

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Pájecí pasty pro bezolovnaté pájení a jejich vliv na
spolehlivost**

Jakub Stuna

2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub STUNA**

Osobní číslo: **E13N0028P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Pájecí pasty pro bezolovnaté pájení a jejich vliv na spolehlivost**

Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou pájecích past a způsobů jejich nanášení.
2. Zmapujte chyby, které mohou být způsobeny pájecími pastami, a zjistěte jejich příčiny a následky.
3. Pomocí DOE (Design of experiment) navrhňte a realizujte test vlivu typu pájecí pasty, způsobu skladování a dalších parametrů na kvalitu tisku pájecí pasty a následně vytvořeného pájeného spoje.
4. Proveďte zhodnocení výsledků a stanovte doporučení pro využití v praxi.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. Klein Wassink, R. J. Soldering in Electronics
2. Hwang, J. Environment-Friendly Electronics: Lead-free Technology
3. Internet
4. Bude dále specifikována zadavatelem

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

✓ Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Cílem předkládané diplomové práce je otestování teplotně stabilních pájecích past, které není potřeba skladovat při snížené teplotě, ale lze je po určitou dobu uskladnit při teplotě „pokojové“ (22 °C ~ 25 °C). První část této práce tvoří teoretické informace o pájecí pastě, způsobech jejího nanášení a také o teplotních profilech využívaných pro proces přetavení pájecí pasty. V následujících dvou částech jsou popsány vady vyskytující se po tisku pájecí pasty a vady, které se projeví až po zapájení v přetavovací peci. Další část této práce se věnuje experimentům, které byly v rámci testování provedeny. Byla zkoumána náchylnost k chybám jednotlivých pájecích past v průběhu tisku na DPS v závislosti na celkové době, kterou pasta strávila na šabloně a na délce pauzy před tiskem pasty. Dále byl podle metody Design of Experiment navržen experiment, jehož vstupní faktory byly: pájecí pasta, pauza před tiskem pasty a použitý teplotní profil v SMT peci. Při tomto experimentu byly desky plošných spojů osazeny SMD součástkami, které byly následně zapájeny. Následovalo zkoumání výskytu chyb popsaných v teoretické části práce a porovnání mechanické pevnosti pájených spojů. Závěrečné části se pak věnují vyhodnocení získaných dat a doporučení pro využití v praxi.

Klíčová slova

Pájecí pasta, DPS, SMT, teplotní profil, Design of Experiment, šablonový tisk, SMD, pevnost pájeného spoje, Loctite, KOKI, Indium, AIM.

Abstract

The focus of this diploma thesis is on testing of temperature stable solder pastes which don't have to be stored in low temperatures but they can be stored in average room temperatures (22 °C ~ 25 °C) for a certain time. In the first part of the thesis there is theoretical information about solder paste, ways of its deposition and about the temperature profiles used for reflow process. In the following two parts there is a description of faults which occur after the printing of the solder paste and also the faults which are seen after the reflow in a reflow oven. Another part of this work deals with the experiments which were carried out during the testing. The author of the thesis examines how likely individual pastes are to fail during the printing course on PCB depending on the total time which the paste stayed on stencil and on the pause duration before printing of the paste. Next an experiment according to the Design of Experiment was suggested. Its entry factors were: solder paste, the pause before the printing of the paste and the temperature profile used in the oven. During this experiment there were surface mount devices placed on the PCB and then reflowed. The analysis of the failure occurrence (described in the theoretical part) and the comparison of the mechanic strength of the solder joints follow. The last parts of the work focus on the evaluation of the findings and any recommendations for use in real life practice.

Key words

Solder paste, PCB, SMT, temperature profile, Design of Experiment, stencil printing, SMD, mechanical strength of solder joint, Loctite, KOKI, Indium, AIM.

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 9.5.2016

Jakub Stuna

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Františku Steinerovi, Ph.D. za poskytnuté cenné rady a odbornou pomoc. Poděkování patří i firmě Integrated Micro-Electronics Czech Republic, za možnost využít její stroje a materiál pro experimentální část této práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 TEORIE PÁJECÍCH PAST	12
1.1 SLOŽENÍ PÁJECÍ PASTY	12
1.1.1 Pájecí zrna	12
1.1.2 Tavidlo pájecí pasty	14
1.2 NANÁŠENÍ PÁJECÍ PASTY NA DPS	17
1.2.1 Nanášení pájecí pasty disperzerem	18
1.2.2 Sítotisk	19
1.3 ŠABLONOVÝ TISK	20
1.3.1 Tisková šablona	21
1.3.2 Stěrky	23
1.3.3 Čištění šablony	25
1.3.4 Podpora panelu DPS při tisku pájecí pasty	25
1.4 TEPLOTNÍ PROFIL	27
1.4.1 Sedlový profil – RSS	27
1.4.2 Profil s lineárním nárůstem teploty do maxima – RTS	29
1.4.3 Profil LSP	30
2 CHYBY VZNIKAJÍCÍ BĚHEM TISKU PÁJECÍ PASTY	31
2.1 MŮSTKY	31
2.2 NEDOSTATEČNÉ MNOŽSTVÍ PÁJECÍ PASTY	32
2.3 POZICE NATISKNUTÉ PÁJECÍ PASTY	32
2.4 ŠPATNÝ TVAR NATISKNUTÉ PÁJECÍ PASTY	33
2.5 NADMÍRA NATISKNUTÉ PÁJECÍ PASTY	34
2.6 STUDENÝ SESUV PÁJECÍ PASTY	34
3 CHYBY VZNIKAJÍCÍ BĚHEM PROCESU PŘETAVENÍ	35
3.1 VOIDY	35
3.1.2 Planární mikrovoidy	36
3.1.3 Trhlinové voidy (Shrinkage voidy)	36
3.1.4 Micro-Via voidy	36
3.1.5 Kirkendallové voidy	37
3.1.6 Pinhole voidy	37
3.2 NÁHROBKY	37
3.2.1 Rozdílné síly působící na vývody součástky	37
3.2.2 Výpary z tavidla pájecí pasty	39
3.2.3 Pohyb součástky	40
3.3 KULIČKY PÁJKY	40
3.3.1 Mikrokuličky pájky	41
3.3.2 Solder bead	42
3.4 SOLDER GRAPING	45
3.5 ZKRATY	46
3.6 HORKÝ SESUV PÁJECÍ PASTY	46
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE	47
4.2 TESTOVACÍ DPS	49
4.3 POUŽITÉ STROJE A JEJICH NASTAVENÍ	50
4.3.1 DEK Horizon 03ix	50
4.3.2 SPI Koh Young KY8030-2	50
4.3.3 Osazovací stroje Yamaha YS12 a YS24	51

4.3.4	Přetavovací pec Heller 1809 MKIII	51
4.4	NÁVRH PRVNÍHO EXPERIMENTU	53
4.5	VYHODNOCENÍ PRVNÍHO EXPERIMENTU	53
4.6	NÁVRH DRUHÉHO EXPERIMENTU	54
4.7	VYHODNOCENÍ DRUHÉHO EXPERIMENTU	55
5	DOPORUČENÍ PRO VYUŽITÍ V PRAXI.....	65
	ZÁVĚR	67
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	68

Seznam symbolů a zkratek

DPS.....	Deska plošných spojů
FR-4.....	Flame Retardant – epoxidová pryskyřice vyztužená skelnými vlákny
IMI CZ.....	Integrated Micro-Electronics Czech Republic s.r.o.
QFN	Quad Flat no Lead – pouzdro s kontaktními ploškami na spodní straně
RSS.....	Ramp Soak Spike Profile – sedlový profil
RTS.....	Ramp to Spike Profile – profil s lineárním nárůstem teploty do maxima
SAC 305 ...	Slitina tvořená: Sn = 96,5 %, Ag = 3 % a Cu = 0.5 %
SIR.....	Surface Insulation Resistance – povrchový izolační odpor
SMD	Surface Mount Device – součástky pro povrchovou montáž
SMT.....	Surface Mount Technology – technologie povrchové montáže
SOT	Small Outline Transistor
SPI.....	Solder Paste Inspection – Inspekce pájecí pasty
TAL	Time Above Liquidus – čas nad likvidem
TSOP	Thin Small Outline Package

Úvod

Pájecí pasty prošly od počátků technologie SMT velkým vývojem. Na přelomu tisíciletí se opouští od olovnatých pájecích past z důvodu ochrany životního prostředí a zdraví člověka a majoritně se začínají využívat bezolovnaté pájecí pasty. Kromě toho si výrobci pájecích past museli poradit se stále se zmenšujícími pouzdry součástek. Pájecí pasta používaná v 80. letech by v dnešní praxi jen těžko našla uplatnění.

Současným trendem na poli pájecích past je výroba tzv. teplotně stabilních pájecích past. Tento typ past by mělo být možné skladovat po relativně dlouhou dobu při poměrně vysokých teplotách ($> 22\text{ }^{\circ}\text{C}$). Tím odpadá nutnost skladovat pájecí pasty v chladničce při snížené teplotě. To může v první řadě ve velké míře usnadnit transport pasty od dodavatele k zákazníkovi a tím snížit náklady na dopravu. Výrobní podnik zabývající se osazováním desek plošných spojů by měl s teplotně stabilními pastami ulehčené řízení skladových zásob. Dalším výrazným benefitem těchto past je, že před jejich použitím odpadá nutnost temperovat je. Tím je myšleno zahřátí pasty na teplotu okolí. Oproti konvenčním pastám, jež je nutné skladovat při snížené teplotě, by teoreticky měly teplotně stabilní pasty prokazovat lepší tiskové vlastnosti při dlouhé době strávené na šabloně v průběhu tisku pasty na DPS. Lepší výsledky by mohly teplotně stabilní pájecí pasty prokázat také v menší generaci mikrokuliček pájky v okolí pájených spojů, protože hlavním důvodem vzniku tohoto defektu je oxidace kovové části pájecí pasty. Teplotně stabilní pájecí pasty by měly být vůči oxidaci více odolné než konvenční typ past.

Cílem této diplomové práce je teplotně stabilní pájecí pasty otestovat a výsledky porovnat se zástupcem konvenčních pájecích past. Zadání diplomové práce vychází z požadavku firmy Integrated Micro-Electronics Czech Republic s.r.o., pro kterou budou výsledky této práce určující ohledně využití teplotně stabilní pájecí pasty v běžné výrobě.

Tato práce podává teoretické informace o pájecích pastách a defektech, které se v SMT technologii objevují. V další části se diplomová práce věnuje provedenému experimentu a jeho vyhodnocení.

1 Teorie pájecích past

1.1 Složení pájecí pasty

Pájecí pasta se skládá ze dvou složek – z pájky (pájecích zrn) a z tavidla. Množství kovové složky v pájecí pastě se obecně pohybuje od 80 % do 95 % objemu pasty. Velikost zastoupení pájky má významný vliv na viskozitu a také na tloušťku pájeného spoje po procesu přetavení. [1, 2]

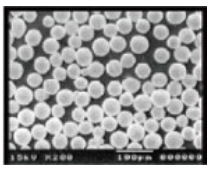
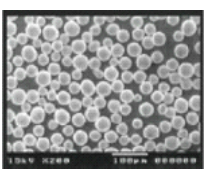
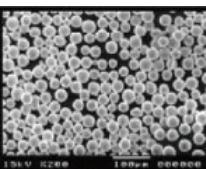
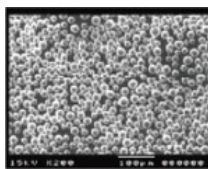
1.1.1 Pájecí zrna

Pájecí zrna jsou velmi malé částice kulovitěho tvaru vyrobené z různých slitin. Nejčastěji se jedná o slitinu cínu, stříbra a mědi. Do roku 2006 se nejvíce využívaly pasty obsahující slitiny cínu, olova a případně stříbra. Jednalo se o tzv. olovnaté pájecí pasty. V současné době se tyto pasty využívají v minimální míře. [1, 2]

