q1_4	3,730	3,730	3,516	3,888	
Q1_5	3,650	3,650	3,742	3,781	
Q1_6	1,938	3,313	3,000	3,443	
Q1_7	2,426	3,961	3,727	4,183	
Q1_8	2,141	4,186	4,227	4,148	
A1_1	4,080	4,236	4,000	4,459	
A1_2	3,293	3,229	2,719	3,709	
A1_3	3,412	3,124	2,406	3,799	
A1_4	1,430	3,118	2,586	3,619	
A1_5	3,367	6,291	6,000	6,565	
A1_6	1,813	2,667	1,953	3,340	
A1_7	1,070	1,595	0,906	2,243	
A1_8	0,656	1,416	0,672	2,116	
Q2_1	2,326	1,887	1,758	2,008	
Q2_2	2,559	2,248	2,156	2,335	
Q2_3	2,711	2,598	2,242	2,932	
Q2_4	1,383	2,584	2,422	2,737	
Q2_8	1,730	3,110	2,789	3,411	
A2_1	2,959	2,788	2,711	2,797	
A2_2	2,842	2,752	2,859	2,589	
A2_3	3,400	3,281	3,414	3,025	
A2_4	1,867	4,022	4,063	4,043	
A2_5	1,793	4,144	3,922	4,295	
A2_6	1,590	4,002	3,563	4,257	
A2_7	1,816	3,638	3,320	3,937	
A2_8	1,555	3,574	3,820	3,342	
Průměry pro pastu 1 (LFM-48W TM-HP) [%]	2,539	3,424	3,035	3,792	
Průměry pro pastu 2 LFM-48W TM-HP (L) [%]	2,195	3,125	3,003	3,208	

Z tabulky je patrná podobnost výsledků, které se nejčastěji pohybují v rozmezí hodnot 1,5-3 %. Lepších výsledků dosahují vzorky s aplikovanou pastou 2 (LFM-48W TM-HP (L)). Výrazně z tabulky vystupuje vzorek A1_5, u kterého se objevila jak vyšší četnost, tak i větší rozměry vzniklých dutin (zápis dat byl přezkoumán se stejným výsledkem).

Při zaměření se na pravou část tabulky si lze povšimnou mírně nižší voidovitosti směrem do středu čipu oproti krajům, na což má vliv teplotní gradient a struktura jednotlivých vrstev PCB (viz kapitola 7.1).

Tab. 15 a 16 vyjadřuje četnost voidů u jednotlivých čipů i pro aplikované pasty, přičemž výsledky ukazují na menší počet voidů a procentuální vyjádření plochy pro pastu 2, co se počtu voidů týče. Naopak u pasty 1 můžeme pozorovat menší rozptyl velikosti voidů (pouze 1/3 dutin velikosti 3 a více pájených ploch bez dutin a celkově menší velikosti indikací.

Tab. 15: Přehled průměrného počtu voidů vzhledem k různým analyzovaným oblastem

Průměrný počet voidů na pin vztážená k různým oblastem analyzované oblasti [%]					
Označení vzorku	Průměrná hodnota počtu voidů [ks]				
	FBGA	Analyzovaný snímek	Piny ve středu FBGA		Krajní piny FBGA
Q1_4	2,0	4,0	1,8	4,8	
Q1_5	2,0	2,0	2,1	2,0	
Q1_6	3,3	1,9	1,8	2,0	
Q1_7	4,0	2,4	2,3	2,5	
Q1_8	4,2	2,1	2,1	2,2	
A1_1	2,2	2,2	2,1	2,3	
A1_2	2,0	2,0	1,7	2,1	
A1_3	1,9	1,9	1,4	2,1	
A1_4	3,2	1,4	1,3	1,5	
A1_5	6,4	3,4	3,2	3,4	
A1_6	3,5	1,8	1,1	2,1	
A1_7	2,2	1,1	0,4	1,3	
A1_8	1,5	0,7	0,4	0,8	
Q2_1	1,3	1,3	1,0	1,4	
Q2_2	1,3	1,3	1,1	1,4	
Q2_3	1,4	1,4	1,2	1,5	
Q2_4	2,8	1,4	1,3	1,4	
Q2_8	3,4	1,7	1,6	1,8	
A2_1	1,5	1,7	1,5	1,5	
A2_2	1,6	1,8	1,8	1,6	
A2_3	1,7	1,9	2,0	1,6	
A2_4	4,1	2,0	2,1	1,8	
A2_5	3,8	2,0	1,9	1,8	
A2_6	3,8	1,8	1,6	1,6	
A2_7	3,8	1,8	1,9	1,8	
A2_8	3,9	1,6	1,8	1,5	
Průměry pro pastu 1 (LFM-48W TM-HP) [%]	2,975	2,081	1,672	2,221	
Průměry pro pastu 2 LFM-48W TM-HP (L) [%]	2,640	1,680	1,594	1,579	

