



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**

Risk analýza pájení čipů

Risk analysis of soldering chips

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika, management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Petr Veselý

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Veselý Petr**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektrotechnika a management

Název tématu:

Risk analýza pájení čipů

Pokyny pro vypracování:

1. Pájení přetavením, výčet některých chyb, ke kterým při této technologii dochází, analýza rizik
2. Analýza rizik zapájení čipů
3. Eperimentální studie vlivu teplotního profilu na správné zapájení čipů
4. Zhodnocení experimentu

Seznam odborné literatury:

1. Subramanian K.: Lead-free Solders : Materials Reliability for Electronics, 2012, Wiley.
2. Karl J. Puttlitz, Kathleen A. Stalter: Handbook of Lead-free Solder Technology,
3. Mach P., Skočil V., Urbánek J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001.
4. Pietriková A., Ďurišín J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálův pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice 2010.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Dušek, Ph.D

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Doc.Ing. Jaroslav Knápek, CSc.

vedoucí katedry

Prof.Ing. Pavel Ripka, CSc.

děkan

V Praze dne 10.2.2015

Název práce: **Risk analýza pájení čipů**

Autor: Petr Veselý

Obor: Elektrotechnika, energetika a management

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se věnuje tématu pájení. V první části je popsána obecně technologie pájení – aplikace, materiály, pouzdra používaných součástek, postupy - se zaměřením na pouzdra typu BGA. Dále jsou popsány chyby, ke kterým u těchto pouzder dochází. Druhá část práce se věnuje risk-managementu – vysvětlení pojmů, popisu používaných nástrojů. V praktické části byla zpracována risk-analýza pájení BGA čipu v konkrétním případě včetně porovnání hodnoty rizika s přijatým řešením problému a dále byla provedena experimentální studie vlivu teplotního profilu na správné zapájení BGA čipu.

Klíčová slova:

pájení přetavením, BGA pouzdro, risk management, teplotní profil, chyby při pájení BGA

Title: Risk analysis of soldering chips

Author: Petr Veselý

Branch: Electrotechnics, energetics and management

Document type: Bachelor's thesis

Thesis advisor: Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Abstract:

The subject of this bachelor's thesis is soldering. There is the description of the soldering technology in the first part – application, materials, packages of used components, process – with a view to BGA components. Also the thesis introduces to BGA defects. The second part of the thesis attend to risk management – terms explanation, description of used implemets. In the next part the risk analysis of soldering chips in concrete situation was proceesed – including the comparsion of the value of the risk with the accepted solution of the problem. Within the frame of practical part of the thesis the experimental study of thermal profile impact to error-free soldering was accomplished.

Klíčová slova:

reflow soldering, BGA package, risk management, thermal profile, BGA defects

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

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

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce panu Ing. Karlu Duškovi za pomoc, vedení, cenné rady při zpracovávání a přátelský přístup.

Dále děkuji firmě Arvato za poskytnutí potřebného materiálu, zázemí, odborné pomoci a informací.

Nakonec bych rád poděkoval rodině a všem nejbližším za podporu při celém bakalářském studiu.

Obsah

ÚVOD	9
1 TECHNOLOGICKÝ PROCES PÁJENÍ	10
1.1 Aplikace technologie pájení	10
1.2 Ruční a strojní pájení	10
1.3 Materiály pro pájení	11
1.4 Pouzdra součástek a IO pro povrchovou montáž, zvláště pak BGA pouzdra	12
1.4.1 Pouzdření čipů	12
1.4.2 Pouzdra pro povrchovou montáž	12
1.4.3 BGA pouzdra	13
1.5 Technologie pro pájení	16
1.5.1 Pájení vlnou	16
1.5.2 Pájení přetavením	17
1.5.3 Teplotní profil	19
1.5.4 Pájení pouzder BGA	20
1.6 Chyby při pájení BGA pouzder	22
1.7 Způsoby diagnostiky BGA pouzder	25
1.8 Oprava BGA pouzdra	27
2 RISK MANAGAMENT	29
2.1 Pojem „riziko“	29
2.2 Řízení rizik	29
2.2.1 Identifikace rizika	30
2.2.2 Hodnocení rizika	32
2.3 Risk analýza pájení čipů	33
2.4 Zhodnocení analýzy	38
3 EXPERIMENTÁLNÍ STUDIE VLIVU TEPLOTNÍHO PROFILU NA PÁJENÍ ČIPŮ	39
3.1 Zařízení MARTIN Auto-Vision-Expert 09.5	39
3.2 Zvolený teplotní profil	40
3.3 Pájené vzorky, tavidlo	41
3.4 Diagnostika pomocí rentgenu	43
3.5 Zhodnocení výsledků	49
ZÁVĚR	50
POUŽITÁ LITERATURA	51

SEZNAM OBRÁZKŮ	54
SEZNAM TABULEK.....	56

ÚVOD

V této bakalářské práci se budu věnovat technologii pájení. Ta díky neuvěřitelnému technickému rozvoji, rozšíření mikroelektroniky do prakticky všech oblastí a snaze obecně elektronická zařízení rozměrově minimalizovat dnes již zdaleka neznamená jen klasické drátové spoje. Součástky jsou stále menší a mají větší počet vývodů s jemnější roztečí. Vznikají tak zde kromě nesporných výhod také mnohem větší možnosti nesprávně zapájených vývodů, které je nutno kontrolovat.

Protože největší potenciál vidím v pouzdrech typu BGA, kterými je možno propojit několik set vývodů (například u procesorů, paměti apod.), bude tato práce zaměřena nejvíce právě na ně – popis, technologie pájení, možná diagnostika a chyby, které zde vznikají.

S technologií pájení úzce souvisí risk-management, neboť chyby při pájení se dají vnímat jako riziko, se kterým je nutné počítat. Proto se také budu věnovat možnostem, jak rizika obecně analyzovat a hodnotit a poté jak postupy aplikovat v oblasti pájení.

Z teoretických předpokladů pak vzejde praktická úloha, ve které budu experimentálně zjišťovat vliv pájecího profilu na správné zapájení BGA čipů včetně podrobné analýzy. Výsledkem bude studie a shrnutí faktů na toto téma.

1 TECHNOLOGICKÝ PROCES PÁJENÍ

Pájení je v elektrotechnice metalurgická metoda spojování součástí pomocí materiálu s nižší teplotou tavení než spojované součásti, které se při pájení neroztaví. Pájený spoj musí mít dobrou elektrickou i mechanickou funkci. Pájení dělíme na měkké (s pracovní teplotou do cca 400°C) – *soldering* – a tvrdé (s pracovní teplotou nad 400°C) – *brazing*. Podle toho se také vybírá spojovací materiál a metoda pájení. Pájené spoje najdeme prakticky v každém elektronickém zařízení. Dále bude řeč výhradně o měkkém pájení.

1.1 Aplikace technologie pájení

Samotná aplikace technologie pájení může být v různých formách. Nejčastěji se pájení (měkké) používá na propojení součástek na DPS (deska plošných spojů, PCB – printed circuit board). Jedná se o izolační substrát – např. nejběžnější s označení FR4 – skleněná tkanina sycená epoxidovou pryskyřicí, na kterém je nanesena tenká měděná fólie (buď z jedné, nebo obou stran). Většinou pomocí fotolitografie je pak z fólie vyleptán požadovaný obrazec plošných spojů sestávající z vodivých cest a tzv. padů, tedy pájecích plošek pro součástky, který tvoří základ požadovaného elektrického obvodu. Pro vícevrstvou desku pak použijeme více základních substrátů (například pro čtyřvrstvou desku použijeme jako základ dvouvrstvou a z obou stran slisujeme desku jednovrstvou). Buď hned po výrobě samotné DPS nebo výrobě celkového zařízení (po zapájení) je vhodné upravit povrch desky tak, aby měděné vodivé cesty nekorodovaly a aby se stabilizovaly izolační vlastnosti desky, například epoxidovými laky. Způsob provedení desky plošného a její povrchové úpravy má značný vliv na kvalitu pájených spojů a je nutné zahrnout DPS do úvah při diagnostice chyb v pájení. [2]

1.2 Ruční a strojní pájení

Je nutné rozlišovat ruční a strojní pájení. *Ruční* pájení je v dnešní době na ústupu díky nespolehlivosti kvality spoje způsobené lidským faktorem. Proto se používá pro průmyslové a hromadné aplikace *strojní* pájení, které je přesné a automatizované. Ruční pájení nachází tak uplatnění hlavně v opravářské technice, u kontroly po strojním pájení, případně u domácích kutilů nebo u malých firem.

Nezanedbatelným faktorem, který zapříčinil hromadný přechod z ručního na strojní pájení, je to, že se dnes s výhodou používá tzv. povrchová montáž, kdy jsou na desku plošného spoje osazovány součástky typu SMD (surface mount device), kde je pájený spoj na stejné straně jako osazovaná součástka. To umožňuje zmenšení pouzder součástek a tím i vyšší hustotu osazení desky.

Samozřejmě ani použití strojního pájení nezaručí nikdy stoprocentní kvalitu výsledku. Zde pak záleží na výběru vhodných materiálů, vhodné technologie s ohledem na danou aplikaci a na dalších mnoha faktorech, které nejsou mnohdy firmy sto dopředu

odhadnout. Ke slovu dost často tak přicházejí diagnostické metody zjišťování poruch a chyb během procesu pájení.

1.3 Materiály pro pájení

Pájka je materiál, který spoj realizuje. Pro měkké pájení jsou nejčastěji užívané pájky *cínové*, případně speciální. Dlouho se v elektrotechnice užívala hojně pájka eutektická s 63 % cínu a 37 % olova s teplotou tavení 183 °C. Výhodou této slitiny je to, že tuhne bez přechodových fází – v neeutektických slitinách vedle sebe existují fáze kapalné i pevné v jistém rozmezí teplot. Dále existují pájky i s dalšími kovy jako kadmium nebo zinek, kterými se většinou dosahuje buď velmi malých teplot pájení (např. v katalogu Kovohutí Příbram nabízejí slitinu Bi45Pb23Sn8In19Cd5, která má teplotu tavení při 47°C) nebo naopak teplot vyšších. [1]

Od roku 2006 je však použití olovnatých slitin podle směrnice RoHS (**R**estriction of the use of certain **H**azardous **S**ubstances in electrical and electronic equipment) velice omezeno, proto se přechází na pájky bezolovnaté. To ovšem není vůbec technologicky lehké. Bezolovnaté pájky jsou jednak dražší než klasické Sn/Pb pájky, protože okolo 40 % slitiny je tvořeno drahými kovy, jednak se liší proces pájení. Bezolovnaté slitiny mají většinou větší teplotu tání (okolo 220°C) a celkově horší vlastnosti, třeba horší smáčivost pájky. To vede například k většímu tepelnému namáhání součástky a většímu opotřebením pájecího hrotu (při ručním pájení), mimo jiné také k větší spotřebě elektrické energie potřebné k této technologii pájení. Většina bezolovnatých slitin navíc není eutektická jako Sn63Pb37. Dost problémů je tedy potom zapříčiněno právě nevhodným výběrem bezolovnaté pájky a jejím chováním v čase, které není na rozdíl od olovnatých pájek zatím podrobně popsáno a pozorováno. [12]

Pájky mohou být obecně v mnoha formách – nejčastěji jako navinutý drát (trubička), ale také jako pasta, prášek, pásek apod., záleží na aplikaci.

Tavidlo je látka, která se stará o dobrou smáčivost samotné pájky. Jedná se vlastně o „čistící prostředek“, který má za úkol očistit povrch a odstranit oxidy u spoje před samotným pájením. Většinou má podobu kapaliny s obsahem chemicky účinné látky – například kyseliny solné nebo fosforečné. Dobře se hodí pryskyřice z borovic (kalafuna) – ta bývá obsažena v trubičkové pájce (pájka má podobu dutého drátku napuštěného právě tímto tavidlem). Je dobré zbytky tavidel po pájení omýt. [43]

Alternativou pro měkké pájení je například použití vodivých lepidel. Ta mají dvě složky – vazební (pryskyřice) a vodivou (kuličky Ag, Cu s vrstvou Ag, Au, Pd). Jejich výhoda tkví v relativní ekologické neškodnosti oproti SnPb pájkám a nízkým teplotám vytvrzení (některé stačí vytvrdit při pokojové teplotě). Některé druhy lepidel označované jako anizotropní jsou zase používány častěji než klasická pájka tam, kde je velmi velká hustota spojů a nesmí dojít ke vzniku vodivých můstků mezi nimi (LCD displeje). Oproti pájkám mají vodivá lepidla horší mechanické i elektrické vlastnosti a mají vyšší cenu. [13]

1.4 Pouzdra součástek a IO pro povrchovou montáž, zvláště pak BGA pouzdra

Společně s rychlým rozvojem elektroniky, integrovaných obvodů a jejich neustálým zmenšováním rozměrů nahradila ve spoustě odvětví elektroniky klasická pouzdra pro vsazovanou montáž pouzdra typu SMD. Výhody jsou jasné – větší hustota osazení, strojní (hromadné) pájení, automatizace celého procesu včetně osazování, pájení, čištění DPS. Nevýhoda tkví hlavně v obtížnosti ručního pájení takových součástek, ale to ostatně nebylo prioritou při vývoji těchto pouzder.

Řeč bude hlavně o integrovaných obvodech. Jedná se v podstatě o spojení mnoha pasivních i aktivních součástek ve funkční celek v jednom pouzdře. To pak tvoří část elektronického obvodu či má složitější funkci. Typicky to jsou například nejrůznější operační zesilovače, logické obvody, regulátory napětí, proudu, paměti či mikroprocesory.

1.4.1 Pouzdření čipů

Každý integrovaný obvod se skládá ze samotného čipu, nosné základny, která zajišťuje mechanické a elektrické propojení součástky s DPS a plastového či keramického krytu, který slouží k ochraně součástky před vnějšími vlivy.

Čip se připojuje na základnu pouzdra různými způsoby. Mezi nejčastější patří technologie Wirebonding (připojování mikrodrátky), TAB (Tape Automated Bonding - kontakty vytvořeny na fólii z plastu) a Flip Chip (plošky čipu osazeny půlkruhovými kontakty z pájky). [13]

1.4.2 Pouzdra pro povrchovou montáž

Výběr samotného pouzdra je pak další technologickou otázkou, závislou na konkrétním použití.

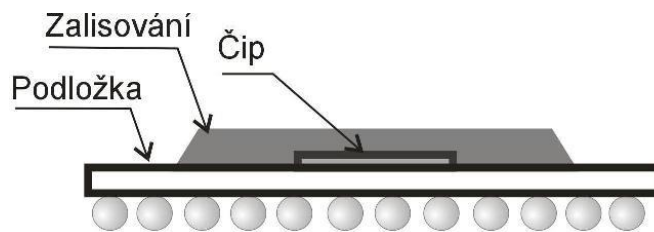
Nejčastěji používaná pouzdra pro povrchovou montáž:

- SOP (Small Outline Package); vycházejí z pouzdra DIP (Dual In-line Package) pro vsazovanou montáž, ale místo drátového vývodu mají vývody typu J nebo „rací křídlo“; jedno z nejpoužívanějších pouzder pro SMT; typicky diody, tranzistory, operační zesilovače, logické obvody; počet vývodů se pohybuje mezi 12 a 56 s roztečí cca 0,05-0,1 palce [15]
- TSOP (Thin Small Outline Package) – druh SOP; pouzdra rozměrnějších čipů (například paměti); vyšší počet vývodů a jemnější rozteč (0,025 palce) [15]
- SSOP (Shrink Small Outline Package) – druh SOP; liší se pouze jemnější roztečí vývodů (stejně jako u TSOP) [15]
- QFP (Quad Flat Package) – čtvercové nebo obdélníkové pouzdro s vývody na všech 4 stranách (nejčastěji typ „rací křídlo“) [16]

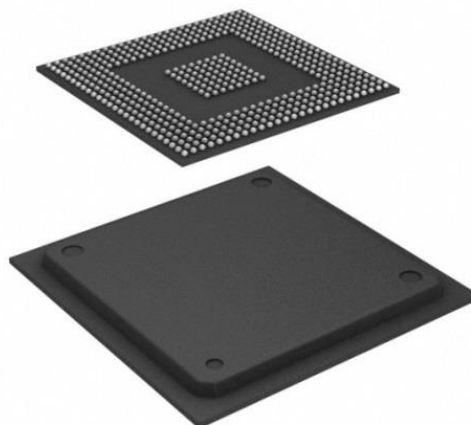
- LCC (Leadless Chip Carrier) – pouzdro bez klasických vývodů, místo nich kontaktní plošky, časté připojení do obvodu pomocí vsazování do patic (rámečků) – keramika s vypálenou Au pastou; výhoda dobrého odvodu tepla, krátké signálové cesty [17]
- BGA (Ball Grid Array)– čtvercové pouzdro s kuličkovými vývody na spodní straně buď jen na části nebo celé ploše; [18]
- CSP (Chip Scale Package), též μ BGA – obdoba pouzdra typu BGA, pouzdro nepřekračuje velikost cca 1,2 krát velikost samotného čipu; lze vidět jednoznačný trend v používání těchto pouzder [19]

1.4.3 BGA pouzdra

BGA pouzdro je momentálně jedno z nejperspektivnějších variant pro povrchovou montáž. Používá se všude tam, kde počet vývodů přesáhne limity pro často používané QFP (přibližně má 256 vývodů) – potenciálně je možné pomocí BGA propojit až 1000 vývodů. Je využíváno maticové uspořádání vývodů na části nebo celé kontaktní ploše. [18]



Obrázek 1: BGA pouzdro 1 (převzato z [5])



Obrázek 2: BGA pouzdro 2 (převzato z [23])

Výhody BGA pouzder:

- vysoký počet vývodů
- lepší elektrické vlastnosti než QFP – kratší elektrická spojení – zmenšení odporu, indukčnosti, kapacity
- zabere méně prostoru na DPS
- využíván jev samovystředění – snadnější a přesnější umístění pouzdra
- nejsou křehká – menší riziko poškození při manipulaci
- lepší přenos tepla
- vhodné pro tzv. MCM (Multichip-module) – pouzdření více čipů do jednoho pouzdra

Nevýhody BGA pouzder:

- vyšší cena
- nutné si dát pozor na koeficient tepelné roztažnosti – méně pružné vývody než u QFP
- vyšší náchylnost k absorpci vlhkosti
- nákladná a obtížná diagnostika správného zapájení
- prakticky nemožná oprava chybného spoje, nutné odpájet celé pouzdro

Srovnání BGA a QFP pouzdra je v následující tabulce.