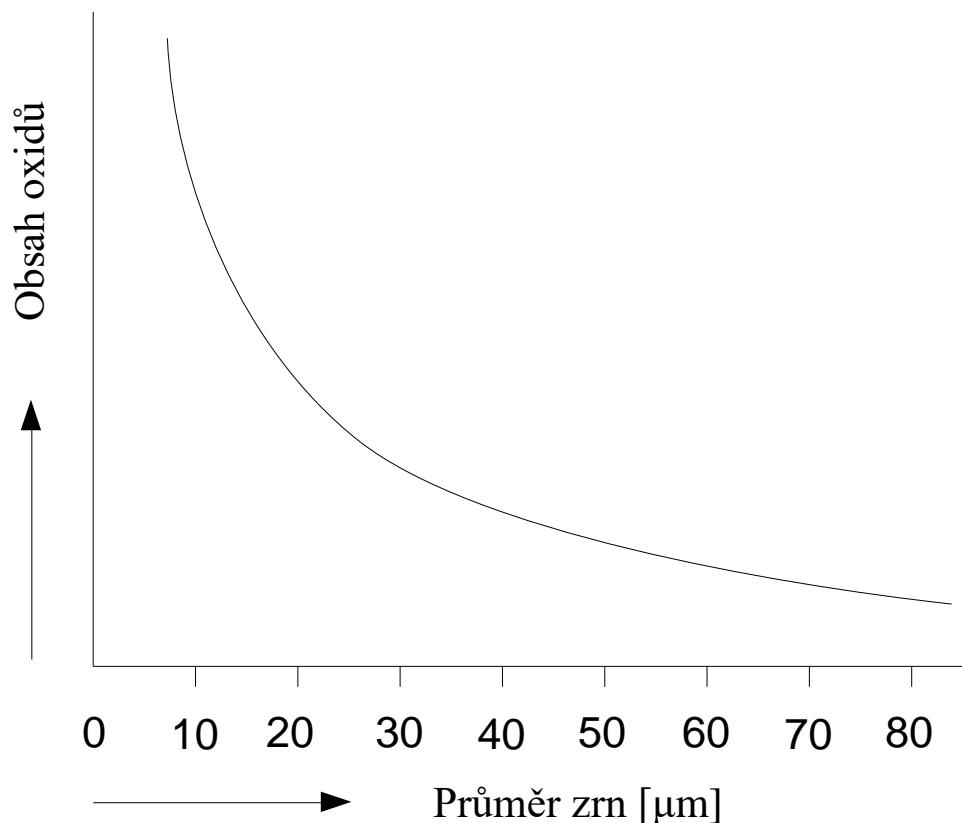
Velikost pájecích zrn

Pochopitelným trendem poslední doby je neustálé zvyšování hustoty osazovaných součástek na DPS. Tím pádem dochází ke zmenšování součástek, s čímž jsou spojené jemnější rozteče jejich vývodů. Již není raritou narazit na součástku s roztečí 0,4 mm. Z výše napsaného plyne potřeba zmenšování průměru zrn s co nejmenší odchylkou. [2]

Tab 1.1 Rozdělení pájecích past dle průměru zrn [1]

Typ a rozpětí průměru pájecích zrn	Typ 2 0,045 - 0,075 mm	Typ 3 0,020 - 0,045 mm	Typ 4 0,020 - 0,038 mm	Typ 5 0,010 - 0,025 mm
Pájecí slitina SAC 305				

V tabulce *Tab 1.1* je naznačeno srovnání jednotlivých typů pájecích past podle velikosti pájecích zrn. Pájecí pasty typu 2 byly hojně používány v 90. letech minulého století a jsou stále nasazovány pro aplikace s komponenty, které mají rozteč 0,76 mm a větší. V dnešní době se nejvíce používají pasty typu 3 a 4. Pro extrémně jemné rozteče je nutné použít pastu typu 5 nebo případně pastu s menšími zrny. [2, 3]



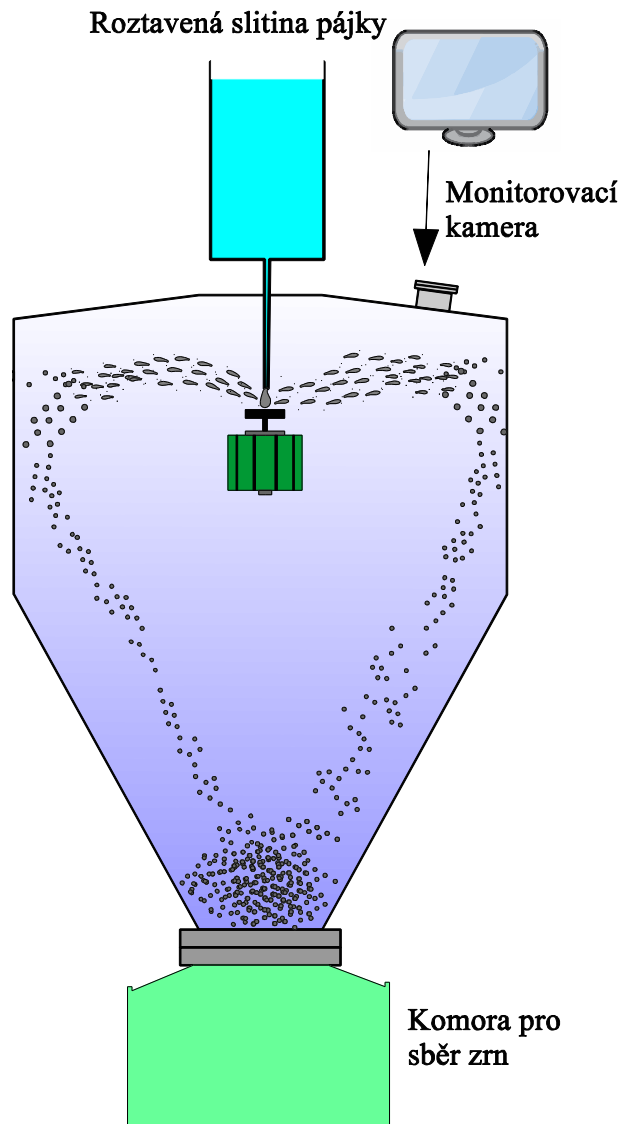
Obr. 1.1 Závislost podílu oxidů na průměru zrn [2]

Obsah oxidů v pájecí pastě by měl být co nejnižší, protože vysoký obsah oxidu v pájecí pastě nepříznivě ovlivňuje povrchové napětí a smáčivost roztavené pájky. Z *Obr 1.1* vyplývá, že čím jsou zrna pasty menší, tím vyšší je podíl oxidů. Tato skutečnost by měla být brána v potaz při výběru pasty pro danou aplikaci. [2]

Výroba pájecích zrn

Zrna pájecí pasty jsou vyráběna různými druhy procesu atomizace. Pro tento proces lze využít například zařízení se vzduchovou tryskou, centrifugou nebo rotujícím vřetenem. Poslední zmíněný typ zařízení pro atomizaci používá kupříkladu firma KOKI při výrobě svých pájecích past. Princip výroby zrn je naznačen na *Obr 1.2*. Komora pro výrobu zrn je přibližně 5 m vysoká a má průměr zhruba 3 m. Celý objem komory je vyplněn dusíkem a velmi malým podílem kyslíku z důvodu zamezení oxidace. Proces atomizace začíná roztavením ingotu slitiny pájky. Poté tento materiál odkapává na velmi rychle rotující vřeteno. V okamžiku dopadu se roztavená pájka rozstříkne směrem ke stěně komory a než na ni dopadne, získá kulovitý tvar a ztvrdne. V této části procesu se získávají zrna o průměru 1 μm až 100 μm. Velikost a tvar zrn ovlivňuje rychlost vřetena a rychlost dopadu roztaveného materiálu na vřeteno. Následujícím procesem je třídění zrn dle velikosti. K tomu se používá

dusíkový fukar, jehož proud plynu vyseparuje zrna lehčí a tím pádem menší, než jaká jsou požadována. Na závěr jsou zbylá zrna proseta skrz síto, kterým propadnou jen zrna požadované velikosti. [4]



Obr. 1.2 Princip výroby zrn pájecí pasty [4]

1.1.2 Tavidlo pájecí pasty

Druhou složkou pájecí pasty je tavidlo, které je zde za stejným účelem jako u procesu pájení vlnou – odstranit oxidy během pájecího procesu. Vezmeme-li v úvahu, že se pájecí pasty liší v podstatě pouze použitým tavidlem, jsou jeho vlastnosti klíčové pro výslednou kvalitu pájeného spoje. Kromě toho použité tavidlo určuje, jak lze s pájecí pastou zacházet. Tím je například myšleno, při jaké teplotě má být pasta uskladněna, nastavení parametrů pro tisk pasty, velikost procesního okna během procesu přetavení atd.

Funkce tavidla

Tavidlo obsažené v pájecí pastě odstraňuje oxidy a ostatní nečistoty z povrchů, které se mají pájkou spojit. V ideálním případě by mělo být tavidlo aktivní pouze během působení pájecích teplot a nečinné při nižších teplotách. Reálně je však tavidlo kompromisem mezi těmito dvěma stavy. V procesu pájení přetavením dochází k chemické dezoxidaci, aby mohla pájka vytvořit intermetalickou vrstvu se substrátem. Tavidlo odstraňuje oxidy na pájecích ploškách, na vývodech osazených součástek a také na ploše pájeného spoje. Tavidlo též dočasně snižuje povrchové napětí roztavené pájky a tím podporuje schopnost smáčení. [2, 3]

Tavidlo se skládá ze 4 hlavních komponentů: z pryskyřice, aktivátorů, tixotropních činidel a z rozpouštědla.

Složení tavidla

Pryskyřice zodpovídá za těstovitou konzistenci pájecí pasty. Ve velké míře tak ovlivňuje tiskové vlastnosti. Mimoto se díky lepivosti pryskyřice zamezí pohybu osazených součástek na pájecích ploškách. Producenti pájecích past často kombinují více druhů pryskyřic, aby zajistili co možná nejlepší vlastnosti. [2, 4]

Aktivátory, jako například halogenidy nebo organické kyseliny, jsou určujícími prvky ovlivňující schopnost tavidla odstraňovat oxidy z pájených povrchů. Aktivátory mají vliv také na dobu skladování pasty a elektrické vlastnosti (SIR, elektromigrace). [4]

Tixotropní materiály, mezi které se řadí například celulóza a akrylové pryskyřice, pomáhají pájecí pastě zachovat a případně obnovit hodnotu své viskozity. Viskozita totiž během procesu tisku pasty klesá, a to je s ohledem na požadavek zachování tvaru natištěné pasty nežádoucí. [2, 4]

Rozpouštědlo (např. glykolether, polyol) v pájecí pastě má rozhodující vliv na dobu, po kterou může být pasta nanášena na šabloně, aniž by ztrácela své deklarované vlastnosti (tzv. Stencil life). Tato doba je určována bodem varu a rychlosti vypařování rozpouštědla. Kromě výše zmíněného má použité rozpouštědlo vliv na výsledný pach pájecí pasty. [4]

Rozdělení tavidel

Existuje několik českých a zahraničních norem, které se týkají rozdělení tavidel. Pro příklad jsou uvedeny tři následující tabulky s rozdělením tavidel podle různých parametrů.

Tab 1.2 Rozdělení tavidel podle normy ČSN EN ISO 9454-1 [8]

Typ tavidla	Základ tavidla	Aktivátor	Forma
Pryskyřičné	Kalafuna	Bez aktivátoru Halogenový Nehalogenový	Roztok Pevná látka Pasta
	Umělá pryskyřice		
Organické	Vodou rozpustná		
	Vodou nerozpustná		
Anorganické	Soli	S chloridem amonným	
		Bez chloridu amonného	
	Kyseliny	Kyselina fosforečná	
		Jiná kyselina	
	Zásady	Aminy + čpavek	

Tab 1.3 Typy tavidel ČSN EN 61190-1-1:2002 (vychází z ANSI J-STD-004)[9]

Základ tavidla	Označení	Míra aktivace (obsah halidů [%])					
		L0 (0)	L1 (do 0,5)	M0 (0)	M1 (0,5 - 2)	H0 (0)	H1 (nad 2)
Přírodní pryskyřice	RO (rosin)	A	B	C	D	E	F
Syntetická pryskyřice	RE (resin)	G	H	I	J	K	L
Organické kyseliny	OR (organic)	M	N	P	Q	R	S
Anorganické kyseliny	IN (inorganic)	T	U	V	W	X	Y

Tab 1.4 Rozdělení tavidel podle normy ANSI J-STD-004 [9]

Typ tavidla	Úroveň aktivity (obsah halogenidu [%])		Značení tavidel dle IEC
Kalafuna (RO)	Malá (<0,01)	L0	ROL 0
	Malá (<0,15)	L1	ROL 1
	Mírná (0)	M0	ROM 0
	Mírná (0,5-2,0)	M1	ROM 1
	Vysoká (0)	H0	ROH 0
	Vysoká (>2,0)	H1	ROH 1
Pryskyřice (RE)	Malá (<0,01)	L0	REL 0
	Malá (<0,15)	L1	REL 1
	Mírná (0)	M0	REM 0
	Mírná (0,5-2,0)	M1	REM 1
	Vysoká (0)	H0	REH 0
	Vysoká (>2,0)	H1	REH 1
Organické látky (OR)	Malá (<0,01)	L0	ORL 0
	Malá (<0,15)	L1	ORL 1
	Mírná (0)	M0	ORM 0
	Mírná (0,5-2,0)	M1	ORM 1
	Vysoká (0)	H0	ORH 0
	Vysoká (>2,0)	H1	ORH 1
Anorganické látky (IN)	Malá (<0,01)	L0	INL 0
	Malá (<0,15)	L1	INL 1
	Mírná (0)	M0	INM 0
	Mírná (0,5-2,0)	M1	INM 1
	Vysoká (0)	H0	INH 0
	Vysoká (>2,0)	H1	INH 1

1.2 Nanášení pájecí pasty na DPS

Pájecí pastu lze na DPS nanášet třemi způsoby:

1. Dávkováním – dispenzerem.
2. Tiskem skrz síto – sítotiskem.
3. Tiskem skrz šablonu – šablonovým tiskem.

1.2.1 Nanášení pájecí pasty disperzerem

Nanášení pájecí pasty disperzerem s sebou nese několik výhod. Jednak se pájecí pasta snadno nanáší jen do míst, kde je zapotřebí a jednak lze složení pasty, co se týká pájecích zrn a tavidla, účinně koordinovat s potřebami dávkování. [5]