v

Tab. 16: Počet voidů připadající na jedno BGA a celkový počet voidů rozdělených dle kategorií

Počet voidů připadající na jednotlivá FBGA									
PCB	1	2	3	4	5	6	7	8	SUM
Q1	0	0	0	518	511	496	621	548	2694
A1	574	509	496	366	862	464	274	168	3713
Q2	321	341	364	354	0	0	0	443	1823
A2	391	412	435	478	459	407	465	398	3445

Počet voidů u aplikace tavidla LFM-48W TM-HP	6407
Počet voidů u aplikace tavidla LFM-48W TM-HP (L)	5268

Celkový počet identifikovaných voidů dle kategorií							
Typ pasty	1		2		3		Kontrola sumy
	[ks]	[%]	[ks]	[%]	[ks]	[%]	[ks]
Pasta 1 (LMF-48W TM-HP)	5184	80,91	1015	15,84	208	3,25	6407
Pasta 2 (LMF-48W TM-HP (L))	3823	72,57	1106	20,99	339	6,44	5268

Počet zapájených ploch bez dutin	[ks]	[%]
Pasta 1 (LMF-48W TM-HP)	535	8,04
Pasta 2 (LMF-48W TM-HP (L))	506	7,60

Procenta ve spodní části tabulky odpovídají množství pájených spojů bez dutin vzhledem k celkovému počtu.

7.7 VÝSLEDKY ANALÝZY

Výsledky analýzy získaných dat shrnuje Tab. 17, ze které vyplývají lepší výsledky pro pastu LFM-48W-TM-HP (L) téměř u všech hodnocených kritérií, ovšem lišící se v rámci desetiný procent.

Tab. 17: Výsledky analýzy

Shrnutí výsledků analýzy			
Kritérium hodnocení		Typ pasty	
		LFM-48W TM-HP	LFM-48W TM-HP (L)
Vyjádření maximální plochy identifikovaného voidu		15,00	16,50
Vyjádření průměru plochy voidů vzhledem k analyzované oblasti	FBGA	2,54	2,19
	Analyzovaný snímek	3,42	3,13
	FBGA	3,03	3,00
	Krajní PINy FBGA	3,79	3,21
Průměrná hodnota počtu voidů vzhledem k analyzované oblasti	FBGA	2,97	2,64
	Analyzovaný snímek	2,08	1,68
	PINy ve středu FBGA	1,67	1,59
	Krajní PINy FBGA	2,22	1,58
Celkový počet identifikovaných voidů		6407,00	5268,00

Analýza ukázala vysokou podobnost využitých past, lišících se pouze celkovým počtem identifikovaných voidů. Inspekce RTG snímků rovněž neprokázala výrazné rozdíly ve smyslu shlukování, výskytu dutin (náhodné), ani vyskytujících se indikací defektů. U obou past došlo ke koncentraci většího množství i velikosti plochy voidů, směrem ke kraji FBGA, a naopak piny bez dutin se častěji vyskytují ve středu čipu. Za příčinu lze označit množství materiálu v motivech vodivých cest v kombinaci s teplotním gradientem, díky němuž došlo k výraznějšímu úniku plynů uvolněných z pájecí pasty.

Detekované anomálie v pájeném spoji, projevující se změnou odstínu šedé, tmavým výsečovým kruhovým tvarem a pruhy napříč pinem, se objevovaly na totožných místech napříč vzorky. Pro rozhodnutí, zda se jedná o defekt, bylo využito kontrastní úpravy snímků a porovnání s návrhem DPS. Což vedlo k prokazatelnému identifikování indikací vias a motivy vodivých cest.