Typ pouzdra	Rozměry [mm]	Plocha pouzdra [mm ²]	Rozteč vývodů [mm]	Počet vývodů
QFP	20x20	400	0,5	148
BGA	20x20	400	1,27	225

Tabulka 1: Srovnání BGA a QFP pouzder (převzato z [8])

Vidíme, že pouzdro BGA má i přes víc jak dvakrát větší rozteč mezi vývody hustotu vývodů také prakticky dvojnásobnou oproti QFP.

Pouzdra BGA se dále dělí na: [6], [18]

- PBGA (Plastic Ball Grid Array)
- HSBGA (Heat Slug Ball Grid Array)
- CBGA (Ceramic Ball Grid Array)
- CCGA (Ceramic Column Grid Array)
- MBGA (Metal Ball Grid Array)
- TBGA (Tape Ball Grid Array)
- CSP (Chip Scale Package, též μ BGA)
- MCBGA (Multi Chip Ball Grid Array)

PBGA je asi nejrozšířenější varianta BGA pouzder. Čip leží na dvou- až čtyřvrstevném substrátu (nejčastěji BT pryskyřice – bimaliemid triazim) s naválcovou Cu fólií o tloušťce typicky 18 μ m, kontaktován obvykle technologií wire-bonding nebo flip-

chip. Je zalitý pevnou polymerickou hmotou. Výhodou plastového pouzdra je hlavně jeho nižší cena.

HSBGA je v podstatě vylepšením PBGA. Do materiálu krytu je vpravena měď, která zlepšuje tepelnou vodivost pouzdra a tím chlazení integrovaného obvodu. Výhodou je i jejich nepříliš vysoká cena.

CBGA je pouzdro, kde se jako základny čipu používá substrát z keramiky, který je tří- až pěti vrstvý, kryt je buď také keramický, nebo kovový. Čip je kontaktován na substrát nejčastěji pomocí metody Flip-chip a to vysokoteplotní pájkou, případně wire-bondingem. Tyto pouzdra mají výhodu v dobré tepelné vodivosti keramiky a tak nemají pouzdra problém s odvodem ztrátového výkonu. Jsou spolehlivější, ale také dražší variantou BGA.

CCBGA je obdoba předchozího pouzdra, ale místo kuliček se používají tyčinky pájky. To umožňuje připojovat pouzdra i na desky s velmi rozdílným koeficientem teplotní roztažnosti, neboť termomechanická napětí tyto tyčinky absorbují. Jasnou nevýhodou těchto pouzder je však jejich problematická montáž, neboť je nezbytné pouzdra umisťovat s větší přesností a během procesu pájení je držet v požadované vzdálenosti od desky.

MBGA využívá jako substrát anodicky oxidovaný hliník, jako kryt pak hliník, který je uzemněn. Toto pouzdro má tak lepší odstínění.

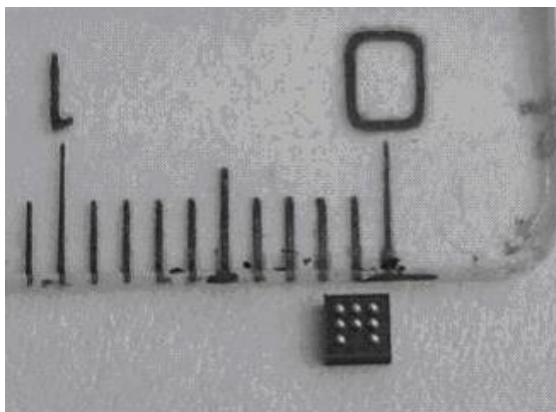
TBGA je pouzdro, které je zhotovené na polyimidovém pásku s naválcovanou Cu folií. Čip je připojen technologií TAB, výjimečně i drátkováním. Výhodou je bezproblémové chlazení, které probíhá jak skrz kryt, tak skrz tepelně vodivou pryskyřici chránící spoj. Cena je srovnatelná s keramickými variantami.

CSP je malá obdoba BGA pouzder. V ideálním případě by pouzdro nemělo přesahovat samotný čip. Substrát může být laminát nebo keramika – jedno- až třívrstvé plošné spoje. Nejčastější metoda připojení čipu je pomocí Flip-chip. Stávají se trendem v této oblasti, poněvadž mají ještě lepší vlastnosti – menší rozměry (menší termomechanické namáhání), lepší výkon (krátké signálové cesty).

MCBGA značí multičipové moduly, které jsou zapouzdraeny jako BGA, tj. v jednom pouzdře se nalézá větší počet čipů. Přístupů je opět více – substrát může být klasicky z laminátu, keramiky, depositně nanášený (tenkovrstvá technologie) nebo se jedná o programovatelné pole, které je tvořeno trojrozměrnou maticí polovodičových prvků.

Reálný příklad BGA pouzdra je například TPA6203A1 od firmy Texas Instrument, což je 1,25W nf zesilovač se symetrickým vstupem i výstupem. [40], [45] Na něm je vidět, jak se integrované obvody miniaturizovali (viz obrázek 3). Příznačnější příklad je ale TMS320C6472 od stejné firmy – jedná se o signálový procesor používaný v ultrazvukových diagnostických medicínských přístrojích. [41]

Počet vývodů u tohoto integrovaného obvodu činí 737 a přitom nemá pokryt vývody celou spodní plochu pouzdra.



Obrázek 3: Příklad BGA pouzdra (převzato z [45])

1.5 Technologie pro pájení

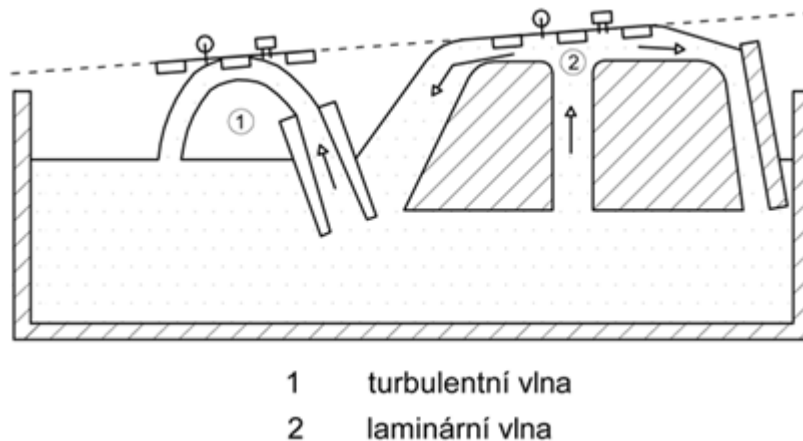
V této kapitole se budeme bavit o strojním (hromadném) pájení, které má pro velkosériovou průmyslovou výrobu značně větší význam, než pájení ruční.

Při pájení jsou nutné dvě věci – dodat samotnou pájku do spoje a ohřát spoj na pracovní teplotu (podle použité pájky). Podle typu technologie se tak děje buď zároveň, nebo odděleně.

I přes široké spektrum jsou v praxi používány nejvíce dvě metody pájení – pájení vlnou a přetavením. Je to logické, protože pokrývají téměř veškeré požadavky elektrotechnického průmyslu.

1.5.1 Pájení vlnou

Pájení vlnou - jde o nejrozšířenější a také historicky první podobu strojního pájení. Osazené desky plošného spoje (součástky jsou zajištěny proti vypadnutí díky předtvarování vývodů, v případě SMD součástek je nutné tyto přilepit k desce plošného spoje) projíždějí na dopravníku postupně několika sekcemi – v první se nanese tavidlo, druhá slouží jako předehřívací. Poté je DPS dopravena do sekce, kde dojde k zapájení pomocí cínové vlny. Vlny mohou být turbulentní nebo laminární (viz obr. 3.). Na dně nádrže s roztavenou pájkou je čerpadlo, které žene roztavený kov přes systém clon a štěrbin. Přes vrchol vlny projede dopravník s DPS a smočí vývody součástek. Prázdné otvory v desce se musí zakrýt, aby pájka nenatekla na stranu součástek. Poté už zapájená deska jede do mycí sekce a do zásobníku. [25]



Obrázek 4: Znáznornění principu procesu pájení vlnou (převzato z [25])

1.5.2 Pájení přetavením

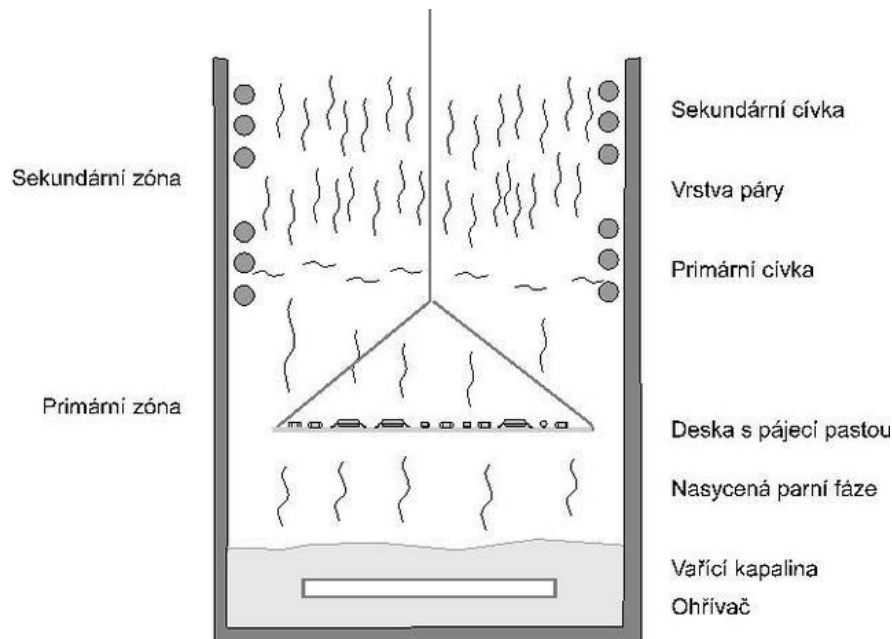
Pro povrchovou montáž se využívá pájení přetavením. Pájka se zde nanáší před samotným pájením v podobě pasty většinou šablonovým tiskem. Poté člověk pomocí vakuové pinzety nebo osazovací stroj umístí na DPS součástky. Poté se jedním ze způsobů popsaných níže pastovitá pájka zahřeje, dojde k uvolnění tavidla a přetavení.

Pájení konvekcí využívá tepla horkého plynu (vzduch, dusík). Používá se zde tzv. pájecích pecí, nejčastěji průběžných, kdy se deska posouvá na dopravníku pomalou rychlostí skrz pec. Případně se využívá horkovzdušných stanic pro ruční pájení. Výhodou této technologie je nízká cena a dostupnost, ale trpí nedostatky jako je nerovnoměrný ohřev desky, závislost kvality pájeného spoje na mnoha parametrech jako teplotní profil, tlak plynu, tvar trysek, čas.

Pájení infračerveným zářením - energie, díky které dochází k přetavení pájecí pasty, se na desky plošných spojů dostává prostřednictvím záření z IR zářičů. Množství energie, která je absorbována, záleží na absorpčním koeficientu, jehož velikost souvisí s vlastnostmi povrchu a vlnovou délkou záření. Lze říci, že absorpce záření se vzrůstající vlnovou délkou klesá (vyzařovaná vlnová délka je tím delší, čím je nižší teplota). Při pájení infračerveným zářením nastává jev, kdy součástky s tmavším povrchem jsou více zahřívány než místa se světlejším povrchem (pájecí pasta). Dochází tedy k nerovnoměrnému rozložení teploty na povrchu desky plošného spoje. To má vliv na kvalitu pájení a tepelné namáhání součástek, což může být problém zvláště u více citlivých součástek (integrované obvody). Výhodou této metody je velká účinnost, nevýhoda je nasnadě – nehomogenní ohřev pájené desky.

Pájení v parách (kondenzační pájení) spočívá v tom, že se osazená deska vloží do pracovního prostoru. Na dně je zásobník s kapalinou, jejíž teplota varu je jasně definovaná a během procesu pájení se nemůže stát, že by v nádobě byla teplota vyšší. Zespoda tedy kapalinu zahříváme, její páry pak stoupají výše a kondenzují na desce

plošného spoje díky jeho nižší teplotě. Také se zde vytváří ochranná atmosféra díky velké hustotě par pájecí kapaliny, které vytlačí vzduch. Výhody tohoto způsobu pájení je rychlé, efektivní a homogenní zahřívání desky plošného spoje, nemožnost neúmyslně zničit součástky vyšší teplotou. Dosahuje se tedy velmi kvalitních výsledků. Nevýhoda ovšem spočívá v dosti vysoké ceně pájecí kapaliny na bázi fluórouhlíků (například GALDEN s teplotou varu 230°C). [26]



Obrázek 5: Princip pájení v parách (převzato z [26])

Pájení laserem je pak specializovaná technologie pájení, která se zatím používá pouze v určitých případech. Velkou výhodou je velmi přesné lokální přetavení pasty, které způsobuje programově řízený laserový paprsek. Ohřev bývá velmi krátký, čímž se zmenšuje možnost vzniku intermetalických struktur na pájeném spoji. Úzce směřovaný paprsek předurčuje laser na lokální pájení, tzn., že se paprskem pájí jedno pájené místo po druhém. Jako zdroje paprsku se používají laserové diody, pulsní (pevnolátkové) a plynové lasery.

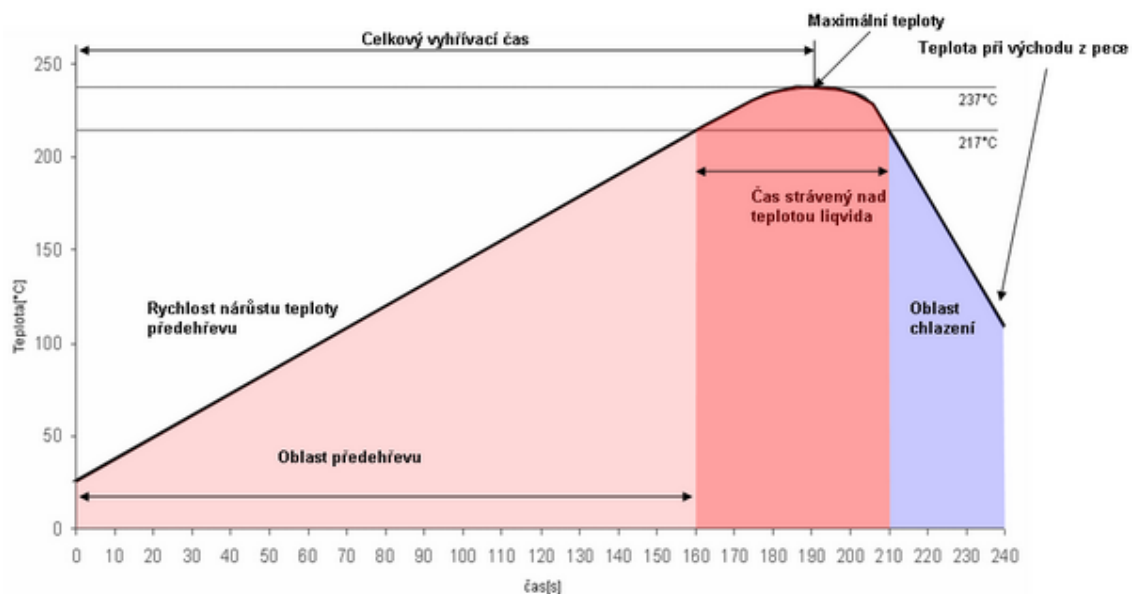
Pájení laserem přináší velmi precizní výsledky – ty jsou dané jednak velice přesným vymezením předané energie, jednak možnosti přesného polohování laserového paprsku s chybou v desítkách mikronů. Díky laseru zde můžeme také dosáhnout relativně vysokých požadovaných teplot bez ovlivnění samotných součástek. Nevýhodou této metody je nižší rychlost pájení (laser musíme po každém spoji vypnout). [44]

1.5.3 Teplotní profil

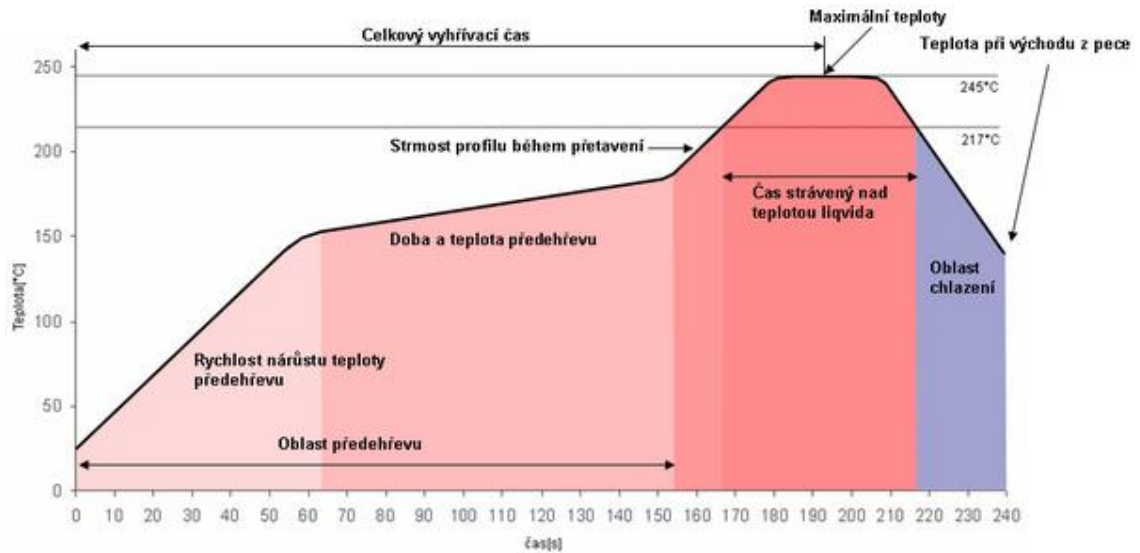
Bavíme-li se o hromadném pájení (vlnou či přetavením), je vhodné zmínit tzv. teplotní profil pájecího procesu, tedy závislost teploty procesu na čase. Správně nastavený teplotní profil je důležitým předpokladem pro úspěšné zapájení součástek bez defektů.