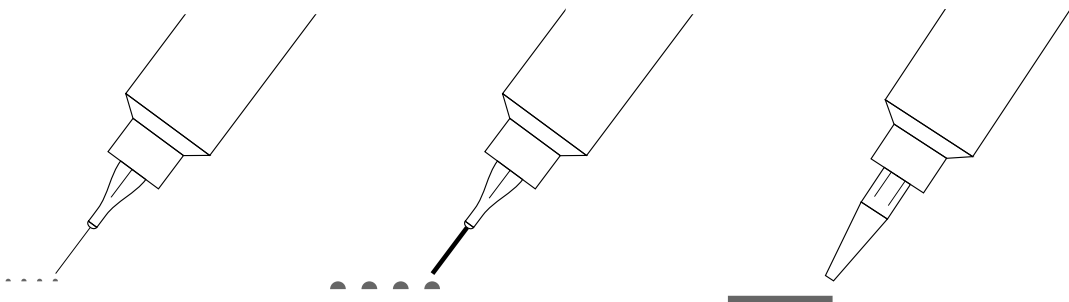


Obr. 1.3 Ruční disperzer – převzato z [7]



Obr. 1.4 Poloautomatický disperzer pájecí pasty – převzato z [6]

Pro malé objemy pájení nebo opravy je vhodné použít ruční dávkování. Tento způsob nánosu pasty je velmi levný a je možné rychle nanést pájecí pasta na požadované místo. Podle požadovaného množství nanesené pasty se volí jehly o různých průměrech tak, jak je naznačeno na *Obr 1.5*. [5]

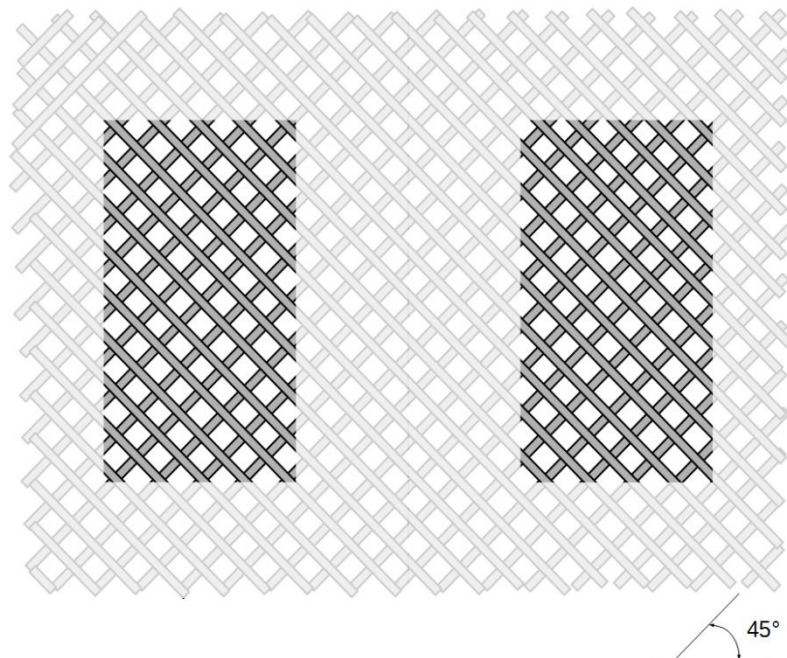


Obr. 1.5 Různé průměry jehel disperzeru [5]

Jako alternativa se k tisku přes šablonu (případně síto) používá strojní dávkování pasty. S úspěchem lze tento způsob využívat tam, kde se produkuje mnoho typů DPS po menších dávkách a bylo by ekonomicky nevýhodné pro každý výrobek vytvářet novou šablonu. [5]

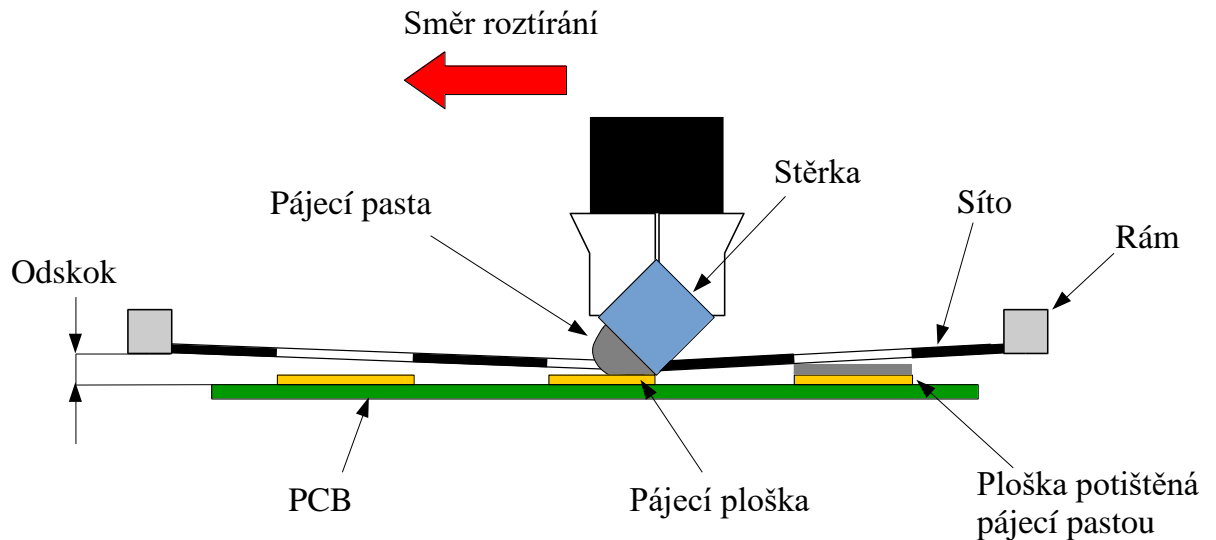
1.2.2 Sítotisk

Sítem se rozumí síťka tvořená vlákny vyrobených z nylonu, polyesteru nebo z kovu, která je následně opatřena fotocitlivým materiálem. Hustota ok na 10 mm délky se pohybuje v rozmezí 24 až 78 ok. Oko síťky by mělo být 2,5krát až 4krát větší než největší zrna pájecí pasty. Pro pastu typu 4 by to znamenalo velikost oka cca 150 μm . Oblasti síta, přes které má být nanášena pájecí pasta, jsou osvětleny UV světlem. Takto osvětlený materiál je následně chemickou cestou odstraněn a neosvětlená vrstva se vytvrdí. V otvorech pak zůstanou jen jednotlivá vlákna síťky. Celé síto je poté připevněno k pohyblivému rámu, který by měl s vlákny síťky svírat úhel 45°. DPS je umístěna pod sítem ve vzdálenosti 0,8 mm až 1,0 mm a rozmístění pájecích plošek musí odpovídat motivu na sítu. Nejmenší tisk je omezen roztečí 0,635 mm. [5]



Obr. 1.6 Síto s fotocitlivým materiálem [2]

Pasta je skrz síto protlačována pohybem stěrky. Během toho je síto prohýbáno a v okamžiku, kdy se stěrka vzdaluje od potištěného místa, síťka se nadzvedává až do maximální výšky, která je určena takzvaným odskokem. Na pájecích ploškách poté zůstane protlačená pájecí pasta. Tloušťka nanášené pasty je závislá na celkové tloušťce síta a zčásti též na objemovém podílu pájecích zrn v pastě a jejich velikosti. Obvyklé hodnoty se pohybují v intervalu 100 μm až 300 μm . Životnost síta jsou řádově jednotky tisíc tiskových cyklů. [5]



Obr. 1.7 Princip tisku sítotiskem [5]

1.3 Šablonový tisk

Při tisku přes šablonu je vrstva pájecí pasty nanášena na pájecí plošky při jediném průchodu stěrky. Stěrka protlačuje pájecí pastu přes otvory v kovové šabloně, ve které je vytvořen obrazec, jenž má být natištěn na DPS. Na rozdíl od sítotisku není obvykle mezi panelem DPS a šablonou během tisku pasty žádná mezera. [5] Pro sériovou SMT výrobu jsou nasazovány automatizované systémy využívající princip šablonového tisku. Takové systémy zajišťují procesní stabilitu tisku pasty a zároveň rychlý tok materiálu linkou. Příklad takové platformy pro nátisk pájecí pasty je na *Obr 1.8*.



Obr. 1.8 Tisková platforma - převzato z [10]

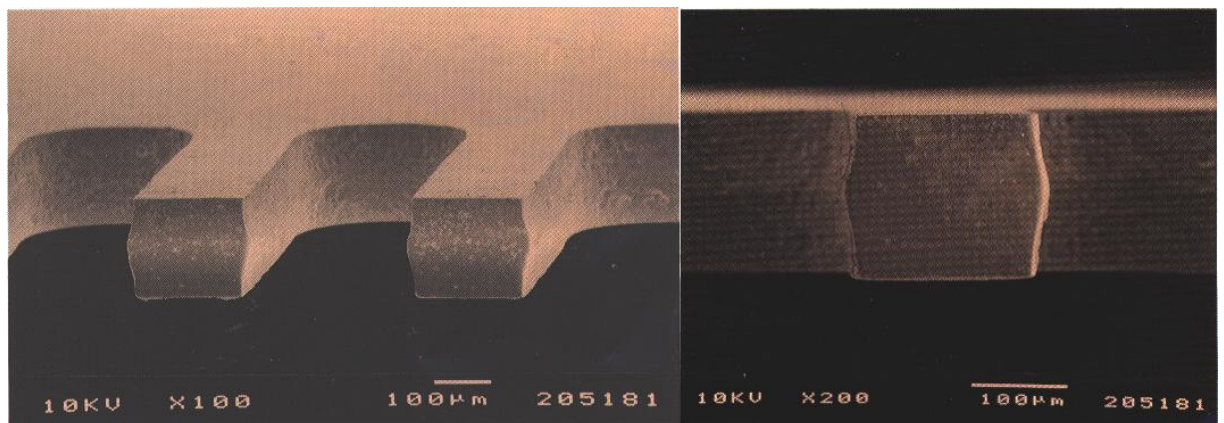
1.3.1 Tisková šablona

Správně navržená tisková šablona je základním předpokladem kvalitního zapájení SMD součástek. Na výsledek tisku pájecí pasty má vliv tloušťka šablony, design otvorů šablony, postup výroby a materiál, ze kterého je šablona vyhotovena. Tloušťka šablon se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,5 mm a jako materiál se nejčastěji využívá nerezová ocel. K vidění jsou také šablony vyrobené z mosazi, z niklové mosazi nebo z měděného bronzu. Oproti sítu mívá šablona životnost až o několik desítek tisíc tiskových cyklů vyšší. [5]

Tiskové šablony lze vyrábět třemi metodami: [5]

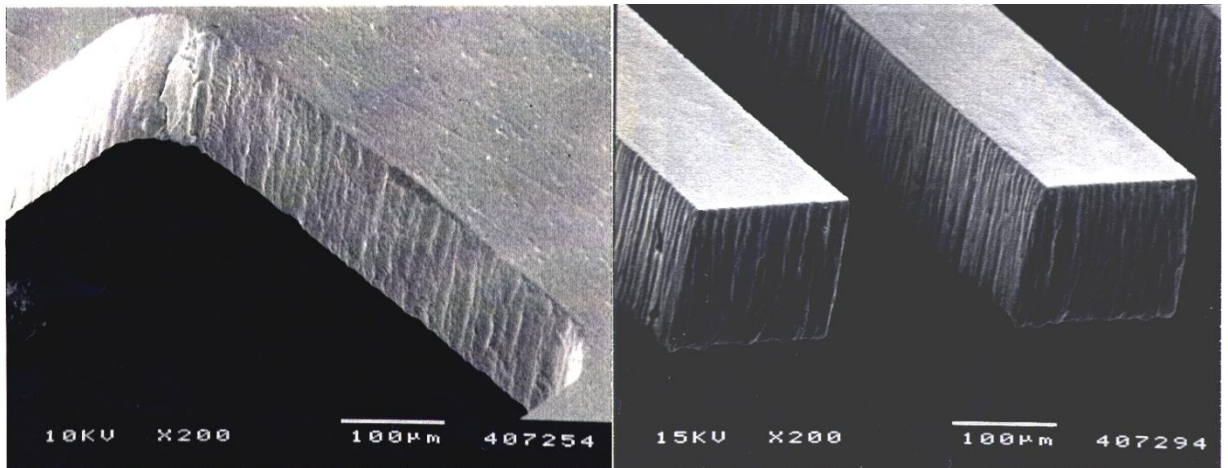
1. chemickým leptáním,
2. řezáním laserem,
3. galvanickou cestou.