Kritéria přípustnosti stanovená normou ECSS-Q-ST-70-61C zaměřujících se na velikost plochy voidů byla splněna pro obě pasty.

8 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá výrobou a RTG inspekcí zkušebních vzorků. Zaměřující se na detekci dutin v pájených spojích dle normy ECSS-Q-ST-70-61C. Tato práce byla zpracována v rámci projektu VPX Cards, u kterého bylo využito bezolovnaté pájení BGA.

Teoretická část popisuje pohled legislativy vůči pájení, obecně bezolovnaté pájení, jednotlivé typy pájení, defekty vzniklé v průběhu výroby se zaměřením na dutiny a možnosti jejich odhalení, na základě čehož byly postaveny základy pro experimentální část. Na základě této rešerše byly definovány podmínky pro experimentální část jako např. zvolení typu past, metody jejich nanesení na DPS, typu pájení nebo formy inspekce.

Praktická část popisuje od návrhu plošného spoje, přes výrobu až po analyzování RTG snímků. Lze ji rozdělit na dvě části, a to analýzu a výroby zabývající se postupem od návrhu plošného spoje, přes výrobu až po analyzování RTG snímků. Čtyři vyrobené testovací DPS byly rozděleny do dvou skupin dle aplikované pasty. Motiv vodivých cest byl volen stejný pro všechny komponenty. Proces osazení i pájení 26 čipů FBGA-LIFCL-40-70BG256C osazených prostřednictvím past klasifikace tvrdla ROL1 proběhl na automatizovaných strojích v místnosti s monitorovanými hodnotami vlhkosti, teploty i atmosférického tlaku. Komplikace vzniklé na straně výroby u zhotovení šablony pro automatické nanášení pasty, byly vyřešeny modifikací výrobního postupu na ruční nanášení pasty. Úprava je v souladu s ECSS normami, kde je pro kvalifikaci stanovena nutná opakovatelnost procesu, ovšem nikoli automatizace. Průjezd DPS pecí trval okolo 7 minuty, kdy po průjezdu první deskou došlo k vizuální kontrole. Po úspěšné inspekci byly i zbylé DPS poslány do výroby se stejným teplotním profilem.

Příprava na analýzu spočívala v označení jednotlivých testovacích vzorků, zhotovení RTG snímků, jejich grafické úpravě prostřednictvím jasu a kontrastu pro snadnější detekci indikací a validaci využití metody hodnocení. Volba vizuální inspekce s odhadem ploch voidů byla v souladu s normami ECSS, které hodnotí samostatné automatické vyhodnocování jako nedostatečné. Validace skládající se z porovnání výsledků od dvou operátorů (analýza 128 pájených ploch z 6656) a duplicitní inspekci snímku od jednoho operátora vyhodnotila metodu jako konzistentní a opakovatelnou. Výsledky mezi operátory se mírně lišily v určení počtu voidů, ovšem procentuální vyjádření jejich plochy (priorita) vůči jednotlivým pinům vyšlo v 93,75 % shodně.

Při prohlídce RTG snímků se několik z nich projevilo jako špatně graficky zpracovaných, a byla u nich provedena oprava v softwaru IrfanView. Následnou klasifikací byly všechny indikace interpretovány jako voidy, přítomné v 91,06 % pájených ploch u pasty LMF-48W TM-HP a 82,40 % u LMF-48W TM-HP (L). Na snímcích se neobjevily indikace typu trhliny, prasklina, otřep, zkrat, nedostatečné smáčení, rozpad kuličky, posunutí komponent ani vměstků. Největší identifikovaná suma ploch indikací voidů v jednom pájeném spoji 16,5 % splnila kritérium maximální povolené hodnoty 25 %. Neobjevily se indikace dutin, které by zabíraly více než 5,5 %. Všechny vzorky, na nichž byla provedena inspekce, splnily kritéria přípustnosti stanovená normou ECSS-Q-ST-70-61C.