Teplotní profily pro jednotlivé materiály, součástky nebo technologie předepisuje na základě zkušeností výrobce. Výsledný teplotní profil musí přitom respektovat maximální teplotu, kterou snesou použité součástky, teplotu tavení použité pájky a teplotní profil tavidla (aby došlo k ideální aktivaci), případně další faktory.

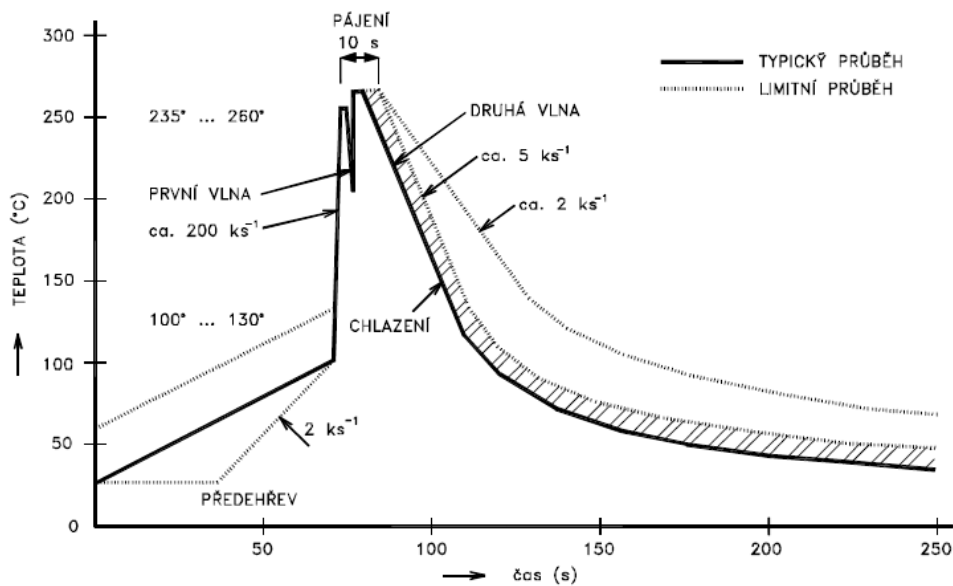
Teplotní profil může mít lineární průběh, tj. lineární nárůst až do maximální teploty, tzv. RTS (Ramp to Spike). Toho se však v praxi obtížně dosahuje. Pro průběžné pece s několika zónami různé teploty je typičtější tzv. sedlový profil (RSS – Ramp Soak Spike). Pájení vlnou pak má typický výrazný nárůst teploty v okamžiku kontaktu desky s vlnou. [25]



Obrázek 6: Lineární teplotní profil (převzato z [25])



Obrázek 7: Sedlový teplotní profil (převzato z [25])



Obrázek 8: Teplotní profil pájení vlnou (převzato z [28])

1.5.4 Pájení pouzder BGA

Pokud mluvíme o pájení BGA pouzder, tak v úvahu připadají hlavně pájení konvekcí, IČ zářením a pájení v parách. Pájení laserem není možné kvůli topologii BGA pouzder. Kromě přetavovacích pecí se využívá i opravárenských stanic. Ty disponují hlavicí s tryskami horkého vzduchu nebo IR zářiči a pájí lokálně pouze BGA pouzdro (případně jiná pouzdra, především čipů).

Při pájení je nutný postup [3]:

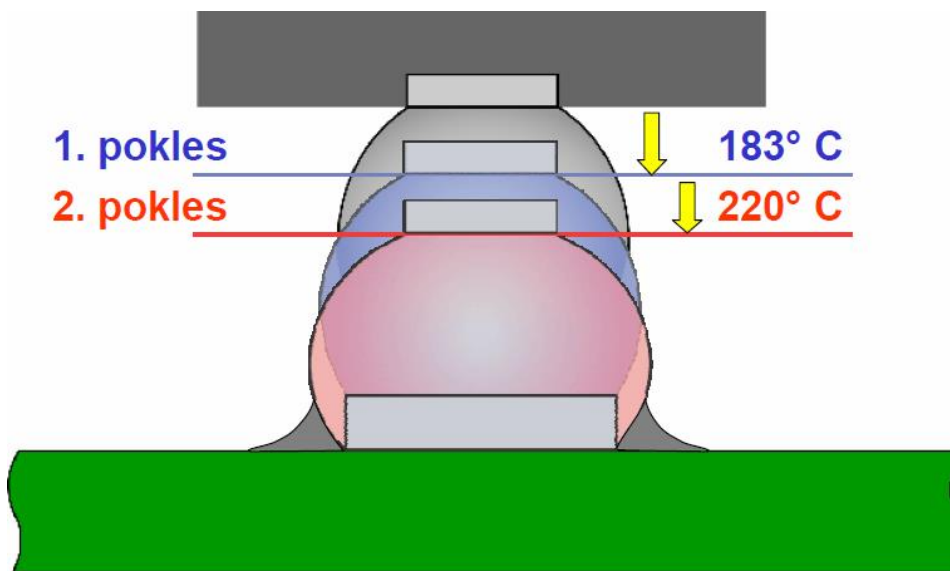
- nanesení pastovité pájky na kontaktní plošky na DPS/nanesení tavidla ve formě gelu
- sesouhlasení vývodů BGA
- přetavení kuliček a připájení k DPS

Sesouhlasení probíhá za pomoci kamer optickým porovnáním obrysu pouzdra s potiskem na DPS a kuličkových vývodů s kontaktovacími ploškami na DPS, případně ručně.

Při pájení se uplatňují některé významné jevy:

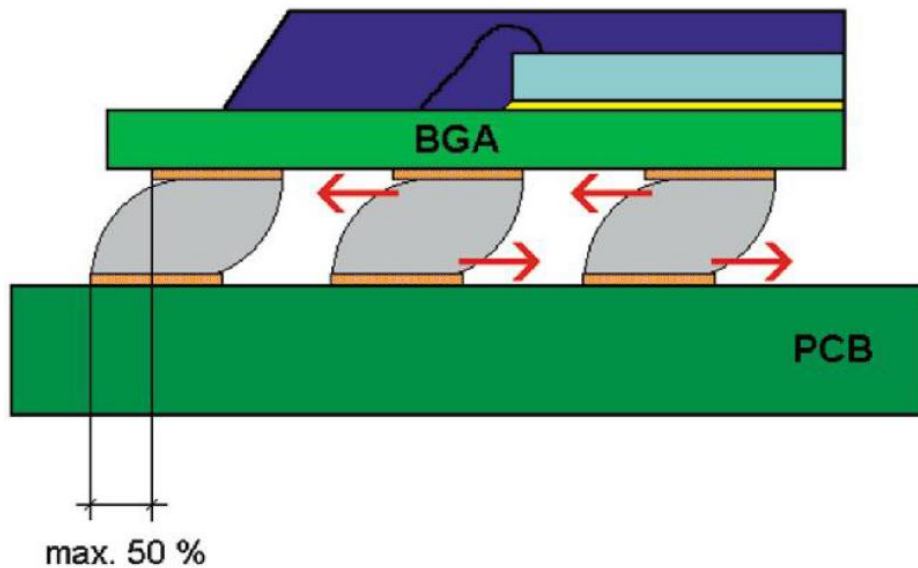
- efekt dvojího poklesu
- efekt autokorekce
- teplotní a mechanická hystereze

Efekt dvojího poklesu souvisí s teplotním profilem pájení (závislost teploty na čase). První pokles zaznamenáme, když se roztaví nanesená pasta, případně se nataví kuličky v místě styku s DPS, při teplotě 183 °C (pro slitinu Sn63Pb37) - přibližně o 10 - 20 %. Druhý pokles pak nastává s natavením objemu celé kuličky na vrcholu teplotní křivky – tím klesne pouzdro vlivem hmotnosti ještě níže (20 – 30 %) a dojde k dokonalému smáčení spoje na kontaktních ploškách. [25]



Obrázek 9: Efekt dvojího poklesu (převzato z [3])

Autokorekce nebo samovystředění souvisí s určitým povrchovým napětím, které má roztavená pájka – to pak vystředí kuličku přesně doprostřed pájecí plošky. Tím se dají do jisté míry eliminovat nevelké chyby při umístování BGA pouzder.



Obrázek 10: Efekt autokorekce (převzato z [3])

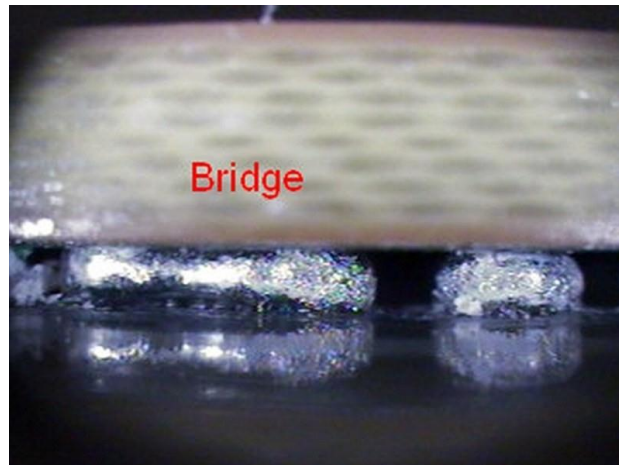
Teplotní a mechanická hystereze se projevuje tak, že spoj tuhne při nižší teplotě než je teplota tání slitiny. To může vést k mírnému zdvihu pouzdra.

1.6 Chyby při pájení BGA pouzder

Při nesprávném pájení BGA pouzder mohou vznikat tyto defekty:

- zkraty a pájkové můstky mezi vývody pouzdra
- delaminace DPS nebo BGA
- black pad efekt
- warpage efekt
- head in pillow efekt („hlava v polštáři“)
- pop-corn efekt
- dutinky

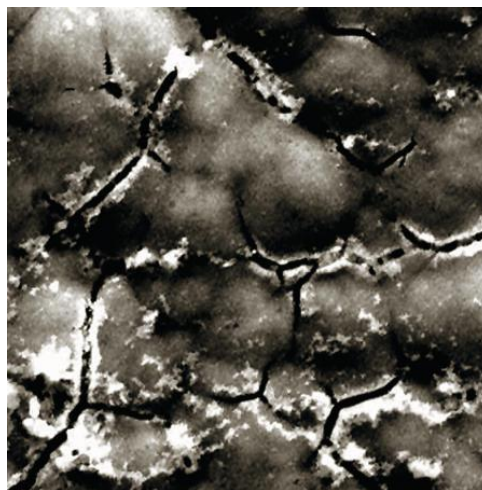
Zkraty a pájkové můstky mezi vývody pouzdra jsou vodivá spojení vzniklá slitím dvou (nebo více) vývodů – kuliček. To má samozřejmě neblahý vliv na funkčnost čipu a tato závada se pozná prakticky okamžitě (a nejlépe), ať už elektrickou nebo optickou kontrolou. Příčinou zkratů může být příliš velká hmotnost pouzdra (a nesprávné použití pájecí slitiny), nesprávný teplotní profil (příliš vysoká teplota), nadměrné množství tavidla, špatně natisknutá pájecí pasta, mechanické či tepelné prohnutí DPS nebo čipu při pájecím procesu. Na větší hmotnost pouzdra je nutné myslet při pájení pouzdra typu CBGA, která jsou těžší než běžná PBGA, a tak je vhodné použití pájecí slitiny (celé kuličky nebo alespoň jádra) s vyšší teplotou tavení a použití pájecí pasty. [25]



Obrázek 11: Defekt BGA – můstek (převzato z [27])

Delaminace DPS nebo BGA znamená odlepení kontaktní měděné plošky DPS od základního substrátu nebo kontaktní plošky BGA pouzdra. Vzniká tak přerušovaný spoj. Důvodem může být nesprávný teplotní profil (příliš dlouhá doba zahřátí), záleží na technologii, kterou jsou kontaktní plošky přichyceny k substrátu (naválcování...) a dalších faktorech.

Black Pad efekt lze charakterizovat jako korozi poniklovaných povrchů, která souvisí s vyšším obsahem fosforu v niklové vrstvě – to způsobí otevřené spojení mezi intermetalickou vrstvou Ni-Sn a vrstvou Ni. Jeho název vyplývá ze vzhledu takové koroze – vznikají tmavě šedé až černé plošky. Takové povrchy je obtížné až nemožné pájet, v již zapájeném spoji působí značné mechanické oslabení spoje a v konečném důsledku přerušování spojení mezi kuličkou a DPS. [29]

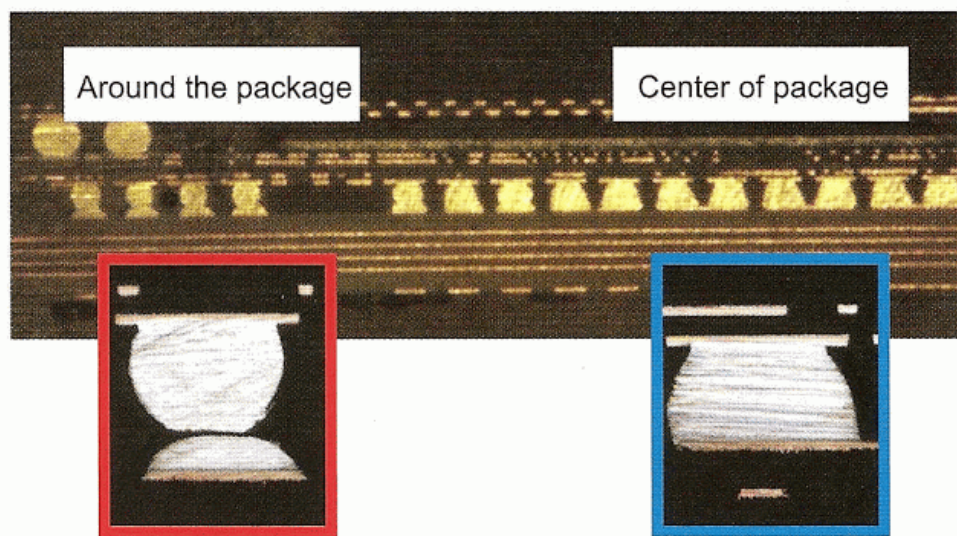


Obrázek 12: Defekt BGA – black pad efekt (detail) (převzato z [29])



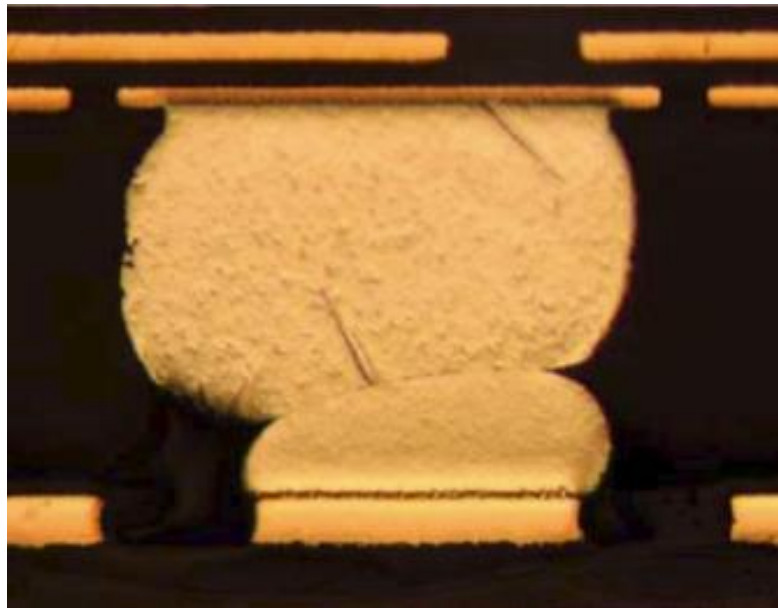
Obrázek 13: Defekt BGA – black pad efekt (přerušené spojení) (převzato z [29])

Warpage (warping) efekt souvisí s koeficientem teplotní roztažnosti materiálů. V důsledku rozdílného koeficientu v případě pouzdra čipu a desky, na kterou pouzdro pájíme, nastane situace, kdy materiál s nižším teplotním koeficientem (křemíkový čip) se při nárůstu teploty pomaleji roztahuje a při chlazení pomaleji smršťuje, naopak substrát (FR4) se roztahuje a smršťuje rychleji. To vede ke zdvihu pouzdra a k nedostatečnému propojení kuličky s pájecí ploškou – kulička se přetaví, ale v kritické chvíli nemá kontakt s ploškou. Při chlazení pak usedne na pájecí plošku, příp. přetavenou pastu a vzniká tak efekt „Head in Pillow“. Kontakt není kvalitní nebo není vůbec realizován. Dochází zde také k mechanickému stresu (vnitřnímu pnutí) pouzdra a může dojít i k jeho popraskání. Velkou měrou se zde uplatňuje i vlhkost – čím vyšší, tím více se tento efekt projeví a má pak větší následky (popraskání pouzdra – viz dále pop-corn efekt). [34], [35]



Obrázek 14: Defekt BGA – Warpage efekt (převzato z [36])

Head in Pillow efekt (“hlava v polštáři”) vzniká, jestliže při pájení dojde k roztavení pájecí pasty na připojovací plošce, ale k nedostatečnému přetavení kuličky. Nevznikne tím sice přerušené elektrické spojení (nepozná se to na elektrickém testování obvodu), ale spoj je značně mechanicky oslaben a tak stačí mírně zvětšené mechanické (nebo tepelné) namáhání a k přerušení dojde. Důvodem může být opět nevhodně zvolený teplotní profil. [30]



Obrázek 15: Defekt BGA – Head in Pillow efekt (převzato z [31])

Pop-corn efekt nastává u plastových pouzder, kdy je absorbována vlhkost do plastových částí. Během pájení se mění na páru, která způsobuje vnitřní pnutí a vede k popraskání pouzdra. Proto musí být pouzdra skladována v suchých prostředích, případně je nutné je vlhkosti zbavit sušením.