Metoda chemického leptání je ze všech tří metod nejlevnější a v minulosti byla nejpoužívanější. Na druhou stranu vykazuje chemické leptání nejhorší výsledky při tisku pájecí pasty. Stěny otvorů šablony totiž nejsou při použití této výrobní metody zcela hladké a hrany otvorů nejsou vyleptány přesně (viz *Obr 1.9*). Z důvodu zmenšujících se pouzder SMD součástek, a tím pádem zvyšujících se nároků na přesnost tisku pájecí pasty, se v současné době využívají chemicky leptané šablony minimálně. Jako materiál se pro metodu chemického leptání používají slitiny mědi, z důvodu snadnějšího odleptání materiálu. Pro menší tloušťky šablony je doporučeno využít niklovou mosaz nebo nerezovou ocel. [4, 5]



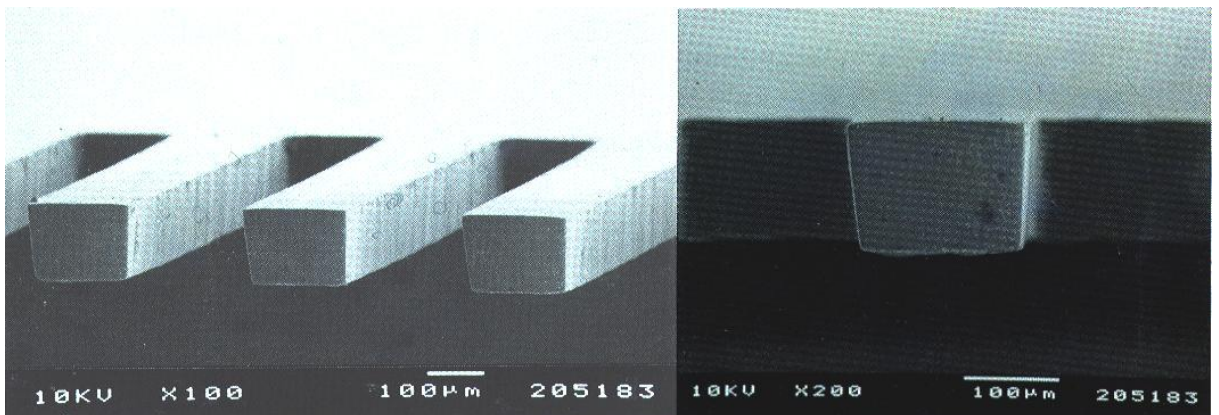
Obr. 1.9 Detail otvorů chemicky leptané šablony – převzato z [4]

Stěny otvorů šablony vyřezaných laserem jsou oproti předchozí metodě lépe opracovány, ale v porovnání s galvanickou metodou mají drsnější povrch a to má za následek obtížnější uvolnění pasty z šablony (viz *Obr 1.10*). Proto se doporučuje využívat takto vyrobených šablon u aplikací s roztečí nad 0,4 mm. [4]



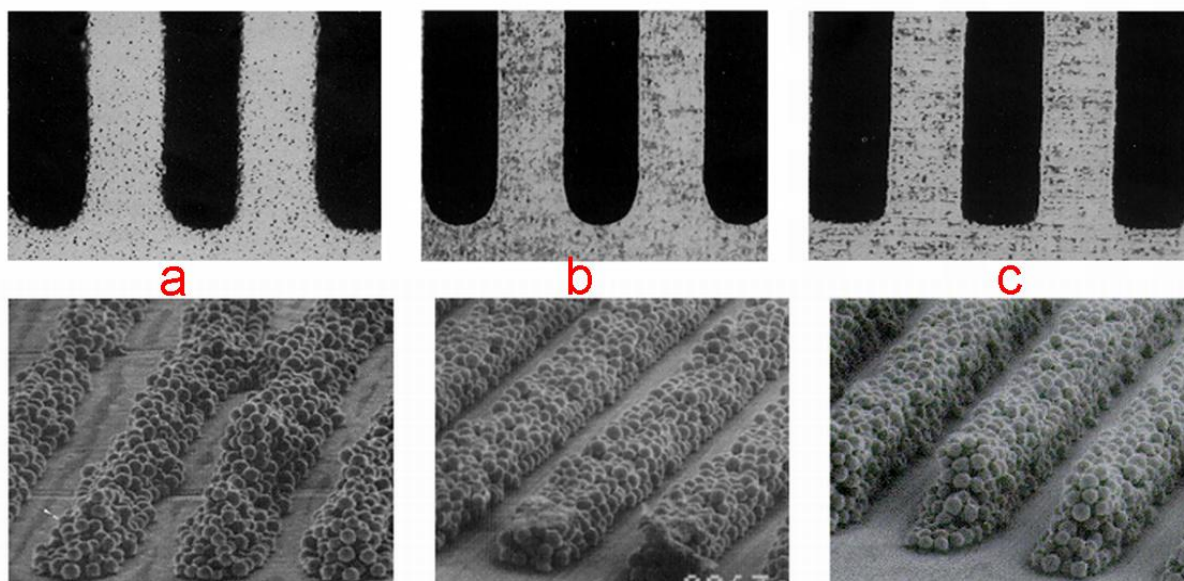
Obr. 1.10 Stěny otvorů šablony řezané laserem – převzato z [4]

Šablonu vyrobenou galvanickou cestou se doporučuje nasadit tam, kde se vyskytují součástky s nejjemnějšími roztečemi (0,4 mm a menší). Stěny otvorů u takto vyrobených šablon jsou velmi hladké a tím zajišťují velmi dobré uvolnění pasty. Jako materiál pro výrobu tohoto typu šablony se používá nikl. Nevýhodou šablon vyrobených galvanickou cestou je několikanásobně vyšší cena oproti cenám ostatních metod. [4]



Obr. 1.11 Otvory šablony vyrobené galvanickou cestou – převzato [4]

Jak se liší kvalita tisku pájecí pasty s použitím šablon vyrobených výše zmíněnými způsoby, ukazuje *Obr 1.12*.

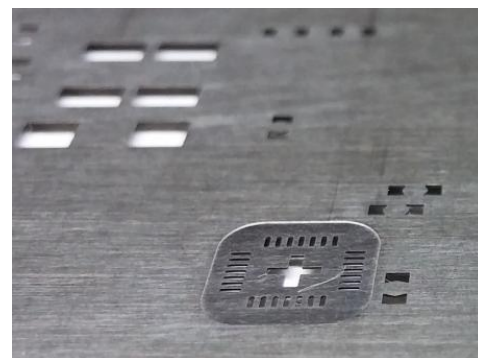


Obr. 1.12 Otvory šablony a natištěná pasta šablonou vyrobenou: a) chemickým leptáním b) řezáním laserem c) galvanickou – převzato z [11]

Tloušťka šablony by měla být volena dle nejmenší rozteče otvorů, která se na šabloně vyskytuje. Obecně řečeno, tenčí šablona umožňuje kvalitnější tisk pájecí pasty. Je to z důvodu menšího tření při uvolňování pasty od stěn otvorů šablony [3]. V případě, že je potřeba snížit množství natisknuté pasty pouze pro určitý komponent, je možné použít tzv. „step down“ šablonu, která má v daném místě sníženou tloušťku oproti zbytku šablony. Při opačném požadavku lze použít „step up“ šablonu. Příklad „step down“ šablony je na Obr 1.13.

Tab. 1.5 Doporučované tloušťky šablon

Mínimální rozteč [mm]	Tloušťka šablony [μm]
> 0,65	150 až 200
0,5	130 až 150
0,4	100 až 130

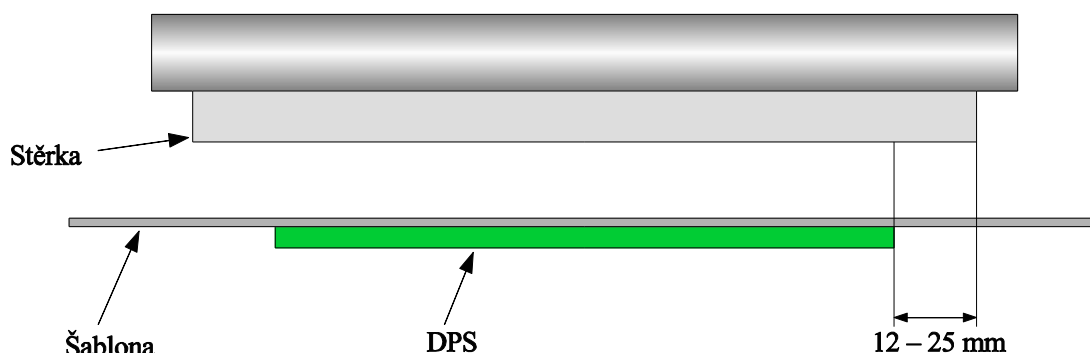


Obr. 1.13 „Step down“ šablona

1.3.2 Stěrky

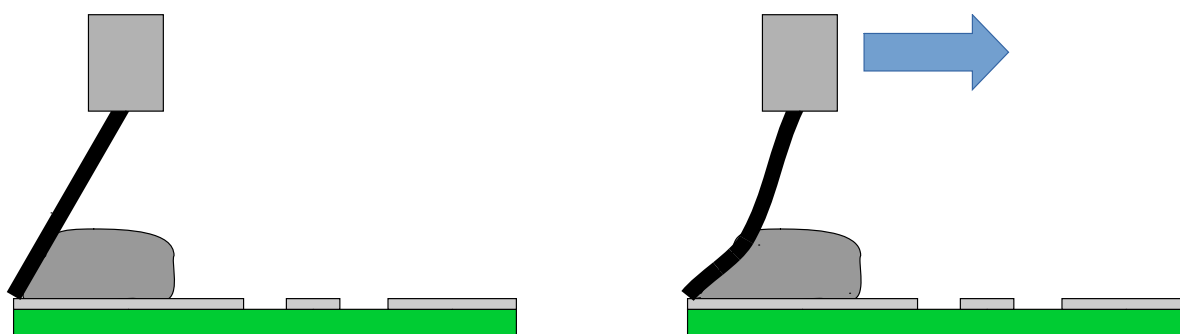
V SMT se pro šablonový tisk využívají dva typy stěrek. Jsou to stěrky vyrobené z kovu a stěrky vyrobené z tvrdé gumy (polyuretan). Kovové stěrky umožňují větší míru kontroly výšky tisku po celé ploše šablony ve srovnání s gumovými stěrkami, a proto se používají zejména pro tisk pasty na DPS s velmi jemnými roztečemi. Stěrky vyrobené z gumy mají své místo například u tisku lepidla pro SMT součástky. [12]

Délka stěrky by měla být v ideálním případě delší o 25 až 50 mm než je délka panelu DPS. To znamená přesah stěrky o cca 12 až 25 mm přes panel DPS z každé strany. [11]



Obr 1.14 Ideální délka stěrky [11]

Úhel, který svírá čepel stěrky se šablonou, hraje při tisku pájecí pasty podstatnou roli. Příliš velký úhel bude sice dobře stírat pastu po šabloně, ale na druhou stranu bude pasta hůře vyplňovat otvory v šabloně. Příliš malý úhel bude mít přesně opačné následky. Bylo experimentálně zjištěno, že ideální úhel stěrky vůči šabloně je 60° . Jak je naznačeno na Obr 1.15, úhel čepel stěrky se během tisku zmenšuje z důvodu jejího ohybu. Pro eliminaci tohoto jevu je možné upravit držák čepel stěrky, aby byla čepel lépe zafixována. Druhou možností je použít čepel o větší tloušťce. [13]



Obr. 1.15 Změna úhlu stěrek během tisku pasty [12]

Rychlost stěrky vyjadřuje, jakou rychlostí roztírá stěrka pastu po šabloně. Je důležité porozumět chování pasty při změnách rychlosti tisku. Kvůli tixotropii, která při rychlém tisku snižuje viskozitu pájecí pasty a zvyšuje tak její roztékavost, se doporučuje tisknout při pomalejších rychlostech. Rychlosti tisku se obvykle pohybují v intervalu od 20 mm/s do 60 mm/s. Vždy je třeba dbát na doporučené hodnoty uvedené v katalogovém listu dané pasty.

Tlakem stěrky se rozumí, jakou přítláčnou silou působí stěrka na šablonu. Při menším tlaku je natištěno větší množství pasty, než při tlaku větším. Příliš velký tlak stěrek na druhou

stranu může způsobit špatný průchod pasty otvorem síta, kdy se pasta neoddělí od stěny otvoru. Dalším negativem velmi vysoké přítláčné síly je rychlejší opotřebením šablony a stěrek. Správně nastavený tlak by měl být takový, že za stěrkou po nátisku pasty nezůstane vrstva pasty v oblasti otvorů šablony. Hodnota tlaku stěrek se nejčastěji nastavuje od 5 kg do 8 kg v závislosti na délce stěrek. [4, 14]

1.3.3 Čištění šablony

Pro zachování dobrých tiskových vlastností je důležité neopomenout problematiku čištění šablony v průběhu výroby. Například výrobce tiskové platformy, společnost DEK, nabízí u svých strojů 3 způsoby, jak automaticky mezi tiskem vyčistit otvory a spodní stranu šablony od pájecí pasty. Prvním typem je čištění suchou speciální utěrkou vyrobenou z vláken hydrofilního polypropylenu. Druhý způsob čištění je založen na stejném principu jako první, zde je ale utěrka navíc navlhčena speciálním rozpouštědlem. Třetí možností je vakuové čištění, které si lze představit, jako vysavač, který se snaží přes utěrku vysát veškeré zbytky pasty uvízlé v otvorech šablony. U každého typu čištění lze nastavit rychlost posuvu čistícího systému v mm/s.

Na tiskovém stroji obvykle bývá možnost kombinovat jednotlivé druhy čištění a také lze nastavit frekvenci čištění. Jelikož čištění prodlužuje dobu jednoho cyklu procesu tisku a zároveň je spotřebováván materiál, který představuje náklady navíc, je dobré zajistit, aby nebylo čištění šablony zbytečně nadužíváno. Pro správné nastavení čistícího programu je nutné uvažovat složitost natištěného motivu a typ použité šablony.