Analýzou byla zjištěna podobnost mezi pastami napříč téměř všemi hodnocenými kritérii, jako průměrná plocha voidů na pin vztažená na snímek, na jednotlivá FBGA i na využitou pastu. Výrazný rozdíl byl detekován pouze u celkového počtu voidů, kde se u pasty LMF-48W RM-HP našlo téměř o 1200 dutin více. Výsledky určují pastu LMF-48W RM-HP (L) jako méně voidovitou, s menší plochou voidů připadající na jeden pin, s menším rozptylem velikosti voidů a s menší maximální velikostí voidů. Zprůměrované hodnoty ploch voidů se pohybovaly od 2,19 do 3,21 %, maximální identifikovaná plocha voidů dosáhla hodnoty 16,5 %, průměrný počet voidů v pinu od 1,58 – 2,6 % a celkový počet voidů 5268.

Vhodným následujícím postupem by bylo provedení metalografických výbrusů, pro možnou detekci zatím neidentifikovaných anomálií a defektů. V procesu kvalifikace výroby je pak nutností provést vibrační zkoušku, pro jejíž snadnější průběh se často využívá lepidlo umístěné na rohy komponent typu BGA s tím, že se nesmí dotýkat pájených kuliček pouzdra. Následující krok by bylo vyhodnocení výsledků pomocí RTG inspekce, případně metalografie a teplotní cyklování s opětovnou metalografií.

9 BIBLIOGRAFIE

- [1] LÜDER, E. Příručka pájení. Přeložil KRAUSER, J., HELLMAN, B. a MIKULÁŠ, J. Praha: SNTL, 1958.
- [2] ČSN EN 60068-2-54: Zkoušení pájitelnosti elektronických součástek metodou smáčecích vah. 2007. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-60068-2-69-ed-3-345791-183492.html>
- [3] MACH, P., SKOČIL, V. a URBÁNEK, J. Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Praha: Vydavatelství ČVUT v Praze, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [4] PUTTLITZ, K. J. a STALTER, K. A. Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies. CRC Press, 2004. ISBN 978-0824748708
- [5] RoHS 3 (EU 2015/863) [online_]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2020 [cit. 2023-03-26_]. Dostupné z: <https://www.rohsguide.com/rohs3.htm>
- [6] Základní informace k problematice RoHS. In: Ministerstvo průmyslu a obchodu [online_]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2019 [cit. 2023-1-15_]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/rohs-elektrozarizeni/zakladni-informace-k-problematice-rohs--158558/>
- [7] PODZEMSKÝ, J. Degradace spojů pájených pájkami bez olova, Disertační práce ČVUT v Praze, Praha 2015.
- [8] BIOCCA, P. Lead-free SMT Soldering Defects, How to Prevent Them. In: Kester. [online_]. 2013. [Citováno 2023-2-1_]. Dostupné z: [https://www.kester.com/Portals/0/Documents/Knowledge%20Base/Lead-free SMT Defects How to Prevent Them.pdf](https://www.kester.com/Portals/0/Documents/Knowledge%20Base/Lead-free%20SMT%20Defects%20How%20to%20Prevent%20Them.pdf)
- [9] PIETRIKOVÁ, A., DURÍŠIN, J., and MACH, P. Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike. Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 1. vyd., Košice, 2010, ISBN 978-80-553-0447-2.
- [10] LAUKO, M. Pájecí slitiny a jejich vlastnosti, Diplomová práce, ČVUT v Praze. Fakulta elektrotechnická. Ing. David Bušek, Ph.D., Praha, 2017.
- [11] STEJSKAL P. Vliv intermetalických sloučenin na spolehlivost pájeného spoje. Elektrotechnika a informatika. ISBN 9788070437025