Dutinky můžeme rozdělit na makrodutinky, které vznikají během procesu pájení uvolňováním těkavých složek a jejich průměr je větší než 10 μm , a mikrodutinky - řada malých dutinek umístěných na rozhraní mezi pájecí ploškou na desce s plošnými spoji a pájkou; souvisí se stavem povrchu desky a plošky. Opět oslabují mechanické i elektrické vlastnosti spoje. [33]

1.7 Způsoby diagnostiky BGA pouzder

Protože je výroba elektronického zařízení včetně návrhu obvodu, laboratorního odzkoušení, návrhu a výroby DPS, osazení a zapájení součástek plná citlivých operací, je třeba neustále kontrolovat kvalitu procesu a výrobku. Výrobky se testují z hlediska přenosu signálu, napájení, odvodu tepla a dalších. V této práci nás zajímá hlavně

kontrola zapájených spojů a detekce různých typů poruch vzniklých při pájecím procesu.

BGA pouzdra znamenají sice zmenšení rozměrů, zvýšení počtu vývodů, zlepšení elektrických vlastností a další výhody, ale velká nevýhoda tkví v možnostech diagnostiky zapájených spojů, neboť kromě krajních řad leží vývody pod pouzdrům a není jednoduché zkontrolovat vnitřní vývody.

Možné způsoby diagnostiky jsou:

- testovací systém In-circuit
- pomocí rentgenu
- optické metody
- funkční testování obvodu
- destruktivní testování (zkoušky tahem, příčné řezy)

In-Circuit testovací systém je založen na kontaktování jednotlivých uzlů obvodu a měření funkce součástek (funkční testy), parametrů součástek (parametrické testy – zesílení, doba zpoždění, náběžná/sestupná hrana apod.). Touto metodou zjišťujeme, zda jsou součástky zapájené ve správné polaritě, mají správnou hodnotu tolerance, jsou-li vůbec zapájené, nejrůznější zkratky. Vzhledem k umístění vývodů BGA pouzder je tato metoda poněkud problematická. [10]

Diagnostika BGA pouzder pomocí rentgenových zařízení byla logická reakce, jak kontrolovat propojení. Rentgen je nedestruktivní metoda, spolehlivě odhalí vzniklé můstky mezi jednotlivými vývody. Špatně s ním však odhalíme přerušené vývody nebo póry. [11]

Pod optickými metodami si můžeme představit klasicky mikroskop, lupu. Vzhledem k topologii BGA pouzder je však potřeba sofistikovanějších metod. Dnes můžeme použít velmi moderních zařízení pro automatizovanou optickou kontrolu. Při testování BGA pouzdra je z jedné strany součástky výkonný mikroskop společně s CCD kamerou s vysokým rozlišením a světelný zdroj z druhé strany. Je tak možné zkoumat jednotlivé řady, pomocí nastavení zorného pole také vnitřní propojení kuliček, strukturu spoje a povrchu, případně odhalovat můstky. V mnohých případech nám může říct více, než zkouška pomocí rentgenu. [11]

V rámci optických metod lze použít jinak především v lékařském odvětví používaný endoskop, což je ohebný optický přístroj. Světelný čip je zaveden na příslušné místo a pomocí optických vláken se signál přenáší do přístroje a je zobrazován na monitoru.



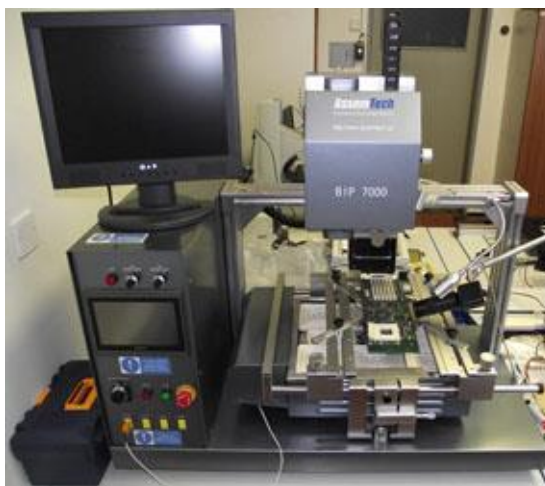
Obrázek 16: Optická kontrola BGA pouzdra pomocí systému Flexia (převzato z [27])

Při funkčním testování chápeme DPS a daný obvod jako uzavřený funkční celek s vstupy a výstupy. Pro signál přicházející na vstup musí být proto definována odezva na výstupu. Porovnáním s referenčními hodnotami bychom měli být schopni určit, jestli je testovaná deska v pořádku. Obtížnější je určení přesné závady, stejně jako prvotní určení referenčních hodnot (optimálního testu). Tato metoda je nejnáročnější na čas a na kvalifikovanou obsluhu. [6]

Destruktivní testování je pak posledním řešením, po kterém již nelze testované čipy znovu použít, a výsledky analýzy jsou použity k výrobě dalších sérií. Typicky je to test tahem a příčné řezy jednotlivými řadami spojů, ze kterých se zhotovují výbrusy. Ty se pak zkoumají opět pod mikroskopem.

1.8 Oprava BGA pouzdra

Pokud se při kontrole zjistí porucha, defekt zapájeného BGA pouzdra, kvůli jeho topologii není možné opravovat spoj po spoji, ale je nutné BGA celé odpájet, očistit od zbytků cínu a tavidla DPS i pouzdro, kde samozřejmě nezbydou připojovací kuličky. Dále je nutné provést tzv. reballing, překuličkování. Poté je postup stejný jako při standardním pájení – nanesení pasty, srovnání vývodů a zapájení. Oprava se provádí pomocí opravárenských stanic vybavených hlavou s horkým vzduchem nebo IR ohřevem.



Obrázek 17: Opravárenská stanice BIP 7000 (převzato z [32])

2 RISK MANAGEMENT

Mluvíme-li o projektovém řízení, které má nezastupitelnou roli prakticky ve všech odvětví lidské činnosti elektrotechniku nevyjímaje, je velmi důležitým faktorem riziko projektu. Rizika projektu má na starosti risk management. K jejich řízení se uplatňují aktivity vedoucí k eliminaci nežádoucích vlivů. V podnicích pak úlohu risk managementu přebírá quality management, který dále kontroluje, analyzuje a zlepšuje výrobní proces. Neboť výrobní podnik můžeme také považovat za projekt dlouhodobého charakteru s cílem kladné ekonomické bilance a růstu.

2.1 Pojem „riziko“

Riziko je účinek nejistoty na dosažení cílů, nejistá událost, která pokud nastane, má negativní dopad na cíle projektu. Vždy ohrožuje konkrétní aktivum projektu. Vzniká, roste, klesá a zaniká v čase.

Riziko je tvořeno:

- rizikovým faktorem
- specifickou zranitelností
- hrozbou

Jako příklad uvedu betonování, které má dle plánu proběhnout v zimním období (v lednu). Rizikovým faktorem je zde to, že v zimě je velká pravděpodobnost mrznutí. Specifická zranitelnost je to, že bude méně než $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je teplota, při které se už nedá betonovat. Hrozbou je pak fakt, že nepůjde v tomto období betonovat. [21]

2.2 Řízení rizik

Řízení rizik je pak soubor preventivních a korektivních aktivit vedoucích k eliminaci nežádoucích vlivů na dosažení cílů projektu. Snaží se snížit pravděpodobnost výskytu a dopady rizikových situací.

Skládá se většinou z 5 procesů:

- 1. fáze – komunikace a konzultace (s účastí všech zainteresovaných stran)
- 2. fáze – stanovení kontextu (vymezení cílů)
- 3. fáze – posuzování rizik (identifikace, analýza, hodnocení rizik)
- 4. fáze – ošetření rizik
- 5. fáze – monitoring a přezkum (revize, hodnocení efektivity)

Tyto procesy jdou v risk managementu za sebou, ale zároveň se neustále vracíme – neustále musí běžet komunikace mezi zainteresovanými stranami, monitoring a přezkum.

Modelů pro metodiku řízení rizik je více, toto bylo převzato ze standartu ISO/IEC 31000:2009. Dále se můžeme setkat se standarty PMBoK či ATOM. Vesměs se ale věnují risk managementu velmi podobně. [21]

2.2.1 Identifikace rizika

Správná identifikace rizika je závislá na důkladné dekompozici prostředí a faktorů působících v podniku či projektu. [21]

Rozklad může mít mnohé podoby:

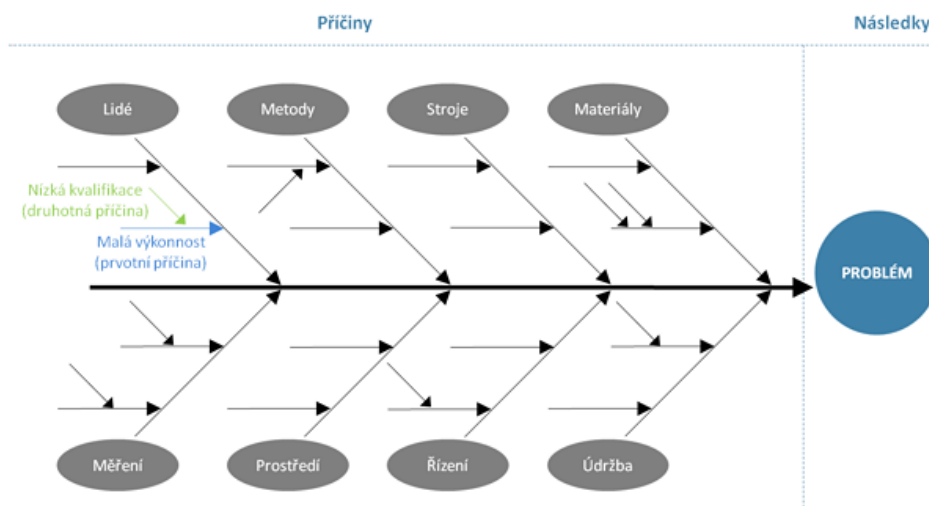
- z hlediska prostoru (lokality úkonu)
- z hlediska času (jednotlivé fáze, činnosti procesu)
- se zaměřením (na nástroje, produkt, dokumentaci apod.)

Identifikace rizika využívá nástroje:

- Ishikawovy diagramy (diagramy rybí kosti – fishbone diagram)
- myšlenkové mapy

Diagram rybí kosti nebo-li diagram příčin a následků. V risk managementu se používá často při týmových setkání (brainstorming), kdy se v diskuzi (či pomocí jiné analytické metody) nad problémem postupně zapisují možné příčiny formou rybí kosti. Problém je znázorněn hlavou, jednotlivé kosti pak znázorňují dimenze, ve kterých se hledají příčiny, které jsou ještě seřazeny dle nadřazenosti (prvotní je nejbliže „páteří“). Typicky je to těchto 8 dimenzí: [42]

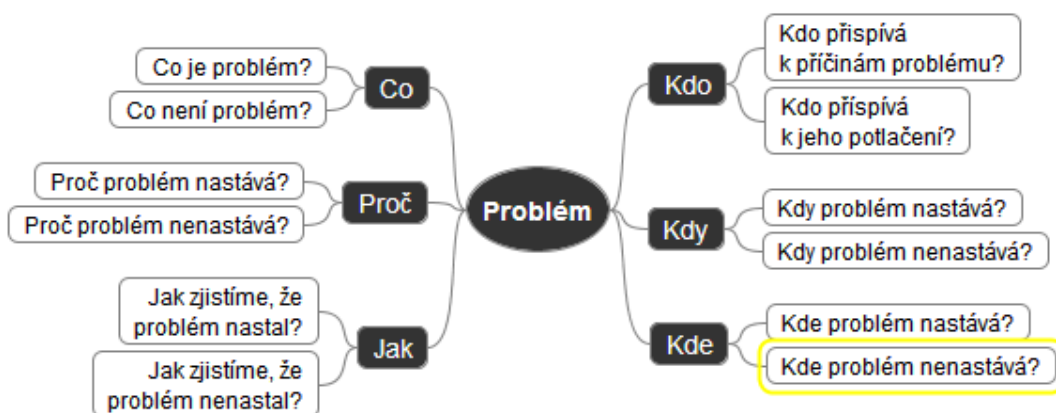
- Lidé
- Metody
- Stroje
- Materiál
- Měření
- Prostředí
- Řízení
- Údržba



Obrázek 18: Ishikawův diagram (převzato z [42])

Myšlenkové mapy (mind maps) jsou (ale nemusí být) v podstatě rozpracovanou formou Ishikawova diagramu. Jde o vysoce účinnou analytickou metodu použitelnou hlavně pro řešení problémů, ale i učení a osobní rozvoj. Graficky je zde znázorněn řešený problém a všechny dimenze jeho řešení, které jsou navzájem pospojovány a uvedeny do souvislostí. Myšlenkové mapy mohou být zpracovány klasicky pomocí barevných tužek a papíru, tabule nebo také pomocí speciálního softwaru. Technika je použitelná pro jednoho člověka (řešení problému, učení, osobní rozvoj). Využívá se též brainstormingu, v případě elektronického zpracování i formou elektronické komunikace. [22]

Na obrázku 15 je příklad myšlenkové mapy využívající analytické techniky 6 otázek (six questions).



Obrázek 19: Myšlenkové mapy (převzato z [22])

2.2.2 Hodnocení rizika

Důležitou součástí risk managementu je také správná kvantifikace a kvalifikace rizika. Často se bohužel v praxi setkáme s trochu vágním přístupem a hodnocením podle triviální stupnice (1 – velmi malé riziko...5 – velmi vysoké riziko).

Riziko má vždy dva rozměry: [21]

- výskyt – pravděpodobnost vzniku a naplnění rizika
- dopad – hodnota ohroženého aktiva projektu, následky a náklady

Z těchto dvou hodnot se pak určuje očekávaná hodnota rizika (OHR):

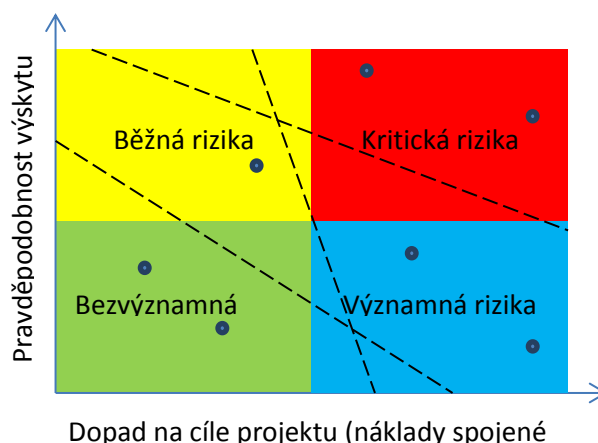
$$\text{OHR} = \text{výskyt} * \text{dopad}$$

Výskyt a dopad můžou být přesně stanoveny pomocí finančního vyjádření hodnoty ohroženého aktiva a procentuálního vyjádření pravděpodobnosti výskytu rizika. Případně se hodnoty odhadují pomocí bodové stupnice, která byla sestavena na základě předchozích zkušeností a praxe.

Na základě výpočtu výskytu a dopadu se používají tyto nástroje hodnocení rizik: [22]

- mapa rizik
- matice rizik

Mapa rizik představuje graf rozdělený na 4 kvadranty podle závažnosti rizika. Na ose x vynášíme dopad vyjádřený ve finančních jednotkách, na ose y pak pravděpodobnost výskytu v procentech. Riziko je pak umístěno v grafu dle souřadnic, hodnocení získá podle kvadrantu, ve kterém se nachází, případně podle dalších kritérií, které mohou být promítnuty do grafu jako hraniční funkce. Rizika mezi sebou porovnáváme pomocí absolutní vzdálenosti od středu.



Obrázek 20: Mapa rizik

Matice rizik je založena na bodové stupnici hodnocení rizika, která je daná zkušenostmi a praxí. Zpravidla se pro dopad a výskyt používá tříbodová stupnice. Z toho se poté vypočte OHR a vynese do grafu (matice) do příslušného kvadrantu podle počtu bodů.

Pravděpodobnost výskytu	3	6	9
	2	4	6
	1	2	3
	Dopad na cíle projektu		

Obrázek 21: Matice rizik

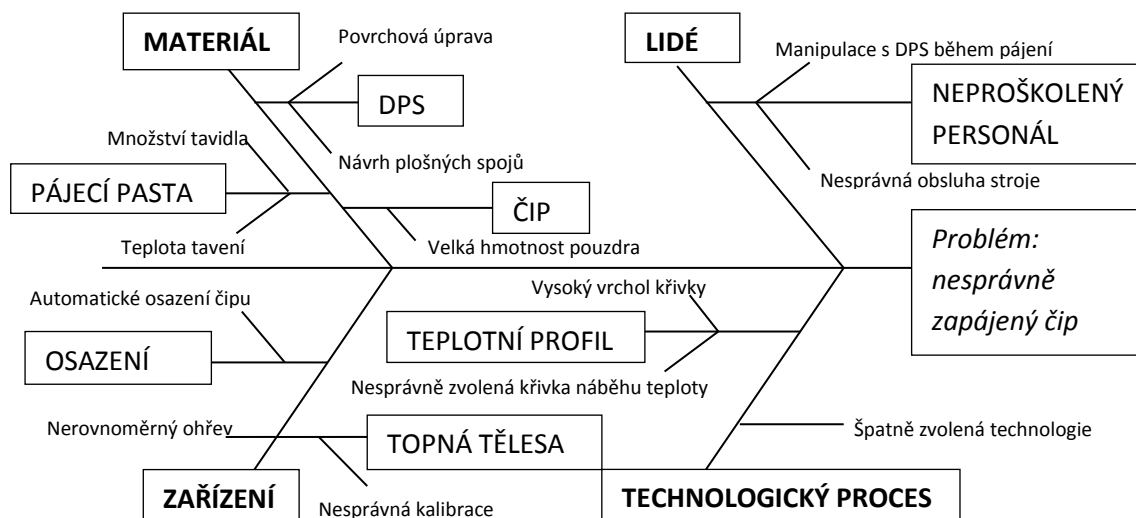
2.3 Risk analýza pájení čipů

V této části práce budu vycházet z údajů firmy Arvato, ve které proběhla první část experimentu (zapájení čipů pod různými teplotními profily). Tato firma se zabývá opravou mobilních telefonů, ve svém oboru jsou největší na středoevropském trhu. Denně projde pod rukama pracovníků přibližně 3000 telefonů. Opravují se hlavně vadné paměti a procesory (BGA pouzdra) a dále pak nejrůznější konektory a další části, které jsou mechanicky namáhané a často jsou zdrojem poruch telefonu.