1.3.4 Podpora panelu DPS při tisku pájecí pasty

Aby nedocházelo během šablonového tisku k prohýbání panelu DPS a tiskové šablony, je nutné pod panel DPS na magnetický stůl tiskového stroje vhodně umístit podporu. U tiskové platformy od společnosti DEK musí být výška podpory 81 mm. Existují tři typy nástrojů, používaných pro vypodložení. Jsou to kovové lišty, kovové piny, nebo speciální jednoúčelová podpora pro konkrétní výrobek. Již při návrhu DPS panelu je dobré myslet na možnost podpory během tisku pasty a podle toho navrhnout optimální design.

Kovové lišty (viz *Obr 1.17*) představují velmi jednoduchou cestu jak snadno a účinně vypodložit panel DPS. Zpravidla se využívají u každého jednostranného výrobku, a pokud to design DPS dovolí, používají se i při tisku pájecí pasty na druhou stranu panelu DPS.



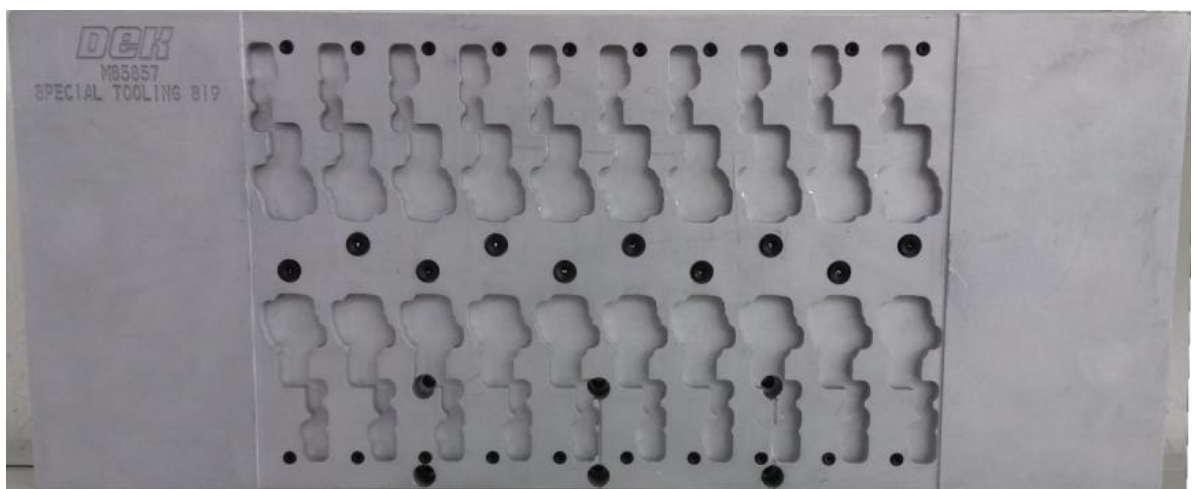
Obr. 1.16 Piny jako podpora panelu DPS



Obr. 1.17 Lišta jako podpora panelu DPS

Kovové piny (*Obr 1.16*) se nejčastěji využívají při vypodložení oboustranné výroby, kde zapájené součástky nedovolují použít lišty. Jedná se o kovové válečky, jejichž podstavy mohou mít různé poloměry, aby s nimi bylo možné vypodložit i velmi hustě osazený panel DPS.

Speciální jednoúčelová podpora (*Obr 1.18*) zaručuje správné vypodložení jednoho konkrétního DPS panelu. Na druhou stranu se jedná o relativně nákladné řešení, kdy jedna taková podpora může stát až 700,- €. Jedná se v podstatě o kovový monolit (nejčastěji hliníkový), do kterého jsou vyfrézovány otvory, které odpovídají svými rozměry a pozicí osazeným součástkám na panelu DPS.



Obr. 1.18 Speciální podpora panelu DPS

1.4 Teplotní profil

Teplotním profilem se rozumí závislost průběhu teploty na čase během procesu přetavení v přetavovací peci. Jeho správné nastavení je základním předpokladem pro zajištění kvalitního pájeného spoje s dlouhou životností. Špatně nastavený teplotní profil může ohrozit funkci osazených SMT součástek. V praxi neexistuje univerzální teplotní profil, protože své doporučené teplotní profily mají jak výrobci pájecích past, tak výrobci SMT součástek. Oba tyto profily je nutné respektovat. Dále je třeba vzít v úvahu geometrické rozměry DPS a součástek. Taktéž materiál, ze kterého je deska plošných spojů vyrobena, bude hrát významnou roli při profilování, protože jinak se bude v peci ohřívat DPS z materiálu FR-4 a jinak hliníková DPS. Stejně tak je nutné zohlednit hustotu osazení součástkami. [2]

V dnešní praxi se využívají zejména dva typy teplotních profilů:

1. sedlový profil – RSS,
2. profil s lineárním nárůstem teploty do maxima – RTS.

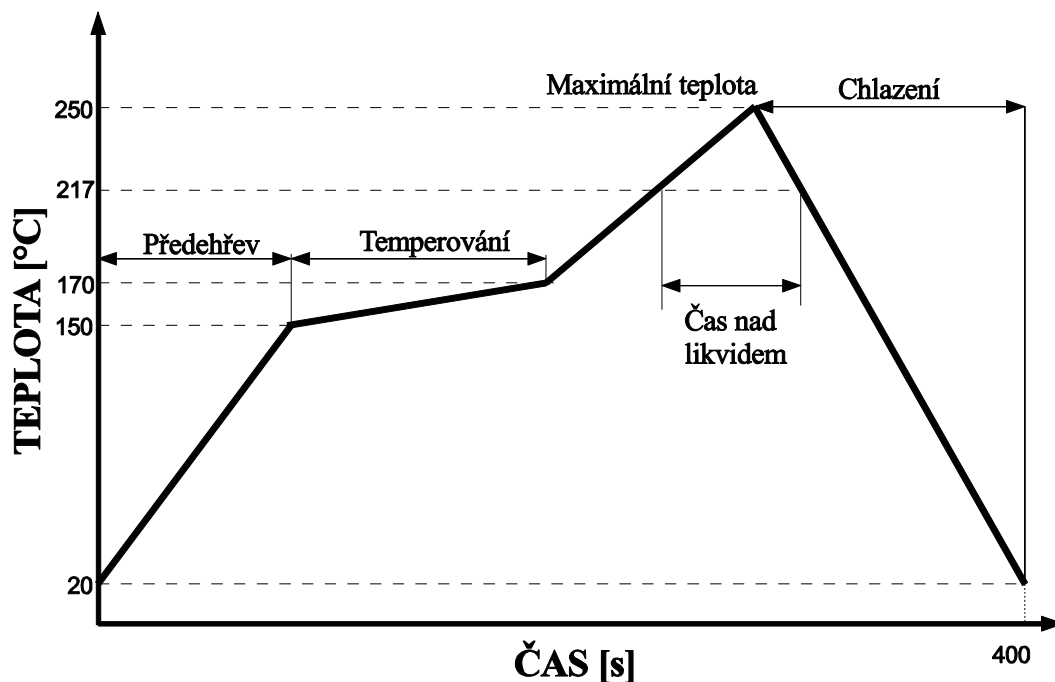
Dále existuje profil LSP (Low Long Spike). Ten ale není v praxi tolik používaný jako předchozí dva profily. [15]

1.4.1 Sedlový profil – RSS

RSS profil zaručuje lepší prohřátí celé sestavy před dosažením teploty likvidu pájecí slitiny z čehož plynou menší rozdíly teplot na sestavě. Tímto opatřením lze zajistit větší stabilitu procesu bez některých typů vad pájeného spoje, jako jsou například kuličky pájky a špatné smáčení. Jak je naznačeno na *Obr 1.19*, RSS lze rozdělit na 4 části – předehřev, temperování, přetavení a chlazení. [2, 15]

Předehřev

Předehřev je definován jako nárůst teploty v čase a je vyjádřen v jednotkách °C/s. Mnoho součástek a pájecích past mají ve svých specifikacích uvedenou doporučenou rychlost předehřevu 2 °C/s. Maximální rychlost předehřevu bývá 3 °C/s. Rychlé vypařování tavidla, jež je obsaženo v pastě, může vést k defektům, jako jsou náhrobky (kapitola 3.2) a kuličky pájky. Pokud součástka obsahuje velký podíl vlhkosti, může příliš rychlý předehřev vést ke generaci vodní páry, a to může způsobit mikrotrhliny v pájeném spoji. Předehřev trvá zhruba 50 až 80 vteřin, dokud křivka profilu nedosáhne 150 °C. [15]



Obr. 1.19 Sedlový profil – RSS profil [2, 15]

Temperování

Jako etapa zvaná temperování se označuje část teplotní křivky mezi teplotami 150 °C až 170 °C. Během temperování se pájecí pasta blíží svému fázovému přechodu do kapalného stavu. Množství tepla dodaného do komponentu a DPS bude v této fázi diagramu vyrovnané a zároveň by se měla odpařit většina tavidla. Délka doby temperování záleží na doporučení výrobce pájecí pasty. Nejčastěji to bývá interval mezi 40 až 100 vteřinami. Příliš rychlý nárůst teploty může způsobit tvorbu kuliček pájky a zkratů mezi vývody součástek. Na druhé straně moc dlouhé temperování může způsobit problémy s pájitelností. [2, 15]

Přetavení

Po temperování následuje další nárůst teploty, který je svojí rychlostí podobný přehřevu a končí až v maximální teplotě profilu. Ta by měla dosahovat hodnot zhruba o 15 °C až 40 °C vyšší, než je bod tavení pájecí slitiny. Například u bezolovnaté pájky ze slitiny SAC 305 je teplota tavení 217 °C, a proto mnoho výrobců pájecích past doporučují dosahovat maximálních teplot v rozmezí 230 °C až 255 °C. Kromě maximální teploty je důležitým parametrem také tzv. TAL (čas nad likvidem). Tento časový interval by měl uvádět každý výrobce ve svém katalogovém listu. Běžně se udává časový interval 40 – 90 s. Příliš krátký TAL může vést ke špatné smáčivosti nebo tvorbě voidů (viz kapitola 3.1). Nadměrně dlouhý TAL vede k nežádoucímu odsmáčení, menší mechanické pevnosti spoje a výsledný

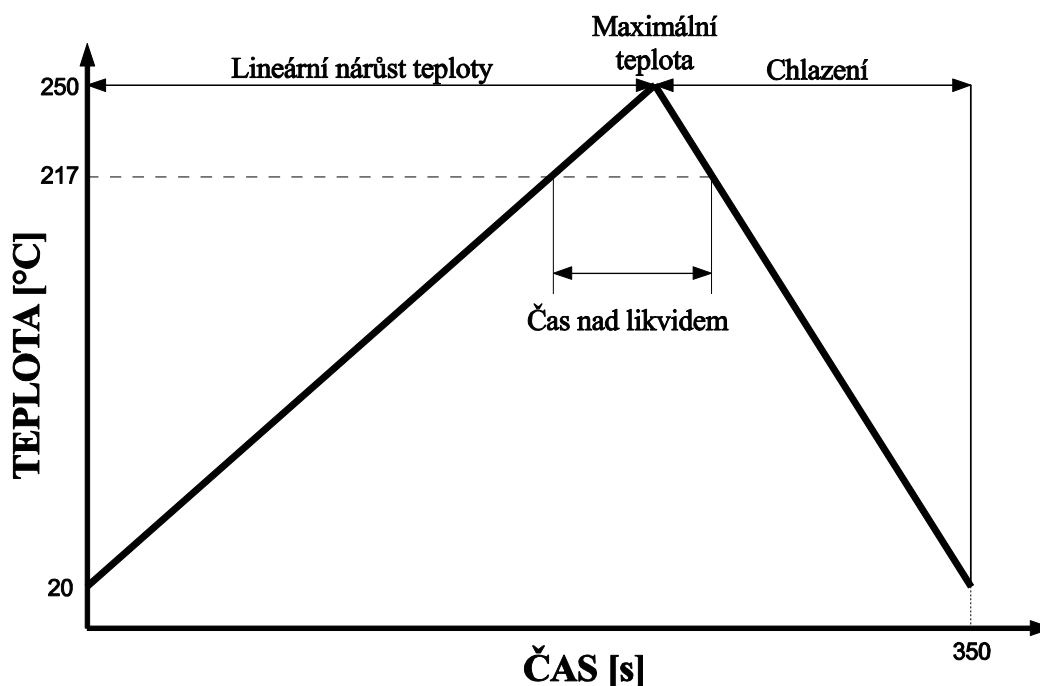
pájený spoj bude mít zrnitý povrch. Této části teplotního profilu je nutné věnovat velkou pozornost s ohledem na osazené komponenty a jejich doporučené hodnoty během procesu přetavení pasty. [2, 15]

Chlazení

Poslední část teplotního profilu je chlazení. Nejčastěji výrobci uvádí maximální rychlost poklesu teploty 6 °C/s. Rychlost chlazení ovlivňuje výsledný vzhled pájeného spoje a jeho krystalickou strukturu. Rychlé chladnutí má za následek drsnější strukturu na povrchu spoje a snazší tvorbu dutin a trhlin uvnitř spoje. Pomalejší proces chladnutí na druhou stranu znamená, že jsou komponenty vystaveny tepelnému namáhání po delší dobu. Stejně jako u ostatních částí profilu, je nutné zkontrolovat, jestli chlazení odpovídá specifikacím komponentů. Některá pouzdra součástek mohou být citlivá na příliš rychlé chlazení. [2, 15]