- [12] MACHALICKÝ, V. Pájení v elektrotechnice, Bakalářská práce, ČVUT v Praze. Fakulta elektrotechnická. Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D., Praha, 2020.
- [14] SZENDIUCH, I., Pájení a bezolovnaté pájky. [Citováno 2023-1-21_]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10192933-Pajeni-a-bezolovnate-pajky-doc-ing-ivan-szendiuch-csc.html>
- [15] MÍRA, O., Radioklub, [Online_] Pájení přetavením [Citováno: 2023-4-3_], dostupné z: <https://ok1kvk.cz/clanek/2013/pajeni-pretavenim/>
- [16] PREVITI, Michael, A., HOLTZER, M. a HUNSINGER, T. Four ways to reduce voids in bga / csp package to substrate connections [online_]. Dostupné z: <https://docplayer.net/amp/39456469-Four-ways-to-reduce-voids-in-bga-csp-package-to-substrate-connections.html>
- [17] SEELIG, K. a O'NEILL ,T. Minimizing BTC Voids. AIM Solder [online_]. 2016. [Citováno. 2023-2-20_]. Dostupné z: <http://pcdandf.com/pcdesign/index.php/current-issue/239-tech-tips/9730-tech-tips-1412>
- [18] TOLENO, B. The effects of Pb-free solder paste formulation on voiding in reflowed assemblies [online_]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/view/6075331/the-effects-of-pb-free-solder-paste-formulation-on-voiding-emsnow>
- [19] IPC-7095 Revision D, Design and Assembly Process Implementation for BGAs. Illinois IPC, 2018. 208 s.
- [20] ASPANDIAR, R. Voids in Solder Joints. SMTA Boise Expo and Tech Forum, 2005. s. 1–42.
- [21] COYLE, R. The Influence of Solder Void Location on BGA Thermal Fatigue Life. In: SMTAI Conference Proceedings. 2010.
- [22] PLACEK, M. Sledování vlastností bezolovnatých pájených spojů, Disertační práce, ČVUT v Praze. Fakulta elektrotechnická. Doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D., Ing. David Bušek, Ph.D. Praha, 2019.
- [23] Vala, M. Analysis of defects on PCB using X-Ray, 3D SW care and Micro-section. [online_] Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/83918/206-vala.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [24] JEŽDÍK, P., DUŠEK, K., BREJCHA, M., HÁJKOVÁ, L., a POSPÍŠIL, L. DPS-AZ. DPS [online_]. LVR FEL ČVUT v Praze [cit. 2023-04-23_]. Dostupné z: https://www.dps-az.cz/mereni/id:7545/moznosti-vyuziti-rtg-a-ct-diagnostiky-ne-jen-v-elektrotechnice-1-cast?fbclid=IwAR1IsW4lRtvoQylo3AKgFzLTyGSS2kZbLJChGf626XjxNYMj_3MXTg3Xpvk

- [25] CrossLink-NX Family Data Sheet: FPGA-DS-02049-1.3. Lattice Semiconductor 2022. Dostupné z: [https://eu.mouser.com/datasheet/2/225/Lattice FPGA DS 02049 1 3 CrossLink NX Family-2940960.pdf](https://eu.mouser.com/datasheet/2/225/Lattice_FPGA_DS_02049_1_3_CrossLink_NX_Family-2940960.pdf)
- [26] Spez. LFM-48W TM-HP 12%. 2016. Almit, 2022. Dostupné z: <https://www.almit.de/fileexchange/Spezifikationen%205.0/Englisch/Bleifreie%20Paste/Spez.%20LFM-48W%20TM-HP%2012%25.pdf>
- [27] Spez. LFM-48W TM-HP(L) 12%. 2016. Almit, 2022. Dostupné z: [https://www.almit.de/fileexchange/Spezifikationen%205.0/Englisch/Bleifreie%20Paste/Spez.%20LFM-48W%20TM-HP\(L\)%2012%25.pdf](https://www.almit.de/fileexchange/Spezifikationen%205.0/Englisch/Bleifreie%20Paste/Spez.%20LFM-48W%20TM-HP(L)%2012%25.pdf)
- [28] GE Measurement & Control: phoenix micromex / nanomex High resolution 180 kV micro- / nanofocus X-ray inspection systems with 3D CT option. 2017. Dostupné z: <https://pvp-snk.ru/image/data/07ostec/9-micromex/01.pdf>