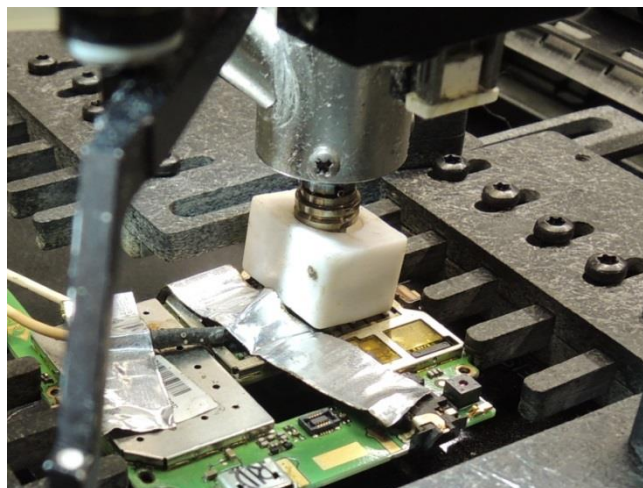
V první řadě si vymodelujeme diagram rybí kosti (viz obrázek 22) pro situaci špatně zapájeného BGA čipu na aktuálně používaném zařízení Martin, abychom měli přehled o všech možných rizikových faktorech, které zde mohou způsobit defekt pouzdra. Na základě tohoto diagramu se pak odborníci dohodnou, jak nejlépe postupovat při eliminaci rizika.

Nejčastější chybou při pájení na zařízení Martin je bezesporu špatně umístěné pouzdro (zapájené o řadu kuliček vedle či úplně mimo svojí polohu – vyzorováno při vlastním experimentu), neboť toto zařízení je vybaveno poměrně nešikovným automatem pro umístování součástek. Jeho základem je kamera nad součástkou a vakuová pinzeta. Po najetí vakuové pinzety nad správnou polohu však součástku zařízení nepokládá, nýbrž upustí ve výšce cca 5 mm nad deskou. Proto se odborníci ve firmě dohodli na koupi nové pájecí stanice.

Při nevhodné volbě pájecího profilu pak může dojít k dalším defektům, které budu zkoumat v následujícím experimentu. Jisté riziko může představovat i neideální nástavec horkovzdušné trysky, který způsobuje nerovnoměrný ohřev pouzdra (viz obrázek 23).



Obrázek 22: Vymodelovaný diagram rybí kosti



Obrázek 23: Nástavec horkovzdušné trysky

Pro určení hodnoty rizika při opravě telefonu (vzhledem k tématu bakalářské práce zúžím opravu pouze na výměnu BGA čipu) je nutné znát výskyt tohoto rizika a dopad (cenu). Mým cílem bude kromě určení hodnoty rizika při pájení na zařízení Martin (které firma aktuálně používá) také provést srovnání s rizikem při pájení na novém zařízení PICO, které by mělo přinést lepší výsledky – menší zmetkovitost. V rámci srovnání také ukážu kolik a v jakém časovém horizontu (s přihlédnutím na počet opravených telefonů za den) firma ušetří oproti stávající variantě (neboť každý zmetek znamená pro firmu náklady).

Na každé desce může být čip pájen pouze dvakrát (tj. v případě prvního nezdaru je jen jeden opravný pokus), poté je zákazníkovi vyměněna celá základní deska telefonu. Při opravných pokusech se zmetkovitost zvyšuje. Celkový výskyt tedy vypočteme:

$$V_{celk} = V_1 * V_2 [\%]$$

kde V_1 je výskyt zmetků při prvním pájení a V_2 výskyt zmetků při druhém, opravném pájení. Zmetkovitost (výskyt zmetků) se pak vypočte z úspěšnosti pájení η :

$$V = 100\% - \eta [\%]$$

Jako dopad tohoto rizika budu brát cenu nové základní desky.

Ihned po zapájení čipu (procesoru nebo paměti) je provedeno funkční testování základní desky nahráním firmwaru. Tím se prakticky eliminuje možnost, že by nějaký zmetek prošel v procesu dále a nemá smysl uvažovat tedy nad dalšími náklady (a tedy dopady) rizika spojené například s dalšími operacemi, které by bylo nutno provést (výměna konektorů, apod.) nebo s případnou reklamací opravy telefonu.

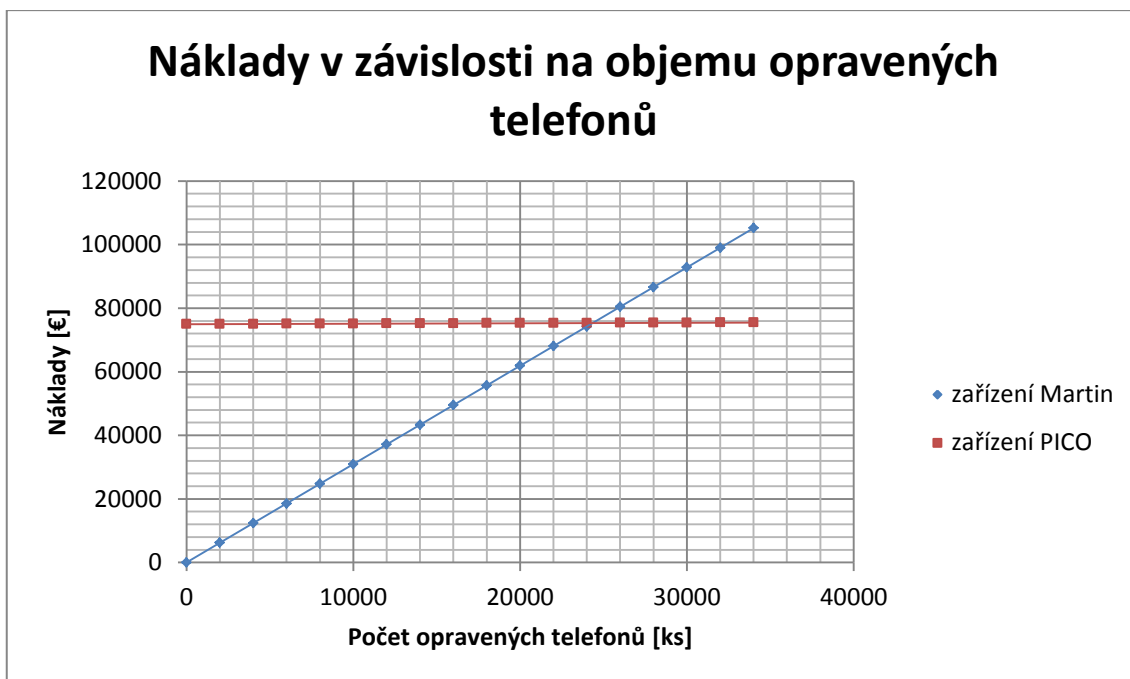
Konkrétní údaje, které jsem obdržel od firmy Arvato:

zařízení	V_1 [%]	V_2 [%]	V_{celk} [%]	D [€]	OHR
zařízení Martin	62,5	55	20,63	15	3,094
zařízení PICO	1	10	0,1	15	0,015

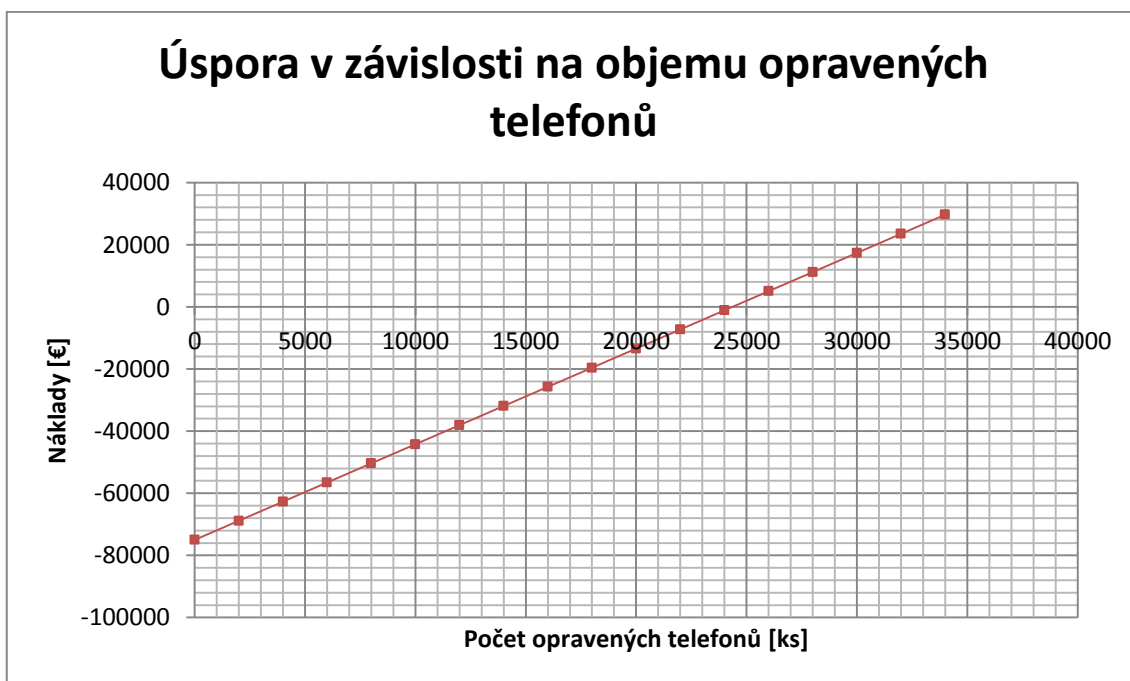
Tabulka 2: Očekávaná hodnota rizika při pájení čipů

Výskyt rizika se v případě zařízení PICO rapidně zmenšil, v důsledku čehož je také hodnota OHR značně menší než v případě prvním.

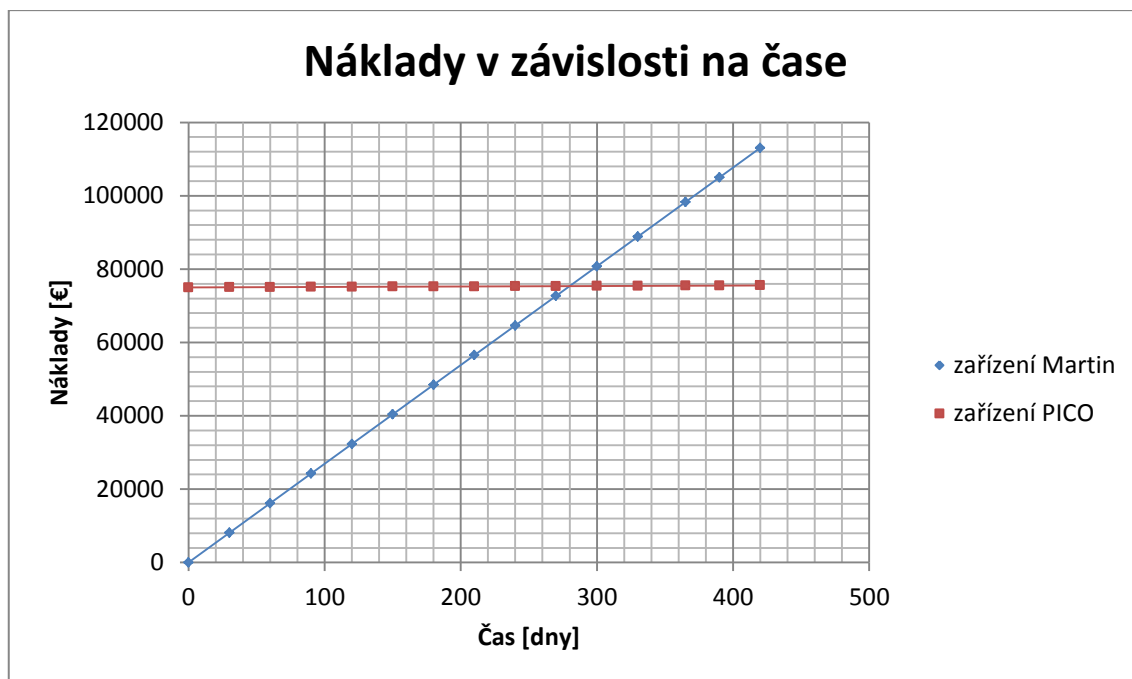
Pokud chci znát celkové náklady související s vzniklým rizikem na určitý počet výrobků, stačí vynásobit hodnotu OHR právě počtem výrobků. Na následujících grafech je pak znázorněna závislost nákladů v Kč na objemu opravených telefonů. Objem opravených telefonů mohu přepočítat na čas (dny) za předpokladu, že jeden čip se pájí přibližně 10 minut, denně probíhá oprava od 8:00 do 22:30 a beru v potaz kontinuální výrobu bez přestávky (v půlce dne se mění směny). Vychází to pak 87 čipů za den.



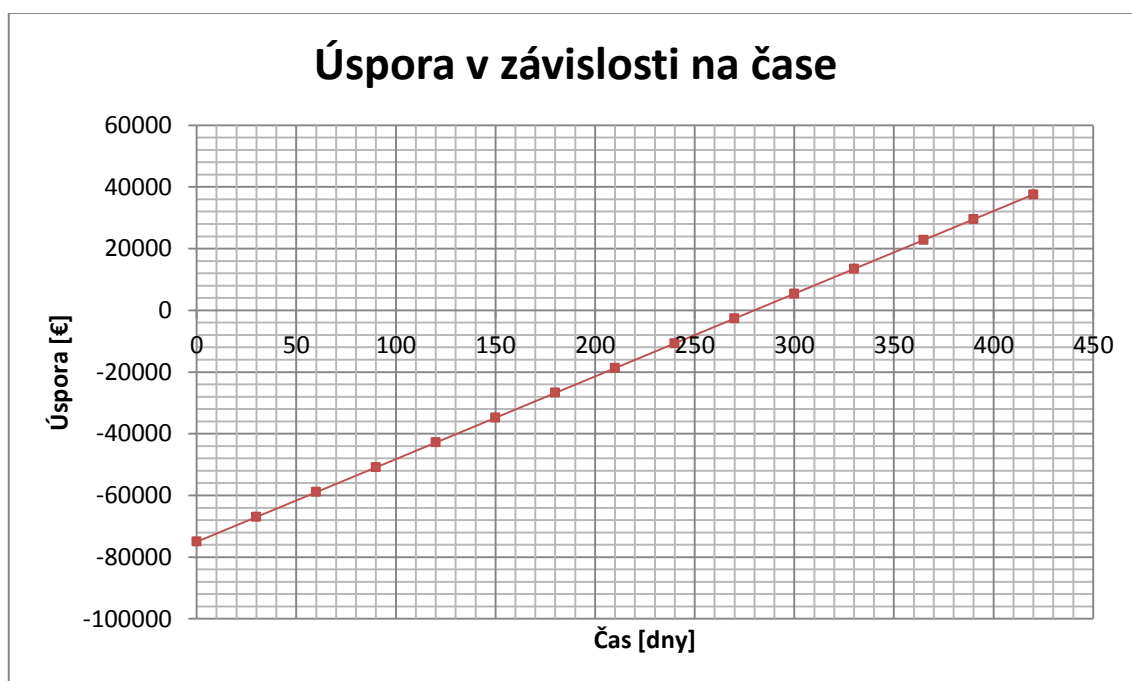
Obrázek 24: Graf nákladů spojených s rizikem pájení čipů



Obrázek 25: Graf úspor po pořízení nového zařízení



Obrázek 26: Graf nákladů spojených s rizikem pájení čipů (časová závislost)



Obrázek 27: Graf úspor po pořízení nového zařízení (časová závislost)

Z grafů a průsečíků křivek můžeme vyčíst, že po 24361. opraveném telefonu začínají být náklady spojené s rizikem pájení BGA čipů na novém zařízení menší, než při použití starého zařízení, tedy firma od tohoto počtu telefonů uspoří. To odpovídá 280 dnům. Přesně po roce používání (365 dní) bude mít firma úsporu 22766 €, což při

přepočtu na české koruny odpovídá přibližně 569150 Kč. Také vidíme, že se křivka nákladů spojených s novým zařízením PICO blíží konstantě, neboť předpokládá úspěšnost je 99,9%.

Pohybujeme se zde ve velmi vysokých částkách (zařízení PICO skoro za 2 miliony Kč), i proto se úspora projeví až v delším časovém horizontu. Na druhou stranu i tak se však nejedná o investici, která by měla dobu návratnosti v řádu let, ale pouze v řádu měsíců.

2.4 Zhodnocení analýzy

V přechozích podkapitolách jsem se snažil provést simulovanou risk-analýzu problému špatně zapájených čipů na zařízení Martin. V praxi neprovádí tuto operaci jediný člověk, ale celá skupina odborníků. Experimentální studie (v další kapitole) je pak přímo spjata s analýzou, vychází z jejích závěrů a předpokladů a následně tyto závěry a předpoklady potvrzuje či vyvrací. V mém případě byla analýza zjednodušena z toho důvodu, že jsem přímo při experimentu vyzoroval nejrozšířenější chybu při pájecím procesu. To samé vyzorovali odborníci ve firmě a bylo již předem rozhodnuto o řešení.

Porovnání hodnot rizik a dále porovnání nákladů spojených se zmetkovitostí starého zařízení a nového s odhadovanou vyšší úspěšností (v závislosti na čase se v podstatě jedná o dobu návratnosti investice v podobě nového zařízení) může sloužit ke kvalitativnímu posouzení výběru řešení problému. Velký vliv na výsledek však má mimo jiné také odhad snížení hodnoty rizika (zvýšení úspěšnosti procesu), které může být zatíženo chybou danou nesprávným odborným úsudkem.

Kromě zvýšení nákladů může vyšší zmetkovitost mít dopad také na prestiž firmy, její postavení na trhu a konkurenceschopnost. Proto si myslím, že risk management, případně management jakosti, je důležitým prvkem ve firmě a má smysl se podobnými analýzami zabývat.