1.4.2 Profil s lineárním nárůstem teploty do maxima – RTS

RTS profil je definován pouze dvěma částmi. První část RTS profilu je tvořena více či méně lineárně rostoucí křivkou z počátku (cca 20 °C) až do maximální teploty celého profilu. Po dosažení maxima nastává stejně jako u profilu RSS část chlazení. Profil s lineárním nástupem teploty se jeví jako lepší volba u menších sestav a při spojení s dobrou teplotní konvekcí v peci lze pozorovat výborné výsledky. [2, 15]



Obr 1.20 Profil s lineárním nárůstem do teploty maxima - RTS profil [2, 15]

Profil RTS umožňuje zvýšit výkonnost pece a přispívá k úspoře energie, jelikož časová prodleva konstrukční skupiny je v první části procesu přetavení výrazně zredukována. Na

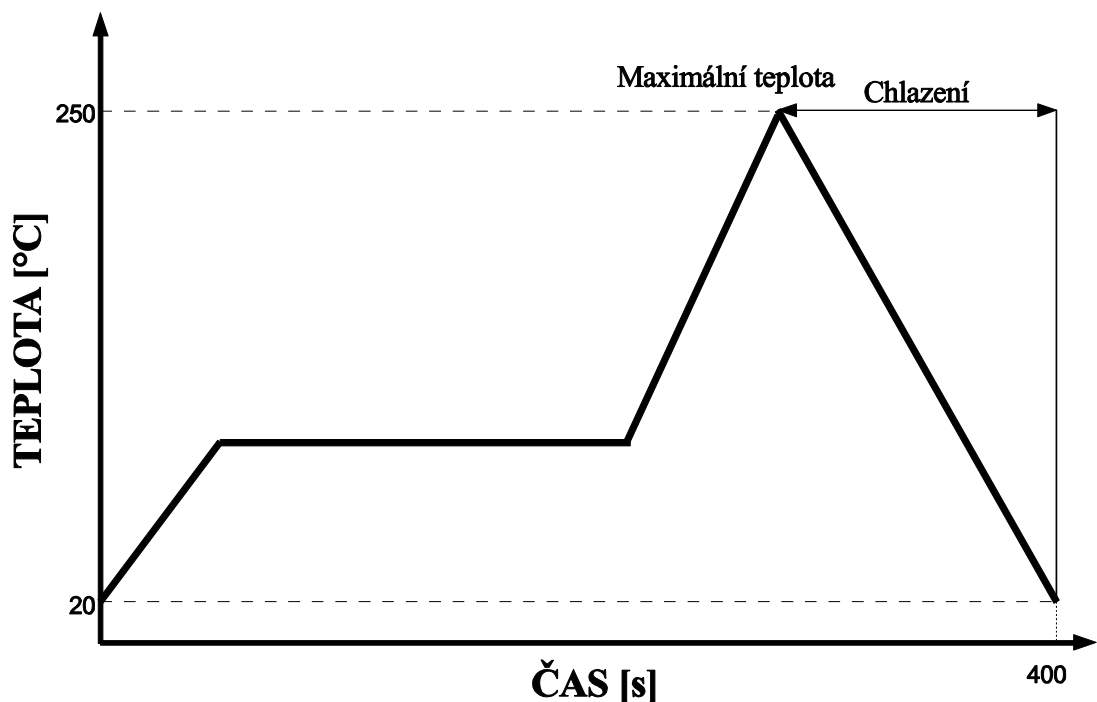
Obr 1.20 je zjednodušeně nakreslen profil RTS s vyznačenými důležitými parametry. Část profilu, která se nachází nad 217 °C, je definována totožně jako u profilu RSS. Stejně parametry budou platit i pro proces chlazení. Rozdíl oproti RSS je v chybějící části určené pro temperování. [2, 15]

Lineární nárůst teploty

Nárůst teploty u RTS profilu by měl trvat cca dvě třetiny času celého procesu a je pro něj doporučena rychlost 1 až 2 °C/s. V průběhu nárůstu teploty dochází k přehřevu, aktivaci tavící přísady a odpařování tavidla. [15]

1.4.3 Profil LSP

Profil LSP se vyznačuje dlouhým temperováním při poměrně nízké teplotě. Svým tvarem je profil podobný RSS profilu. LSP profil se při bezolovnatém pájení moc nevyužívá. Použití tohoto profilu s olovnatými pastami omezovalo tvorbu voidů. [15]



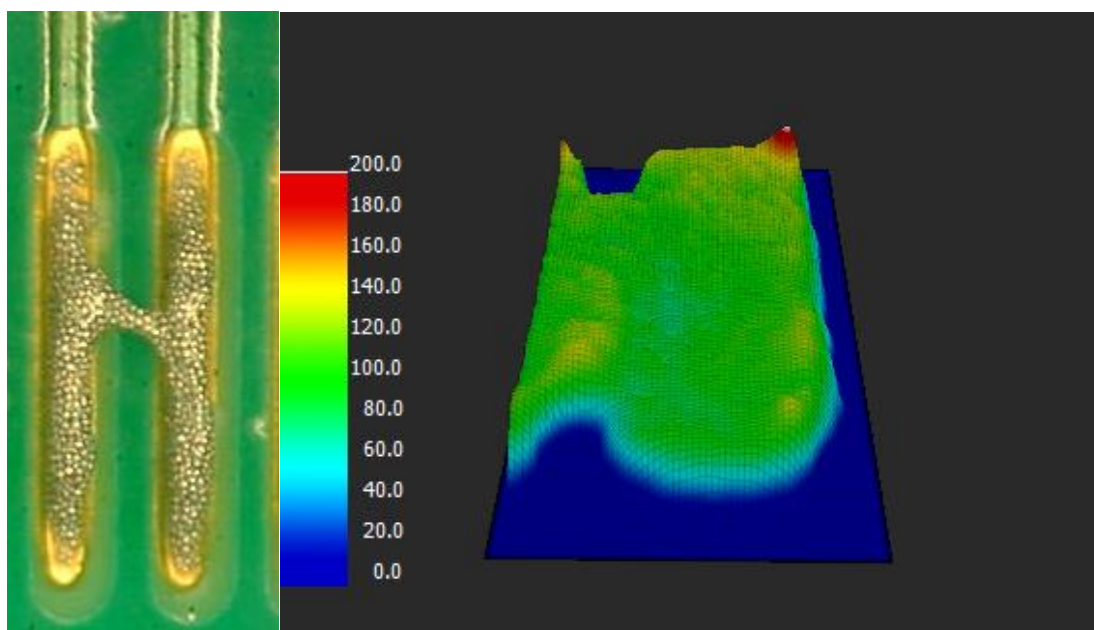
Obr 1.21 Low Long Spike profil - LSP profil [15]

2 Chyby vznikající během tisku pájecí pasty

Tato kapitola je věnována defektům, které jsou způsobeny špatným nátiskem pasty. V současné době jsou čím dál více rozšířené systémy na kontrolu natisknuté pájecí pasty (tzv. SPI), které dokážou odhalit problémy s tiskem pasty, a tím mohou pomoci ušetřit výrobci nemalé finanční prostředky.

2.1 Můstky

Můstek (z angl. slova „bridge“) je definován jako spojení dvou natisknutých plošek pájecí pastou. Tento defekt může vést ke vzniku zkratu během procesu přetavení. Vznik můstku může být způsoben několika příčinami. První z nich může být velké množství natisknuté pasty na pájecí plošce. Z tohoto důvodu je nutné použít správnou redukci otvorů šablony. Druhou příčinou může být ulpění zbytku pasty na spodní straně šablony. Tento zbytek pasty se pak rozmaže na následujícím panelu DPS během tisku. V tomto případě je nutné odstranit nečistotu z šablony a případně nastavit častější frekvenci čištění.



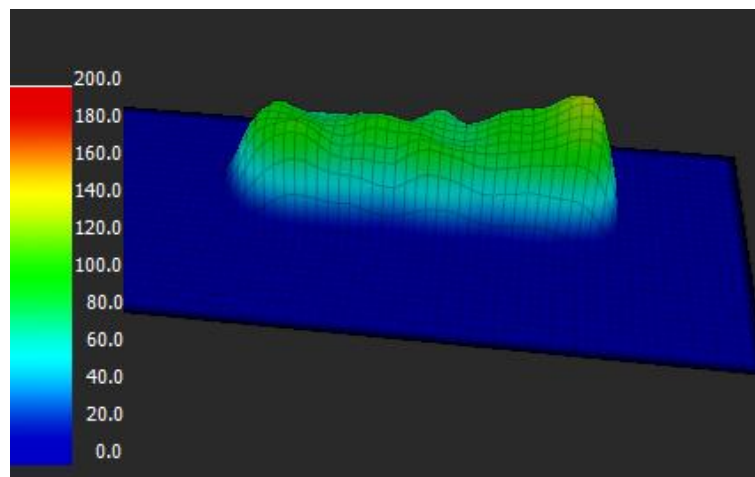
Obr. 2.1 Můstek -
převzato z [16]

Obr. 2.2 Můstek na obrázku z SPI

Zásadní vliv na tvorbu můstků má také správné podpora panelu v tiskovém stroji. Je důležité, aby výška podpory byla ve všech místech stejná. Na tvorbě můstků se může podílet také příliš velká roztékavost pájecí pasty. Roztékavost je přímo úměrná teplotě pasty. Za tímto účelem bývá v tiskovém stroji udržována konstantní teplota pomocí klimatizace.

2.2 Nedostatečné množství pájecí pasty

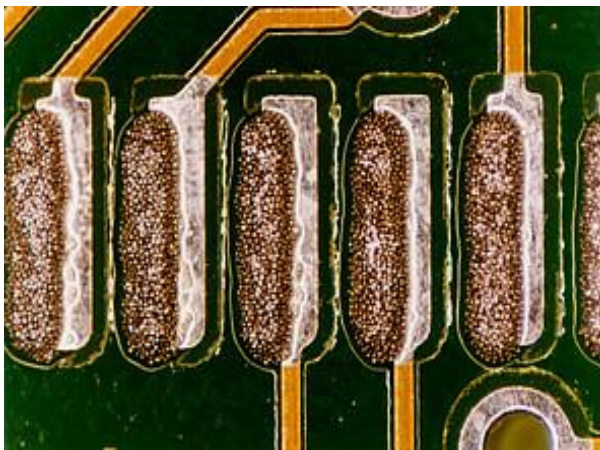
Pokud nebude na pájecí plošce natištěno optimální množství pájecí pasty, potom bude hrozit, že v pájeném spoji nebude dostatečné množství pájky. V horším případě pájený spoj vůbec nevznikne. První příčina vzniku tohoto typu defektu může být v malém množství pájecí pasty na šabloně během tisku. Tisková platforma dokáže na tento nepříznivý stav sama upozornit a zastavit proces tisku, protože válec pájecí pasty sunutý stěrkou po šabloně je analyzován pomocí laseru. Druhá příčina tkví v ucpání otvorů šablony pájecí pastou, kdy se při oddělování pasty od šablony neuvolní celý objem pájecí pasty. To hrozí zejména u velmi malých otvorů. Prvním řešením může být snížení oddělovací rychlosti šablony od panelu DPS po procesu tisku. Druhá možnost je snížit tlak stěrky, čímž se zamezí natlačení příliš velkého počtu pájecí zrn do otvoru šablony. Tím se sníží tření mezi zrny a stěnami otvoru, což bude mít za následek snadnější uvolnění pájecí pasty od šablony.



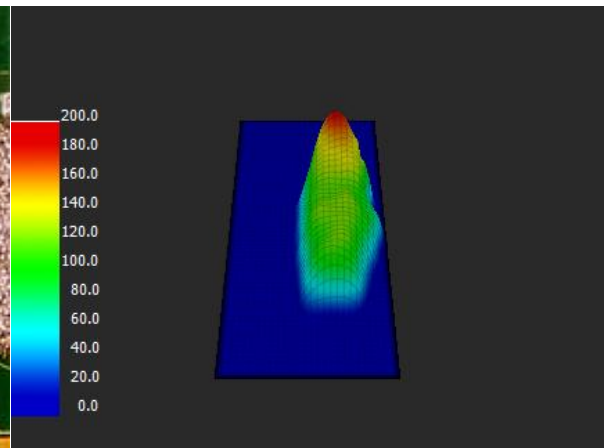
Obr. 2.3 Nedostatečné množství pájecí pasty

2.3 Pozice natisknuté pájecí pasty

V případě, že nebude pájecí pasta natištěna přesně na pájecí plošku, po procesu přetavení se kromě nekvalitních pájených spojů mohou objevit zkraty nebo náhrobky. Původ tohoto defektu je ve špatném srovnání pozice šablony vůči panelu DPS. To může být způsobeno málo kvalitními fiduciálními značkami, které stroj používá jako naváděcí body pro orientaci a zjištění velikosti natočení upnuté šablony. Druhá příčina může být závada na tiskovém stroji, když automatické dorovnání šablony nefunguje správně. V možnostech tiskové platformy je jemné nastavení vyrovnání v osách x a y v řádu jednotek μm . V některých případech může pomoci také ruční nastavení natočení celé šablony o určitý úhel v řádu jednotek úhlových vteřin.