Seznam tabulek

Tab. 1: Vliv olova na lidský organismus [4].....	13
Tab. 2: Chemické prvky obsažené v pájkách a jejich vliv [9]	18
Tab. 3: Přehled vybraných dvousložkových bezolovnatých pájek a jejich teplota tání [7].....	19
Tab. 4: Přehled vybraných tříslložkových bezolovnatých pájek a jejich teplota tání [7]	19
Tab. 5: Vlastnosti vybraných bezolovnatých pájek [7]	20
Tab. 6: Přehled parametrů rovnice růstu intermetalické vrstvy pro různé pájky a podklady dle různých autorů [7]	30
Tab. 7: Tabulka přehledu fyzikálních vlastností kovů a intermetalických sloučenin [11]	31
Tab. 8: Třídění dutin dle normy IPC-7095C pro kuličky o průměrech 1-1,5 mm [19]	33
Tab. 9: Označení DPS a FBGA	52
Tab. 10: Přepočty ploch voidů na procentuální vyjádření pro určení velikostních kategorií...57	
Tab. 11: Příklad zápisu dat ze vzorku Q1-4-01-01 až 08.....	59
Tab. 12: Porovnání dat dvou operátorů	60
Tab. 13: Maximální voidovitost připadající na jeden pin průměrovaná na FBGA.....	61
Tab. 14: Přehled hodnot voidovitosti připadající na jeden pin průměrovaných k různým analyzovaným oblastem	62
Tab. 15: Přehled průměrného počtu voidů vzhledem k různým analyzovaným oblastem.....	63
Tab. 16: Počet voidů připadající na jedno BGA a celkový počet voidů rozdělených dle kategorií	64
Tab. 17: Výsledky analýzy	64

Seznam rovnic

1.1: Analytické vyjádření intermetalické vrstvy	29
1.2: Poměrné posunutí vlivem teplotního cyklování.....	40

Seznam obrázků

Obr. 1: Základní kombinace slitin, teploty tavení jednotlivých prvků a vlivy na vlastnosti pájky [11].....	18
Obr. 2: Schéma procesu pájení vlnou [12]	21
Obr. 3: Schéma dvojité a duté vlny u pájení vlnou [12]	22
Obr. 4: SMD elektronický kondenzátor 47UF a FBGA LIFCL_40_7BG256C [12].....	23

Obr. 5: BGA vývody, vliv vhodně zvoleného teplotního profilu na připájení vývodů	24
Obr. 6: Sedlový teplotní profil [14]	25
Obr. 7: Růst intermetalické vrstvy v závislosti na čase při různých teplotách [12]	28
Obr. 8: Planární mikro dutiny u BGA [20]	34
Obr. 9: Kirkendallov dutiny [20]	34
Obr. 10: Pinhole dutiny [20]	35
Obr. 11: Shrinkhole dutiny [20]	35
Obr. 12: Makro dutiny v pájených spojích [21]	36
Obr. 13: Příklad snímku RTG BGA [24]	42
Obr. 14: Motivy testovaných DPS	43
Obr. 15: Schéma vodivých cest pro jednotlivé vrstvy DPS 1-5	44
Obr. 16: Schéma vodivých cest pro jednotlivé vrstvy DPS	44
Obr. 17: Vyrobené, neosazené DPS	45
Obr. 18: Nerezová šablona pro nanesení pájecí pasty	47
Obr. 19: Fotografie čipu FBGA LIFCL-40-7BG256C	48
Obr. 20: Fotografie stroje MYDATA MY200LX	48
Obr. 21: Proces vycentrování polohy umístění FBGA na DPS	49
Obr. 22: Osazené DPS připravené na průchod pecí	49
Obr. 23: SMT Quattro Peak M	50
Obr. 24: Odzkoušený a nastavený teplotního profil	51
Obr. 25: Ověření minimálního detekovatelného rozměru	51
Obr. 26: Označení DPS	52
Obr. 27: RTG Snímek matice 8 x 8 (A1-1-1)	54
Obr. 28: RTG snímek matice 4 x 4 (A1-01-01)	54
Obr. 29: Úprava RTG snímku A1-01-01	55
Obr. 30: Příklady zpracování snímků v programu ZEISS ZEN-Core v0.3.	55
Obr. 31: Vzor pro zařazení voidů do velikostních kategorií	56
Obr. 32: Indikace na snímku A1-1-1	58
Obr. 33: RTG snímek s vias	58
Obr. 34: Motiv vodivých cest (zelené tečky – pozice pinu, růžová – měděný motiv vodivých cest)	59