3 EXPERIMENTÁLNÍ STUDIE VLIVU TEPLOTNÍHO PROFILU NA PÁJENÍ ČIPŮ

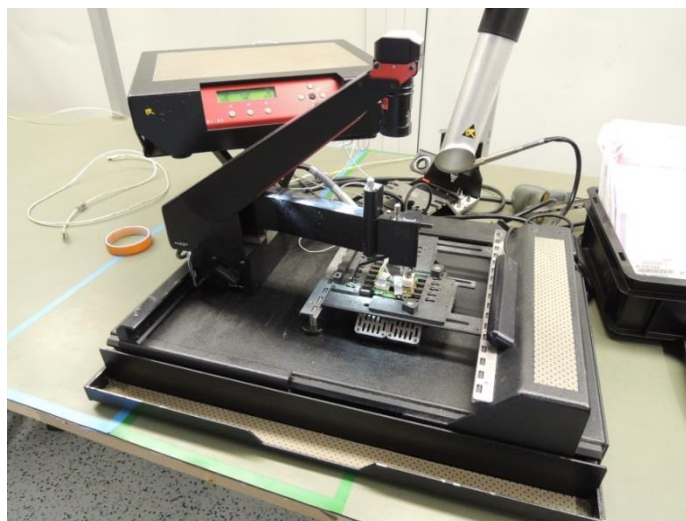
V praktické části bakalářské práce jsem se věnoval studii chyb při pájení BGA čipů. Záměrně jsem definovaným způsobem měnil podmínky (teplotní profil) při pájení, abych následně mohl porovnat výsledky. Snažil jsem se o co největší přiblížení k praxi, tedy nezkoušel jsem žádné extrémní podmínky, které jsou málo pravděpodobné.

Pájení čipů proběhlo ve firmě Arvato, která mi také poskytla součástkovou základnu a tzv. scrapové, tedy vyřazené základní desky mobilních telefonů, celkově 20 ks. Diagnostika zapájených čipů probíhala již na půdě školy.

Při diagnostice jsem se zaměřil hlavně na pokles pouzdra, dále na vznik můstků a dalších defektů. Základním úkolem je zjistit, zda teplotní profil má vliv na kvalitu pájeného spoje, nezvyšuje-li se s teplotou kvalita spoje, případně naopak je-li možné snížit náklady na energii nutnou k připájení čipu.

3.1 Zařízení MARTIN Auto-Vision-Expert 09.5

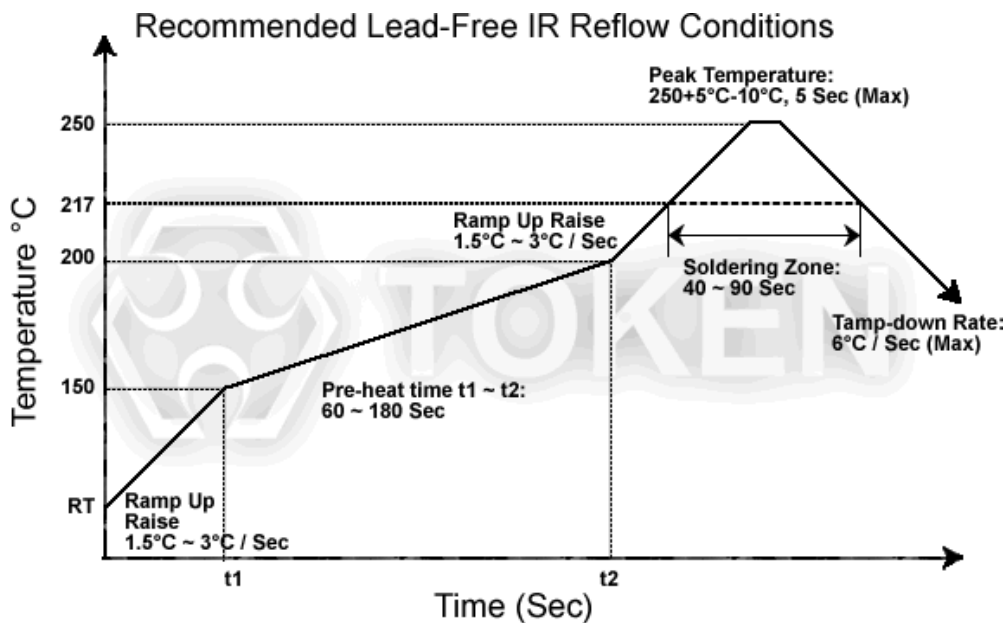
Pájení čipů proběhlo na zařízení od firmy MARTIN Auto-Vision-Expert 09.5. Firma MARTIN je předním evropským výrobcem opravárenských stanic a toto zařízení znamenalo v roce 2005 velký úspěch, stalo se prakticky standardem při opravě mobilních telefonů. Zařízení disponuje horkovzdušnou tryskou (horní ohřev), která je schopna při objemu vzduchu 2-35 l/min dodat výkon 10-250 W při teplotě 150-400°C a spodním IR ohřevem o výkonu 400-2400 W. Lze použít i automatický osazovací systém, který se skládá z kamery s rozlišením 1024x1280 px a vakuové pinzety. Pohyb ramene zajišťují 4 DC motorky. Zařízení se ovládá pomocí softwaru Easy Solder 05. [38], [39]



Obrázek 28: Zařízení MARTIN Auto Vision Expert 09.5

3.2 Zvolený teplotní profil

Jako proměnnou procesu pájení jsem si vybral konkrétně oblast přetavení – maximální hodnotu teploty, které se při pájení dosáhne. Zvolil jsem 5 teplotních profilů s maximálními hodnotami (tzv. „peaky“) 240°C, 245°C, 250°C, 255°C a 260°C, pro každý teplotní profil byly pájeny 3 desky. Prostřední hodnota maxima (250°C) odpovídá standardnímu profilu přetavení pro bezolovnaté slitiny. Bohužel nebyl k dispozici teplotní profil doporučený od výrobce čipu, nevíme ani přesné složení slitiny kuliček na spodní straně pouzdra. Proto byl zvolen profil dle [37] (viz obrázek) – na základě hledání obrázků na internetu a odborného posudku firemního specialisty.



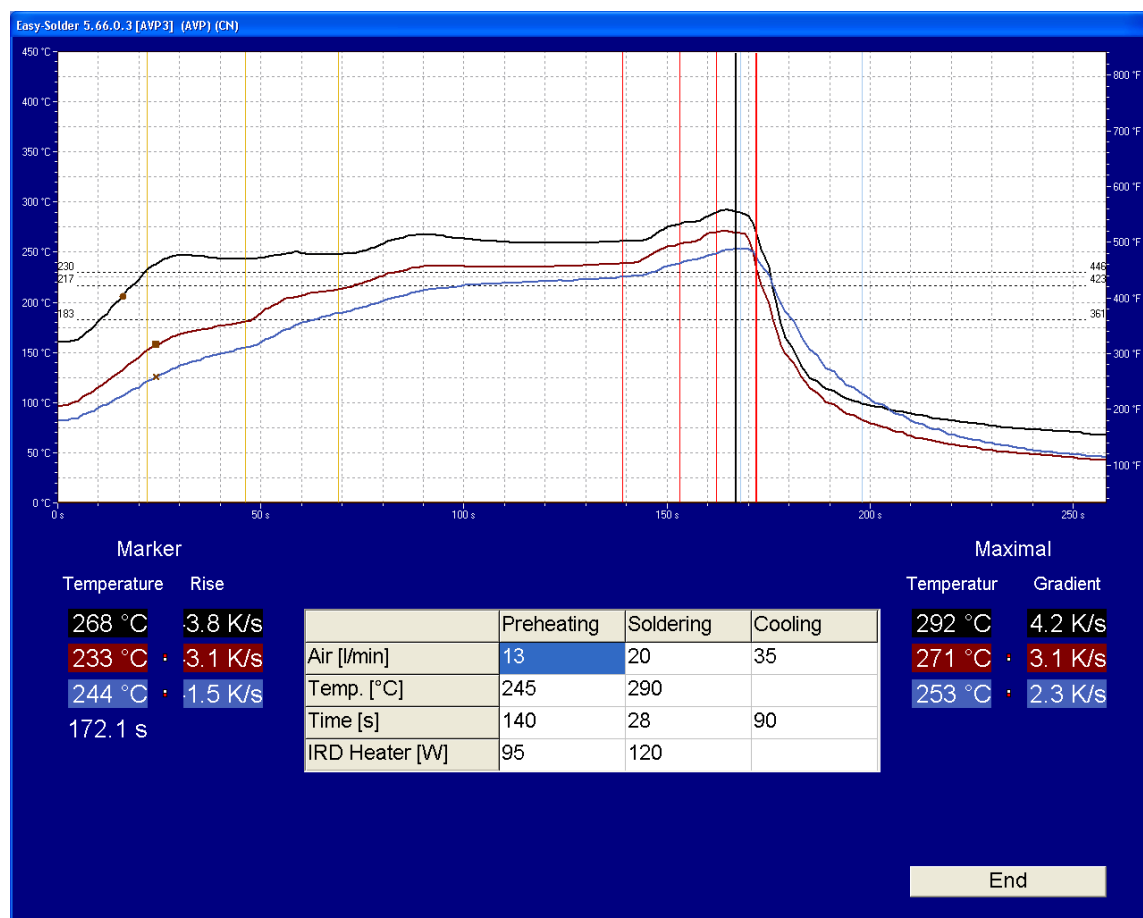
Obrázek 29: Referenční teplotní profil pro bezolovnaté pájení (převzato z [37])

Na začátku profilu je tzv. rampa, deska se poměrně rychle nahřívá na cca 150°C. Poté následuje předehřev do přibližně 200°C s nárůstem teploty asi 0,2-0,8 K/s, při kterém dochází k aktivaci tavidla. Následuje oblast přetavení s dobou trvání 40-90 s, při kterém dojde k nárůstu až na maximální hodnotu teploty, přičemž se doporučuje čas nad teplotou 250°C asi 5 s, aby nedošlo k nežádoucím defektům. Poté se deska chladí s poklesem maximálně 6 K/s.

U zařízení MARTIN Auto Vision Expert 09.5, na kterém byl experiment proveden, bohužel není možné přesné naprogramování teplotního profilu včetně gradientu teploty v jednotlivých úsecích. Je možné si zvolit průtok vzduchu, maximální teplotu, výkon spodního předehřevu a celkový čas částí „pre-heating“, „soldering“ a „cooling“. Zbytek křivky si dopočte zařízení samo. Volená teplota je navíc teplota vzduchu na konci trysky, teplotní profil je proto třeba odladit na pokusné desce

s připevněnými termočlánky. V mém případě byly termočlánky umístěny v prostoru mezi kuličkami a na povrchu pouzdra.

Výsledné teplotní profily, které byly použity v experimentu, jsou přiloženy na CD, na následujícím obrázku je profil standartní s maximální hodnotou 253°C (standartní profil) v místě styku kuliček s deskou (modrá křivka). Teplota vzduchu na konci trysky (černá křivka) je bezmála o 50°C vyšší, teplota na povrchu čipu byla maximálně 271°C (červená křivka). Poslední hodnota je důležitá kvůli teplotnímu namáhání čipu a neměla by přesáhnout cca 350°C, při které může dojít ke zničení čipu.



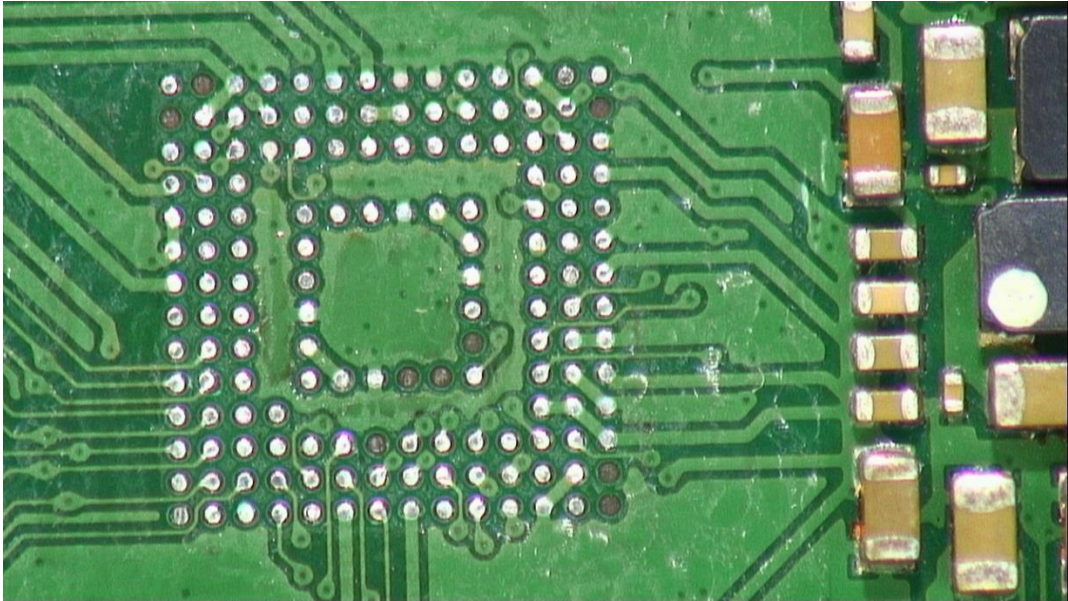
Obrázek 30: Výsledný teplotní profil – standartní

Maximální teploty („peaky“) ostatních profilů byly 239°C, 246°C, 255°C a 259°C.

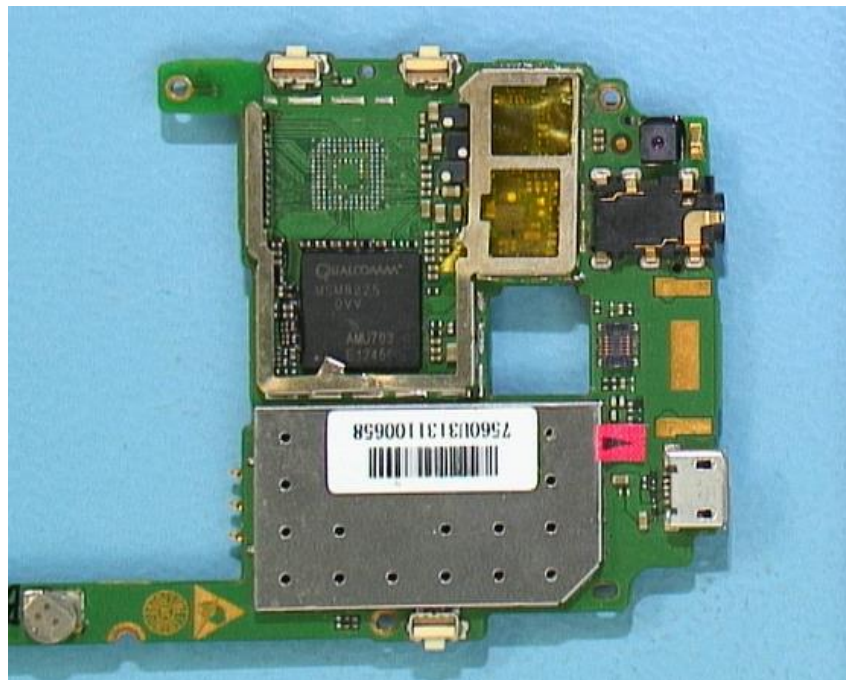
3.3 Pájené vzorky, tavidlo

Pro účely tohoto experimentu byly vyčleněny firmou Arvato zbytkové základní desky mobilního telefonu blíže nespecifikovaného výrobce a typu. Povrchová úprava odpovídá stavu po odpájení původního, vadného čipu (v tomto případě paměti) a

očištění – tedy zbytky cínu. V některých případech došlo při odpájení čipu k odtržení přípojovací/pájecí plošky na DPS. Při vyhodnocování experimentu je nutné brát tuto skutečnost také v úvahu. Příklad desky a detail přípojovacích plošek viz obrázky níže.



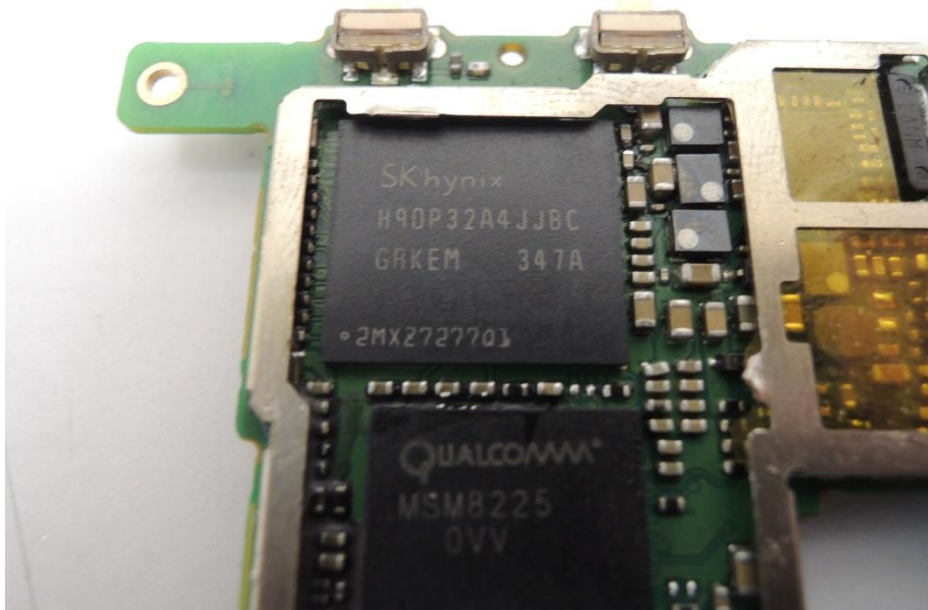
Obrázek 31: Detail přípojovacích plošek na základní desce telefonu



Obrázek 32: Použitá základní deska telefonu

Na tuto základní desku jsem pájel čip paměti od firmy SK hynix (flash paměť). Bohužel výrobce na svých stránkách neuvádí volně žádné přesnější informace.