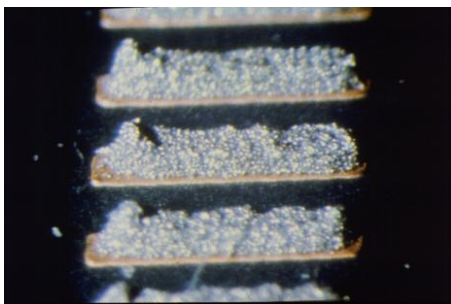
Obr. 2.4 Špatná pozice natisknuté pasty [17]



Obr. 2.5 Špatná pozice natisknuté pasty

2.4 Špatný tvar natisknuté pájecí pasty

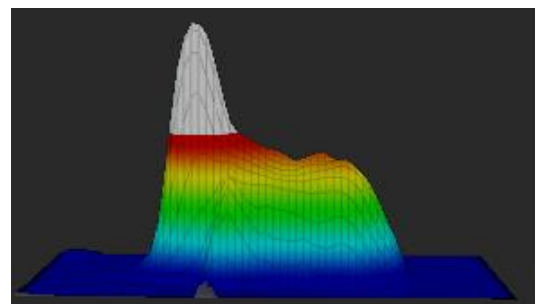
Nesprávný tvar způsobený natištěním většího množství pasty v jedné části depozitu může vést k defektům, jako jsou náhrobky nebo solder bead. Kromě toho je to pro procesního inženýra indikátor, že je v procesu nátisku pájecí pasty něco špatně. V anglické literatuře se pro tento defekt ujal obecný název „dog ears“, tedy v překladu „psí uši“, protože může připomínat siluetu psí hlavy, jak je naznačeno na obrázku níže. Důvodem vzniku této vady může být příliš velká oddělovací rychlost, proto se doporučuje snížit tuto rychlost na nejmenší možnou hodnotu. Dalšími příčinami mohou být příliš velký tlak stěrek nebo vysoká teplota pasty.



Obr. 2.6 Nesprávný tvar natisknuté pasty - převzato z [11]



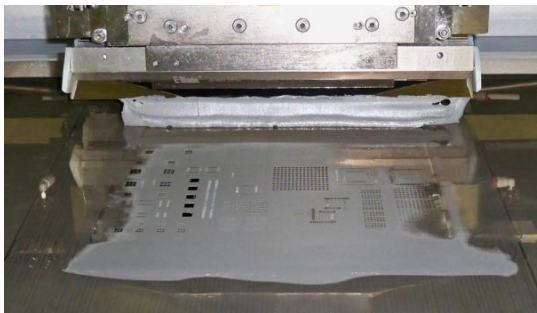
Obr. 2.7 Převzato z [35]



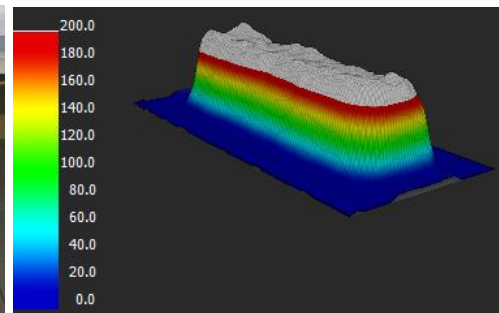
Obr. 2.8 Nesprávný tvar natisknuté pasty

2.5 Nadmíra natisknuté pájecí pasty

Pokud je natištěno na pájecí plošku více pasty, než je vyžadováno, hrozí vznik defektu solder bead a kromě toho také pohyb součástky v průběhu procesu přetavení pájecí pasty v přetavovací peci. Toto „zaplavání“ může být kritické zejména pro velmi malé komponenty. Příčinou nadmíry natisknuté pasty je nedostatečný tlak stěrek nebo problém s podporou, který se projeví špatným stěrem pasty po šabloně, kdy v oblasti otvorů šablony zůstává vrstva pasty. Takový případ je ukázán na *Obr 2.9*.



Obr. 2.9 Nízký tlak stěrek – převzato z [18]



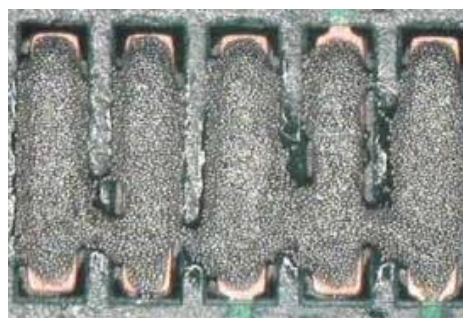
Obr. 2.10 Nadmíra natisknuté pasty

2.6 Studený sesuv pájecí pasty

Natištěná pájecí pasta má tendenci se propadat a roztékat. Tyto jevy mohou zapříčinit tvorbu můstků mezi natištěnými pájecími ploškami a výsledná kvalita pájeného spoje nebude odpovídat normě. [20]

Tzv. „studený sesuv“ závisí na:

- viskozitě pájecí pasty – roztékavost je nejčastější u pájecích past s menším obsahem kovové složky,
- těkavosti tavidla, jež určuje rychlost vysychání pájecí pasty, která se pak začne „rozpadat“,
- výšce a tvaru natištěné pájecí pasty,
- teplotě.



Obr. 2.11 Studený sesuv pájecí pasty - převzato z [19]

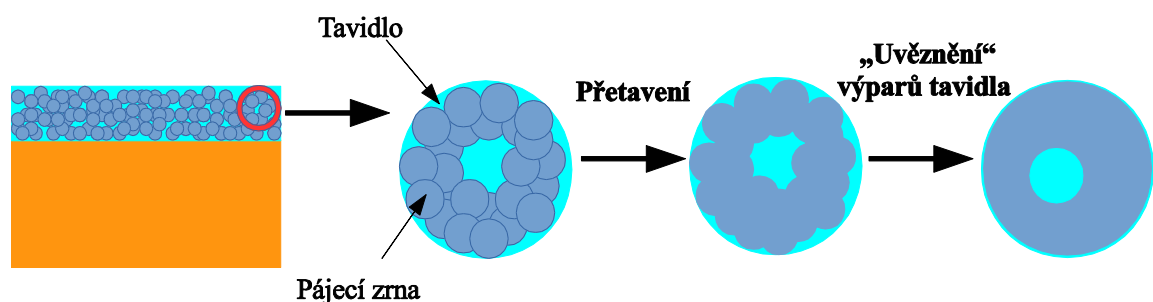
3 Chyby vznikající během procesu přetavení

3.1 Voidy

Voidy jsou definovány jako dutiny v pájeném spoji, které vznikají během procesu přetavení, kdy dochází k vypařování tavidla a tyto výpary nestačí z pájeného spoje uniknout (*Obr 3.1*). Výrobci pájecích past doporučují řešit problémy s voidy prodloužením parametru TAL a zvýšením maximální teploty během procesu přetavení. [4, 21, 22]

U voidů jsou sledovány následující parametry [21]:

- velikost – mechanické zkoušky potvrdily, že voidy, jejichž objem je větší než 50 % objemu pájeného spoje, způsobují 25% až 50% snížení životnosti pájeného spoje,
- četnost – počet voidů má významný vliv na kvalitu pájeného spoje. Zejména pak velké množství voidů o malých rozměrech na rozhraní pájky a součástky výrazně snižuje životnost spoje,
- poloha – z velkého množství analýz vyplynulo, že pokud je vzdálenost mezi rozhraním void-pájka a hranicí pájeného spoje menší než 152,4 ~ 177,8 μm , značně se tím zvýší pravděpodobnost šíření trhlin a následné poruchy.

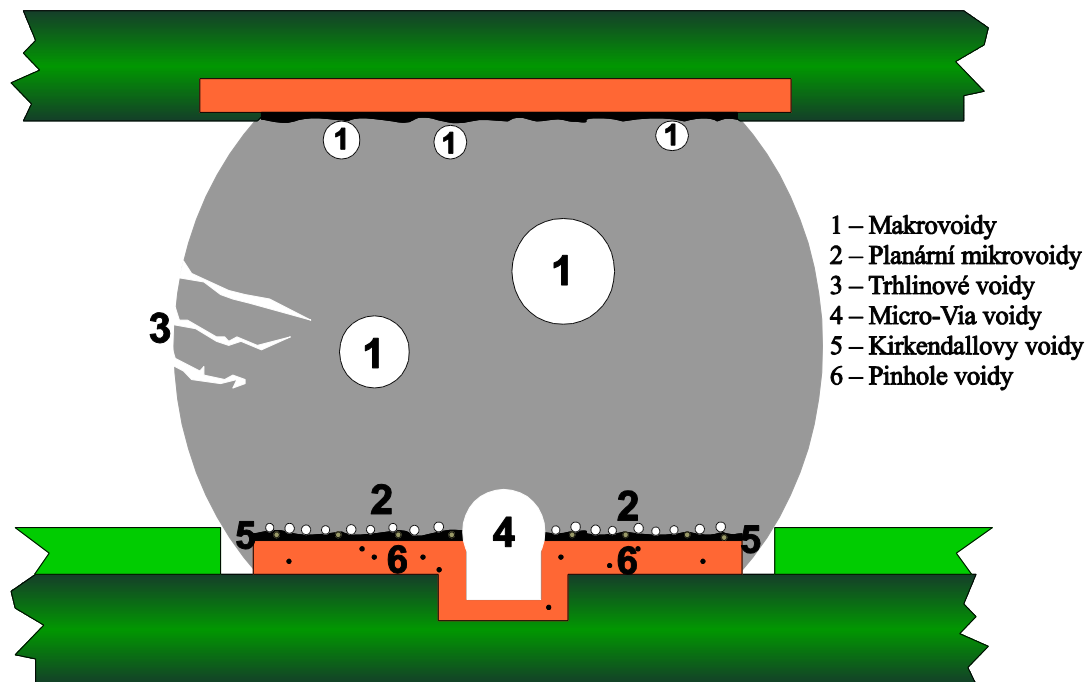


Obr. 3.1 Vznik voidu [23]

Jak je naznačeno na *Obr 3.2*, voidy se dělí na několik skupin.

3.1.1 Makrovoidy

Makrovoidy jsou generovány uvolňováním těkavých složek tavidla v pájecí pastě. Průměr voidu bývá od 100 μm do 300 μm a mohou se vyskytovat kdekoli v pájeném spoji. V literatuře mohou být také označovány jako „procesní voidy“. [25]



Obr. 3.2 Typy voidů [23]

3.1.2 Planární mikrovoidy

Planární mikrovoidy mají průměr menší než 50 μm a v pájeném spoji se vykytují v blízkosti intermetalických vrstev. Jelikož se mikrovoidy nachází v jedné rovině s velkou četností, mají velmi neblahý účinek na pevnost spoje, což může brzy vyústit v praskání pájky díky častým změnám teploty ve spoji. Planární mikrovoidy bývají v literatuře nazývány také jako „champagne voids“. [25]

3.1.3 Trhlinové voidy (Shrinkage voidy)

Trhlinové voidy v podstatě nejsou voidy jako takové, ale spíše lineární trhliny s hrubými dendritickými plochami vycházejícími z povrchu pájeného spoje. Tento typ voidu vzniká během procesu tuhnutí slitiny SAC. U olovnatých pájek se tento typ voidů nevyskytuje. V literatuře se lze setkat s označením „sinkholes“ nebo „hot tears“. [25]

3.1.4 Micro-Via voidy

Micro-Via voidy jsou voidy s průměrem větším než 100 μm a jsou způsobeny microvia spoji v ploškách. Tyto voidy nejsou výsadou pouze bezolovnatých pájek, ale jsou k vidění i při použití pájek olovnatých. [25]

3.1.5 Kirkendallové voidy

Kirkendallové voidy se nacházejí na rozhraní intermetalické vrstvy a mědi. Četnost těchto voidů roste spolu s tepelným namáháním a elektromigrací. Příčina vzniku Kirkendallových voidů spočívá v rozdílné difuzní rychlosti mědi a cínu. Spolehlivost pájeného spoje s těmito voidy je výrazně ovlivněna, jelikož rozhraní mědi a intermetalické vrstvy se stává křehčí. V literatuře se lze setkat též s výrazem „Horsting voids“.

3.1.6 Pinhole voidy

Pinhole (špendlíkové) voidy jsou dutiny o velikosti mikronů a nacházejí se v měděných ploškách DPS. Tyto voidy jsou patrné i přes povrchovou úpravu. Příčina jejich vzniku spočívá v nedokonalém pokovení mědi DPS výrobcem. [25]

3.2 Náhrobky

Náhrobky (z angl. výrazu „tombstone“), které v literatuře bývají nazývány také jako „Manhattan Effect“, jsou jedním z častých defektů vznikajících během procesu SMT. Tato vada se nejčastěji vyskytuje u malých pasivních součástek osazovaných na desku plošných spojů (pouzdra 0805, 0603, 0402 a 0201). Tvorba náhrobků je zapříčiněna tím, že je zapájena pouze jedna strana součástky a druhá je oddělena od pájecí plošky.

Jsou známé tři hlavní příčiny této vady: [7]

- 1) rozdílné síly působící na vývody součástky,
- 2) výpary z tavidla pájecí pasty a DPS,
- 3) pohyb součástky.