Při pájení jsem nepoužil pájecí pastu nanesenou přes šablonu na připojovací plošky, ale pouze gelové tavidlo Multifix 450-01 určené právě pro opravárenské účely. Nanášeno bylo ručně, proto se zde objevuje další proměnný faktor v rámci experimentu a je nutné jej brát v úvahu při hodnocení výsledků.

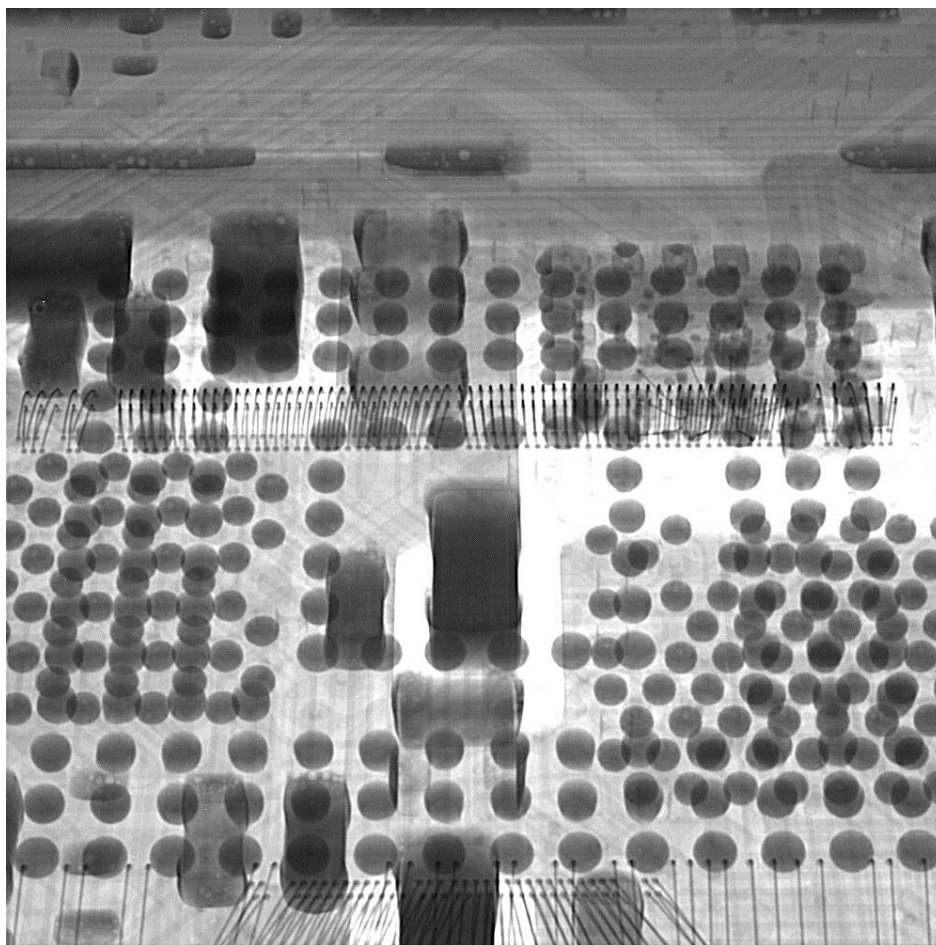


Obrázek 33: Zapájený čip

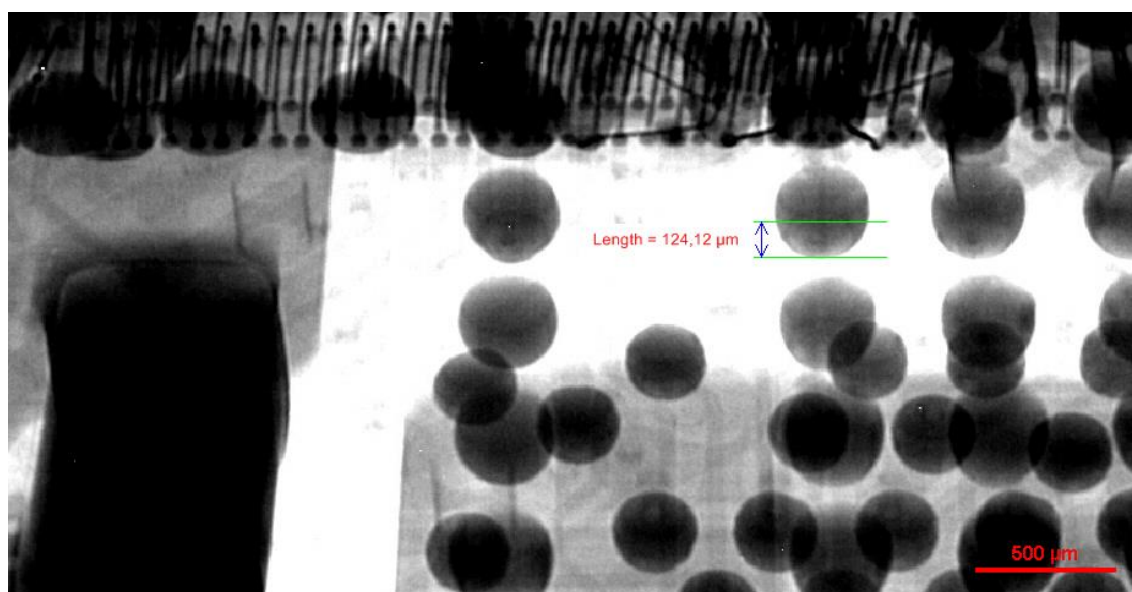
3.4 Diagnostika pomocí rentgenu

V rámci diagnostiky zapájených čipů byly pořízeny rentgenové snímky všech 15 desek. Každá deska byla sejmuta ze dvou úhlů pohledu (90° a 45°), v různých detailech i jako celek. Pro účely tohoto experimentu byl vybrán pohled pod 45° v místě, kde jsou dobře viditelné kuličky a je možné pomocí vhodného softwaru změřit vzdálenost pouzdra od desky a dále celkový pohled ze shora pod úhlem 90° pro detekci můstků.

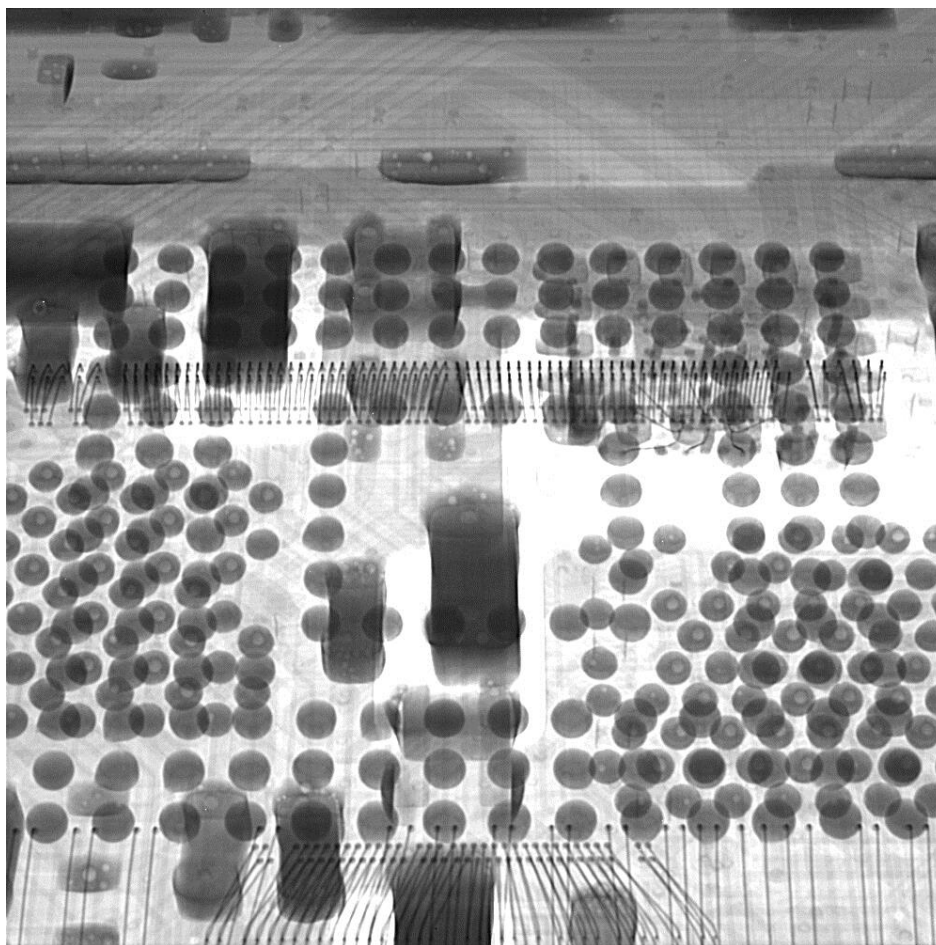
V první části diagnostiky jsem měřil vzdálenost pouzdra a desky, tedy pokles pouzdra po zapájení a jeho závislost na teplotním profilu, respektive maximální hodnotě dosažené teploty („peaku“). Měření proběhlo pomocí softwaru NIS Elements, kdy byl mírně upraven kontrast snímku pro zvýraznění obrysů. Na následujících obrázcích je příklad desky pájené profilem o maximální hodnotě teploty 239°C a 259°C (celkový a přibližný pohled s měřenou vzdáleností). Ostatní desky jsou v obrazové příloze na CD.



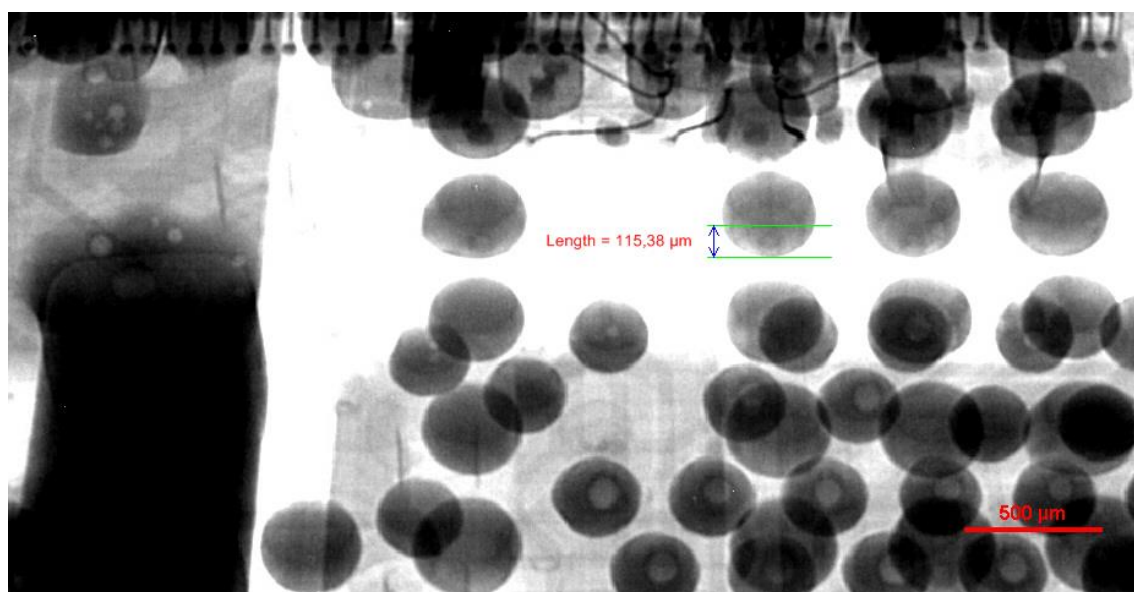
Obrázek 34: Rentgenový snímek pájené desky č. 3, úhel pohledu 45° - celkový pohled



Obrázek 35: Rentgenový snímek pájené desky č. 3, úhel pohledu 45° - přiblížený pohled + měření



Obrázek 36: Rentgenový snímek pájené desky č. 14, úhel pohledu 45° - celkový pohled



Obrázek 37: Rentgenový snímek pájené desky č. 14, úhel pohledu 45° - přibližný pohled + měření

V následující tabulce jsou naměřené údaje u všech 15 desek. T_{\max} vyjadřuje nejvyšší hodnotu teploty během daného teplotního profilu, d je vzdálenost deska-čip a d_{AV} průměrná vzdálenost pro jeden teplotní profil.

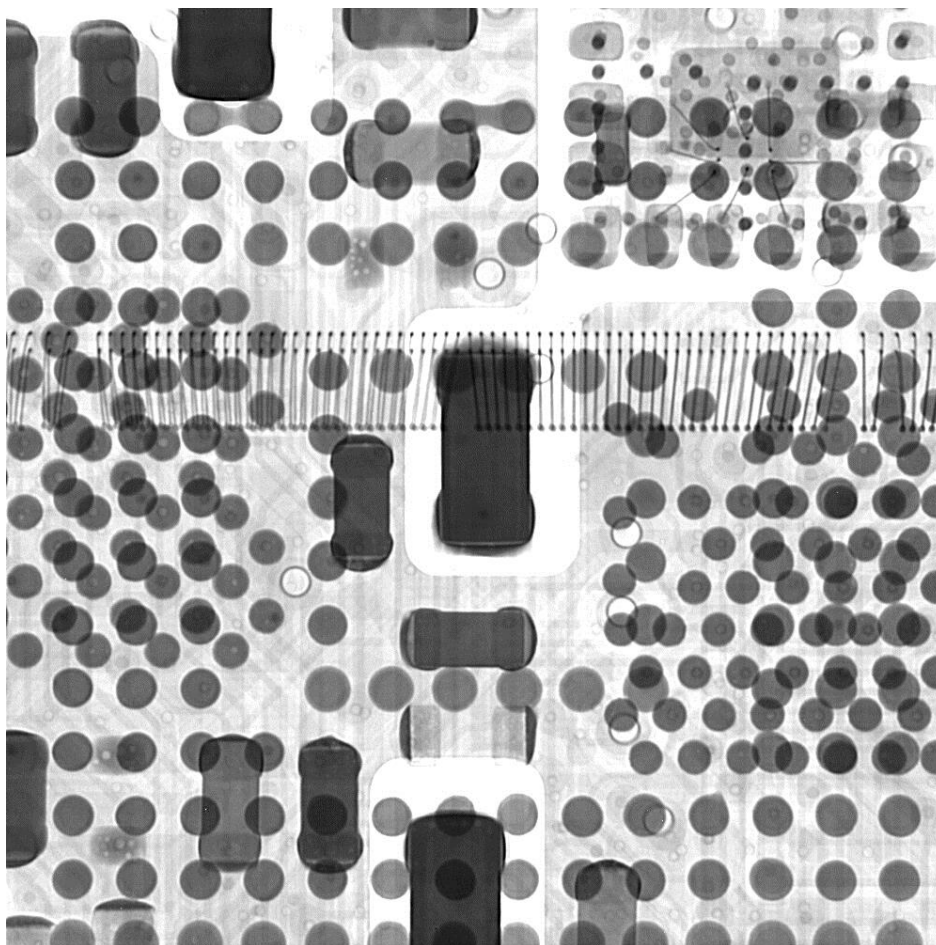
č.	T_{\max} [°C]	d [mm]	d_{AV} [mm]
1	239	0,118	0,12
2	239	0,121	
3	239	0,124	
4	246	0,118	0,12
5	246	0,114	
6	246	0,116	
7	253	0,110	0,11
8	253	0,101	
9	253	0,112	
10	255	0,105	0,11
11	255	0,112	
12	255	0,107	
13	259	0,134	0,12
14	259	0,115	
15	259	0,115	

Tabulka 3: Naměřené hodnoty poklesu pouzdra

Z naměřených hodnot mohou vyčíst, že výsledný pokles pouzdra je na teplotním profilu, respektive maximální dosažené hodnotě teploty, víceméně nezávislý. Odchylku, která vznikla mezi jednotlivými profily, mohou vysvětlit chybou měření – jak je vidět z rentgenových snímků, obrys kuličky byl i po zvýšení kontrastu ve většině případů málo zřetelný. K další chybě měření mohlo dojít v momentě kalibrace měření vzdálenosti. I proto byly hodnoty původně měřené na setiny mikrometru zaokrouhleny pouze na setiny milimetru.

To, že nedošlo k žádné významné odchylce mezi jednotlivými teplotními profily, lze vysvětlit fyzikálně. Povrchové napětí pájecích slitin je závislé na teplotě – čím vyšší teplota, tím nižší povrchové napětí pájecí slitiny. Během procesu pájení dojde tedy k poklesu, který bude odpovídat dané teplotě, při chlazení desky se však vrací do svého původního tvaru – takže ve výsledku by všechna pouzdra měla být stejně vzdálená od desky. Což víceméně s připočtením chyby měření odpovídá. Pokles pouzdra by byl tedy zřetelný pouze v případě, že bych pozoroval výšku mezi DPS a BGA čipem v průběhu pájecího procesu.

Ve druhé části diagnostiky jsem porovnával rentgenové snímky pořízené pod pozorovacím úhlem 90°. Zajímal mne hlavně počet vzniklých můstků (a jejich umístění), případně další možné defekty. Příklad rentgenového snímku je na dalším obrázku.



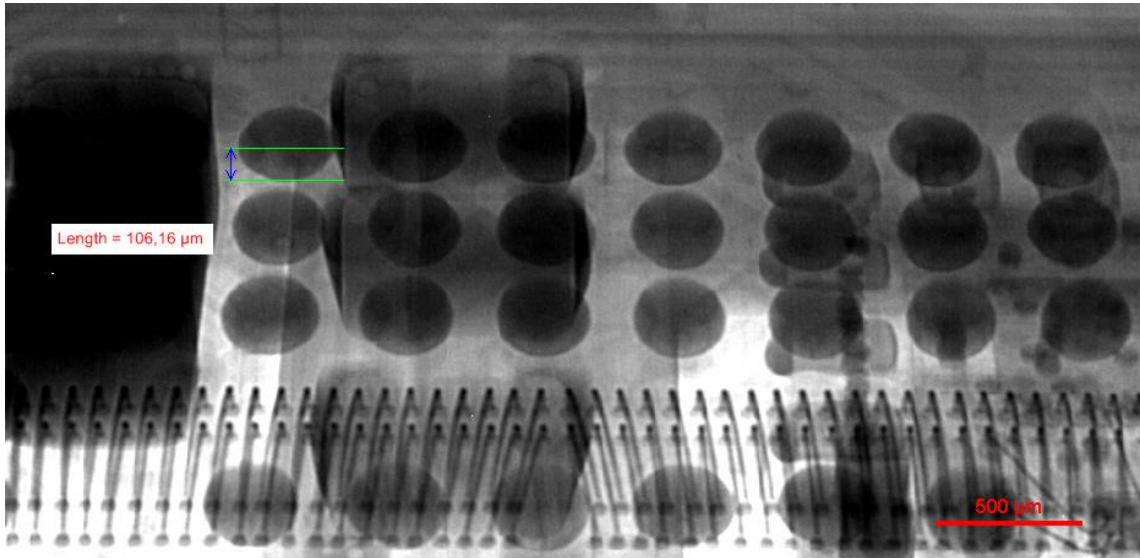
Obrázek 38: Rentgenový snímek pájené desky č. 15, úhel pohledu 90°

Můstky vznikaly prakticky v celé šíři měněných podmínek. Je nutné však vzít v úvahu i umístění těchto můstků – neboť většina lokací odpovídá místu, kde byla během odpájecího procesu odstraněna nepájivá maska na vodivé cestě mezi vývody, takže se pájka mohla volně roztéct. Další můstky (při standartním profilu) vznikly z důvodu chybného umístění pouzdra (spojeny byly kuličky krajní řady mimo plošky s kuličkami předchozí řady). Pouze při nejvyšší teplotě vznikl můstek v místě, kde způsobuje nežádoucí zkrat mezi vývody.

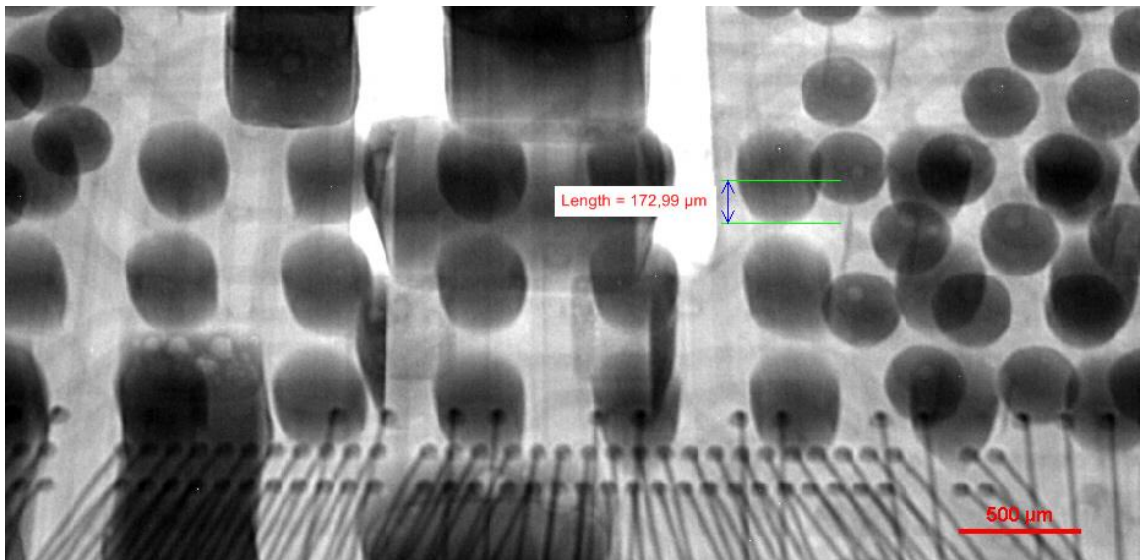
Rentgenové snímky také spolehlivě odhalily nejčastější chybu, která se při pájení vyskytla – špatně umístěné pouzdro. Přičemž špatné bylo jak osazení samotným automatickým osazovacím systémem zařízení Martin (cca polovina čipů), tak také ruční osazení. V čtyřech případech bylo pouzdro zapájené o řadu vedle, v pátém pak čip byl zapájen šikmo.

Při pečlivé analýze rentgenových snímků a na základě měření vzdálenosti jsem u desky č. 13 (nejvyšší teplotní profil) zjistil větší odchylku ve vzdálenosti od ostatních vzorků. Proto jsem proměřil kuličky pájky na opačných stranách desky. Odchylka byla až 0,07 mm, rozdíl byl vidět i opticky na tvaru pájky. Dospěl jsem k závěru, že zde

pravděpodobně došlo k warpage efektu (prohnutí mezi DPS a čipem) nebo jinému defektu, který způsobil nerovnoměrný pokles (respektive zdvih) pouzdra. Lepší důkaz by podala diagnostika pomocí výbrusu.



Obrázek 39: Rentgenový snímek pájené desky č. 13, úhel pohledu 45°, nejmenší vzdálenost kuliček



Obrázek 40: Rentgenový snímek pájené desky č. 13, úhel pohledu 45°, největší vzdálenost kuliček

3.5 Zhodnocení výsledků

Na základě všech zjištěných dat mohu konstatovat, že největší vliv na kvalitu pájení mělo v tomto experimentu špatné umístění pouzdra. Na teplotním profilu nezávisí výsledný pokles pouzdra, neboť povrchové napětí pájecí slitiny je závislé na teplotě. S rostoucí hodnotou maximální teploty ale roste pravděpodobnost jiných defektů, jako jsou můstky mezi kontakty nebo nalezený vzniklý warpage efekt. Je proto vhodné pájet spíše při nižších teplotách (okolo 240°C jako T_{\max}) pro prevenci vůči defektům a také pro ušetření části energie potřebné pro přetavení kuliček.

Během experimentu nebyly pozorovány jiné defekty detekovatelné rentgenovými snímky (například dutinky). Vzhledem k tomu, že byla provedena pouze tato analýza, není vyloučen vznik jiných defektů. Bohužel vzhledem k topologii pájeného pouzdra nebylo možné udělat optickou kontrolu dostupnými zařízeními (což by bylo vhodné pro pozorování případného warpage efektu). Další možností, je vytvoření výbrusů, které by mohly objevit další možné defekty (delaminaci pájecích plošek, přerušené spoje apod.).

ZÁVĚR

Pájení v elektrotechnice a elektronice je stále téma, které je aktuální nejen z důvodu přechodu na bezolovnaté pájení. Probíhá rozvoj nových pájecích slitin, zmenšování roztečí vývodů (a tedy miniaturizace). Díky těmto a dalším faktorům se setkáváme s novými typy vad, které vznikají v souvislosti s pájením. Zvláště to platí u pouzder typu BGA, kde je navíc diagnostika pájených spojů obtížná a nákladná.

Jak bylo ukázáno v experimentu, pájení BGA pouzder je se stále se zmenšujícími se roztečemi mezi jednotlivými vývody obtížnější, a to zejména z důvodu nepřesného umístění pouzdra, jehož odchylka snadno přesáhne mez, která je akceptovatelná. Dále se ukázalo, že při vyšší teplotě je větší pravděpodobnost vad – např. warpage efekt, vznik můstků. Naopak u nižších teplot nebyly pozorovány defekty související právě s teplotou přetavení. Podstatnou měrou se na výsledku podílí i další faktory, které zde nebyly uvažovány – materiál a množství tavidla, povrchová úprava desek plošných spojů, klimatické podmínky v místnosti (okolní teplota, vlhkost) a další.

Proto je v rámci zlepšení produkce a zmenšení rizika nesprávně zapájených čipů vhodné používat spíše nižší hodnoty maximálních teplot, čímž se také menší měrou dá ušetřit za energii potřebnou k přetavení. Významnější krok je pořízení nového zařízení s lepším osazovacím automatem, které je již po roce používání schopno ušetřit značné částky.

Právě zvyšování nákladů spojených se zmetkovitostí produkce společně s dalšími ekonomickými dopady na firmy je důvod, aby podobné experimenty a obecně risk analýzy problémů ve výrobě byly uskutečňovány.

Vzhledem k současné rozšířenosti pouzder BGA bych se rád pájení právě těchto pouzder věnoval i v dalším studiu. Je zde možné zkoumat pokles pouzdra přímo při pájecím procesu a jeho závislost na teplotě, chování pouzdra v delším časovém horizontu z pohledu spolehlivosti s ohledem na použitý teplotní profil při zapájení.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Kovohutě Příbram: *Katalog pájek* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.kovopb.cz/divize-produkty/mekke-pajky/>
- [2] Ing. Tomáš Cetl, Ing. Václav Papež, CSc.: *Konstrukce a realizace elektronických obvodů*, 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002
- [3] *Montáž pouzder BGA* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/cv_bga.pdf
- [4] *Překuličkování BGA* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.smt-technologie.cz/smt-technologie/reballing-prekulickovani-bga/>
- [5] *BGA – pouzdra s kulovými vývody* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pouzdra-smd/bga-pouzdra-s-kulovymi-vyvody/>
- [6] Martin Kubec: *Pájení pouzder BGA*. Plzeň 2012, Bakalářská práce, ZČU v Plzni. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/4738/BP%20Martin%20Kubec.pdf>
- [8] *Popis BGA* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: http://www.technicest.com/popis_bga.php
- [9] SZENDIUCH, I.: *Mikroelektronika a technologie součástek* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/MMTE_P.pdf
- [10] Prof. Ing. Vladislav Musil, CSc., Ing. Milan Recman, CSc., Ing. Roman Prokop, Ph.D.: *Diagnostika a testování elektronických systémů* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/metmel/studijni-pomucky/METMEL_10_S_BDTS_Diagnostika_a_testovani_elektronickych_systemu.pdf
- [11] *Optická kontrola BGA* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/vyber-kontrolnich-systemu/opticka-kontrola-bga-0/>
- [12] *RoHS* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.rohs.cz/>
- [13] doc. Ing. Pavel Mach, CSc.: *Vodivé lepení v elektrotechnice* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: http://ocw.cvut.cz/moodle/file.php/250/Elektricky_vodive_lepeni_v_elektrotechnice.pdf
- [14] doc. Ing. Pavel Mach, CSc.: *Kontaktování čipů* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: http://ocw.cvut.cz/moodle/file.php/250/Kontaktovani_cipu.pdf
- [15] doc. Ing. Pavel Mach, CSc.: *SOP a SOIC* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: http://ocw.cvut.cz/moodle/file.php/289/SOP_a_SOIC.pdf
- [16] doc. Ing. Pavel Mach, CSc.: *Quad a QFP* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: http://ocw.cvut.cz/moodle/file.php/289/Quad_a_QFP.pdf
- [17] doc. Ing. Pavel Mach, CSc.: *LCC* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://ocw.cvut.cz/moodle/file.php/289/LCC.pdf>

- [18] doc. Ing. Pavel Mach, CSc.: *BGA* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://ocw.cvut.cz/moodle/file.php/289/BGA.pdf>
- [19] doc. Ing. Pavel Mach, CSc.: *CSP* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://ocw.cvut.cz/moodle/file.php/289/CSP.pdf>
- [20] Leon Mierżwinski: *OPTIMALIZACE TEPLITNÍCH PROFILŮ NA ZAŘÍZENÍ IR-400*. Brno 2013, Bakalářská práce, VUT v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=69346
- [21] Ing. Jan Bartoška, Ph.D.: *Risk Project Management* [prezentace ve formátu pdf], KSI PEF ČZU v Praze, 2014
- [22] *Mentální mapy* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/mentalni-mapy>
- [23] *MB86R01PB-GSE1* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.digikey.com/product-detail/en/MB86R01PB-GSE1/865-1110-ND/2175359>
- [24] Lukáš Nosil: *Regulace pece pro pájení SMD*. Pardubice 2013, Bakalářská práce, Univerzita Pardubice. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/53569/2/NosilL_RegulacePece_PR_2013.pdf
- [25] *Moderní technologie elektronických obvodů a systémů, Laboratorní cvičení – Pájení* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/proj/2011/LN05_Lab3_P%C3%A1jen%C3%AD_trh%C3%A1n%C3%AD.doc
- [26] *Pájení v parách* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-v-parach/pajeni-v-parach/>
- [27] *Fotogalerie – Optická kontrola BGA* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/fotogalerie/180/>
- [28] *Strojní pájení vlnou* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://foxeightyfive.org/downloads/download.php?fname=./VUT/B-MEL/5.%20semester/Bpsm/prednasky/8.pdf>
- [29] *The Black Pad Effect* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: http://www.epp-europe.eu/news/-/article/32536727/37122861/The-black-pad-effect/art_co_INSTANCE_0000/maximized/
- [30] *Head in Pillow – BGA deffects* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: http://www.aimsolder.com/sites/default/files/head-in-pillow_bga_defects.pdf
- [31] *Testing and Prevention of Head-In-Pillow* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.datest.com/resources-reallyannoyingproblems-headinpillowtestandprevention.php>
- [32] *Prototypové pracoviště* [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://technology.feld.cvut.cz:8080/xwiki/bin/view/K13113/labrework?xpage=print&language=cs>

- [33] Česká technická norma ČSN EN 61191-6 (náhled) [online], [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html_nahledy/35/87079/87079_nahled.htm
- [34] Siu Lung Ng: *Effect of thermal and mechanical factors on single and multi-chip BGA packages* [online], [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.worldcat.org/title/effect-of-thermal-and-mechanical-factors-on-single-and-multi-chip-bga-packages/oclc/304522737/viewport>
- [35] *Examples of Problems in BGA Mounting* [online], [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: http://www.renesas.eu/products/package/manual/5/5_1/5_1_4/index.jsp
- [36] *Important Points for PoP Techniques* [online], [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://blog-leanstream.blogspot.cz/2010/11/4important-points-for-pop-techniques.html>
- [37] *Lead-Free IR Reflow Conditions* [online], [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.token.com.tw/smd-power-inductors/power-inductors-me.htm>
- [38] Martin: *Auto Vision Expert 09.5 (information)* [online], [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: http://www.pcbtech.it/pdf/Martin_AVP_09.5-E.pdf
- [39] *Martin SMT (firma)* [online], [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.abetec.cz/eshop/producer/martin-smt/>
- [40] Texas Instrument: *TPA6203A1 (1.25-W Mono, Fully Differential, Class-AB Audio Amplifier)* [online], [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/TPA6203A1>
- [41] Texas Instrument: *TMS320C6472 (Fixed-Point Digital Signal Processor)* [online], [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/TMS320C6472/description>
- [42] *Ishikawův diagram* [online], [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/ishikawuv-diagram>
- [43] *Pájení* [online], [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1j%C3%A9n%C3%AD>
- [44] Bc. Michal Straka: *Pájení laserovou diodou*. Brno 2012, Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=57379
- [45] *Příklad obvodu s BGA pouzdem* [online], [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.technicest.com/priklad_bga.php

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: BGA pouzdro 1 (převzato z [5])	13
Obrázek 2: BGA pouzdro 2 (převzato z [23])	13
Obrázek 3: Příklad BGA pouzdra (převzato z [45])	16
Obrázek 4: Znázornění principu procesu pájení vlnou (převzato z [25])	17
Obrázek 5: Princip pájení v parách (převzato z [26])	18
Obrázek 6: Lineární teplotní profil (převzato z [25])	19
Obrázek 7: Sedlový teplotní profil (převzato z [25])	20
Obrázek 8: Teplotní profil pájení vlnou (převzato z [28])	20
Obrázek 9: Efekt dvojího poklesu (převzato z [3])	21
Obrázek 10: Efekt autokorekce (převzato z [3])	22
Obrázek 11: Defekt BGA – můstek (převzato z [27])	23
Obrázek 12: Defekt BGA – black pad efekt (detail) (převzato z [29])	23
Obrázek 13: Defekt BGA – black pad efekt (přerušené spojení) (převzato z [29])	24
Obrázek 14: Defekt BGA – Warpage efekt (převzato z [36])	24
Obrázek 15: Defekt BGA – Head in Pillow efekt (převzato z [31])	25
Obrázek 16: Optická kontrola BGA pouzdra pomocí systému Flexia (převzato z [27])	27
Obrázek 17: Opravárenská stanice BIP 7000 (převzato z [32])	28
Obrázek 18: Ishikawův diagram (převzato z [42])	31
Obrázek 19: Myšlenkové mapy (převzato z [22])	31
Obrázek 20: Mapa rizik	32
Obrázek 21: Matice rizik	33
Obrázek 22: Vymodelovaný diagram rybí kosti	34
Obrázek 23: Nástavec horkovzdušné trysky	34
Obrázek 24: Graf nákladů spojených s rizikem pájení čipů	36
Obrázek 25: Graf úspor po pořízení nového zařízení	36
Obrázek 26: Graf nákladů spojených s rizikem pájení čipů (časová závislost)	37
Obrázek 27: Graf úspor po pořízení nového zařízení (časová závislost)	37
Obrázek 28: Zařízení MARTIN Auto Vision Expert 09.5	39
Obrázek 29: Referenční teplotní profil pro bezolovnaté pájení (převzato z [37])	40
Obrázek 30: Výsledný teplotní profil – standartní	41
Obrázek 31: Detail připojovacích plošek na základní desce telefonu	42
Obrázek 32: Použitá základní deska telefonu	42
Obrázek 33: Zapájený čip	43
Obrázek 34: Rentgenový snímek pájené desky č. 3, úhel pohledu 45° - celkový pohled	44
Obrázek 35: Rentgenový snímek pájené desky č. 3, úhel pohledu 45° - přiblížený pohled + měření	44
Obrázek 36: Rentgenový snímek pájené desky č. 14, úhel pohledu 45° - celkový pohled	45
Obrázek 37: Rentgenový snímek pájené desky č. 14, úhel pohledu 45° - přiblížený pohled + měření	45
Obrázek 38: Rentgenový snímek pájené desky č. 15, úhel pohledu 90°	47
Obrázek 39: Rentgenový snímek pájené desky č. 13, úhel pohledu 45°, nejmenší vzdálenost kuliček	48

*Obrázek 40: Rentgenový snímek pájené desky č. 13, úhel pohledu 45°, největší vzdálenost
kuliček 48*

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Srovnání BGA a QFP pouzder (převzato z [8])</i>	14
<i>Tabulka 2: Očekávaná hodnota rizika při pájení čipů.....</i>	35
<i>Tabulka 3: Naměřené hodnoty poklesu pouzdra.....</i>	46