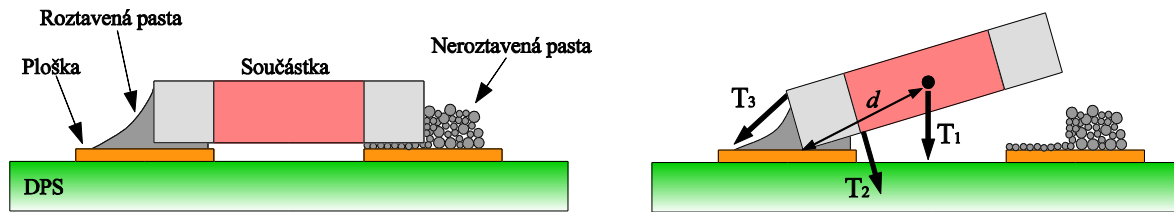
3.2.1 Rozdílné síly působící na vývody součástky

Během procesu přetavení pájecí pasty jsou na pájených stranách komponentu rozdílná povrchová napětí. Bylo zjištěno, že stačí pouhý časový rozdíl 0,2 vteřiny mezi začátky procesu smáčení na pájených stranách součástky, aby hrozil vznik náhrobku. Na Obr. 3.3 je naznačen princip zvednutí jedné strany komponentu, kde:

T1 vlastní moment součástky,

T2 moment roztavené pájecí pasty pod součástkou,

T3 moment roztavené pasty na čelní straně vývodu součástky.



Obr. 3.3 Princip vzniku náhrobku [26]

Podmínka způsobující náhrobku je: $T1 + T2 < T3$.

Za nevyrovnanost sil působících na pájených stranách součástky mohou následující parametry: [4, 26]

Pájecí pasta

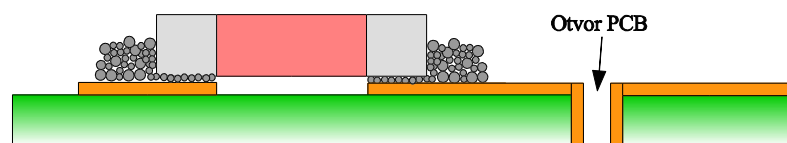
Pájecí pasty se kromě jiného liší v parametru rychlosti smáčení. Chování pasty během procesu tavení má velký vliv na vznik náhrobku. [26]

Geometrie komponentu

Silnější součástky, jako např. kapacitory a induktory, jsou více náchylné ke vzniku náhrobku, než ty tenčí. Roztavená pájka smáčí povrch vývodu součástky do vyšší výšky a díky většímu pákovému efektu se komponent může vzpřímit do svislé polohy. [26]

Design desky

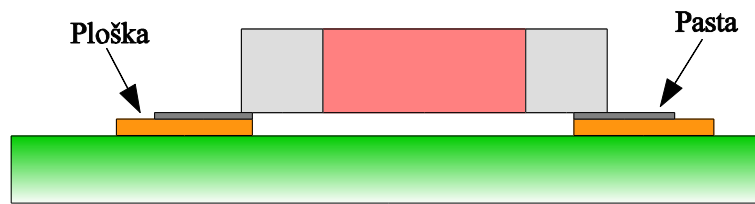
Náhrobek může být způsoben propojením pájecí plošky s pokoveným otvorem, který má chladičí účinky a způsobí tak rozdílné teploty na obou stranách součástky. [26]



Obr. 3.4 Princip vzniku náhrobku – design DPS [26]

Design pájecích plošek

Pokud je vzdálenost mezi ploškami příliš velká, může být na jedné plošce komponent usazen větší plochou než na druhé, a to způsobí rozdílné velikosti působících sil. Pájený spoj na jedné straně pak bude vyvíjet větší pákový efekt a součástka bude náchylnější ke vzniku náhrobku (Obr 3.5). [26]



Obr. 3.5 Princip vzniku náhrobku – design pájecích plošek [26]

Oxidace

Oxidace (ať už na straně součástky nebo na straně DPS) má za následek zhoršenou pájitelnost. Na obou stranách součástky pak může být rozdílná rychlost smáčení a riziko vzniku náhrobku se zvýší. [26]

Přesnost osazovacího stroje

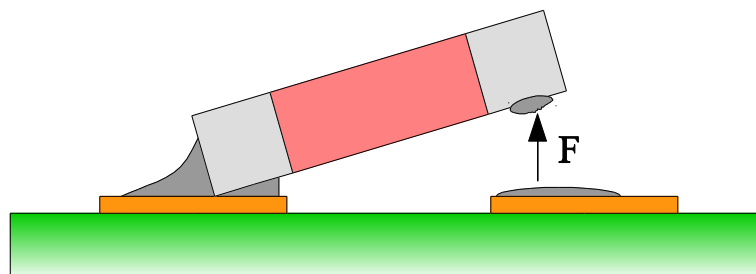
Pokud nebude osazení součástky na pastou natisknuté plošky přesné, na jednu pájenou stranu komponentu bude během procesu přetavení působit větší síla. Je to jedna z nejčastějších příčin vzniku náhrobku u malých součástek. [26]

Teplotní profil

Nedostatečný přehřev nebo rychlý nástup teploty před přetavením mohou způsobit rozdíly teplot na obou stranách komponentu, zvláště pokud se na jedné straně součástky nachází prvek, který vede dobře teplo. Rozdíl teplot na pájených stranách komponentu patří mezi základní příčiny zvednutí součástky. [26]

3.2.2 Výpary z tavidla pájecí pasty

Během procesu přetavení pájecí pasty dochází k odpařování tavidla z pasty. Tyto výpary pak působí silou směrem vzhůru zespondu součástky. [26]



Obr. 3.6 Princip vzniku náhrobku – výpary z tavidla [26]

Za vznikem výparů stojí následující faktory: [26]

Pájecí pasta

Při teplotách nutných k přetavení pasty se mohou začít odpařovat některá teplotně odolná rozpouštědla. Vzniklé výpary stoupají směrem vzhůru a tlačí tak na spodní stranu součástky. Vznik takovýchto nežádoucích výparů závisí na typu a chemickém složení použitého tavidla v pastě. [26]

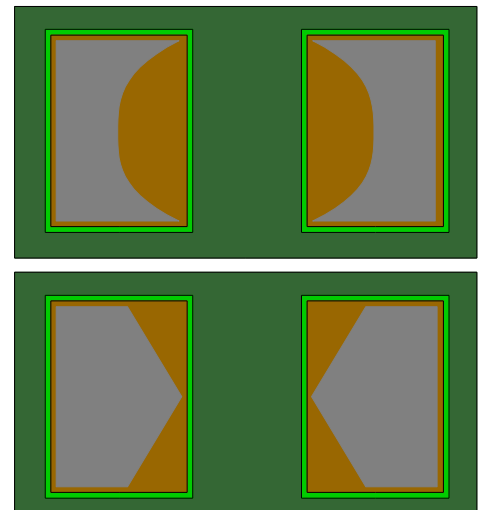
Teplotní profil

Příliš rychlý náběh teploty před bodem tavení pasty může mít za následek to, že se tavidlo nestačí během této fáze odpařit. To by znamenalo, že k odpařování bude docházet i po překonání bodu tavení pasty. Potom se bude komponent pohybovat nahoru a dolů podobně jako poklička na hrnci, ve kterém se vaří voda. Pomalejší náběh teploty před bodem tavení je jedním z opatření nutných k minimalizaci rizika vzniku náhrobku. [26]

3.2.3 Pohyb součástky

Množství natištěné pasty

V případě, že je množství natištěné pasty příliš velké, komponent pak může v roztavené pastě „plavat“. Takovéto pohyby součástky jsou nežádoucí a mohou mít za následek rozdílně velké síly působící na pájených stranách komponentu. Množství nanesené vrstvy pasty ovlivněno mnoha faktory jako například tloušťka šablony, tlak stěrek atd. Tvary otvorů šablony typu „domácí meta“ a „U - tvar“ napomáhají odstranit kromě problému s kuličkami pájky také problém s náhrobky způsobenými pohybem součástky. [26]



Obr. 3.7 Design otvorů šablony [26]

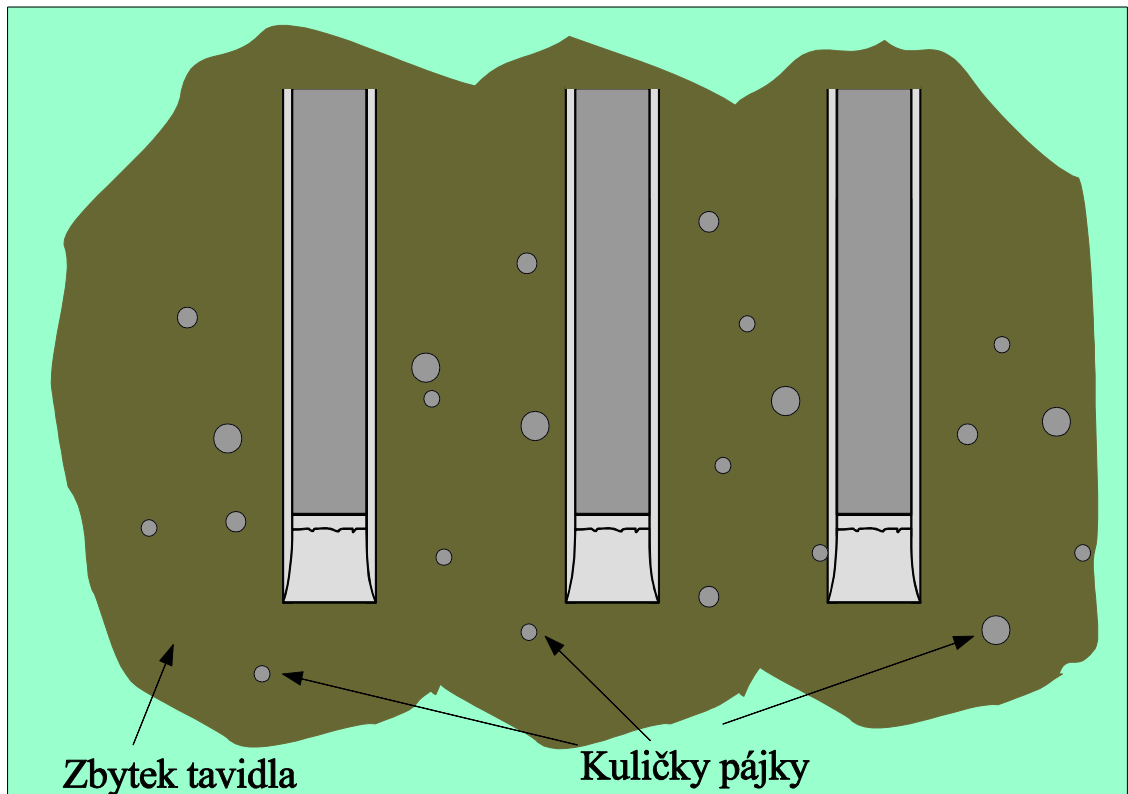
3.3 Kuličky pájky

Chyba zvaná kuličky pájky se dělí na dvě skupiny. První skupinou jsou mikrokuličky pájky (micro solder balls). Tím se označuje četné množství malých kuliček pájky přichycených na zbytku tavidla kolem pájecích plošek. Jako druhá skupina je označován defekt solder bead. Tím se rozumí kuličky pájky, které se objevují v těsné blízkosti čipovým součástkám, přesněji na boku součástky.

Oba typy defektu se na DPS projeví až po procesu přetavení. [4, 27]

3.3.1 Mikrokuličky pájky

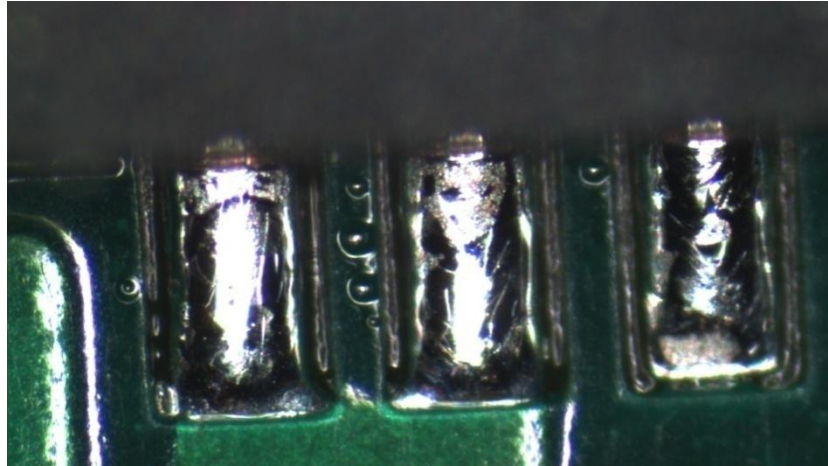
Defekt v podobě mikrokuliček pájky, jež je naznačen na *Obr. 3.8*, může mít více příčin. Jednou z hlavních příčin je zoxidování částic pájky v pájecí pastě. To může nastat například již při výrobě pasty, špatným uchováním pájecí pasty během přepravy od dodavatele ke spotřebiteli, nesprávným skladováním pasty, kdy je pasta vystavena vysoké teplotě nebo pokud je doba mezi nátiskem pasty a jejím přetavením příliš dlouhá. Jako řešení této příčiny se nabízí použít novou pastu. [4]



Obr. 3.8 Mikrokuličky pájky[4]

Druhá příčina může mít své kořeny v příliš pomalém nebo naopak velmi rychlém předehřevu během procesu přetavení. V prvním případě se bude tavidlo roztékat čím dál více od natisknuté plošky a aktivátory tavidla přestanou být účinné. Při opačném extrému, tedy při příliš rychlém předehřevu mohou být mikrokuličky pájky způsobeny malými „explozemi“ v roztavené pájce. Pokud jsou na DPS detekovány mikrokuličky pájky, je doporučeno nastavit rychlost předehřevu na hodnotu v intervalu 0,8 až 1,2 °C/s. [15]

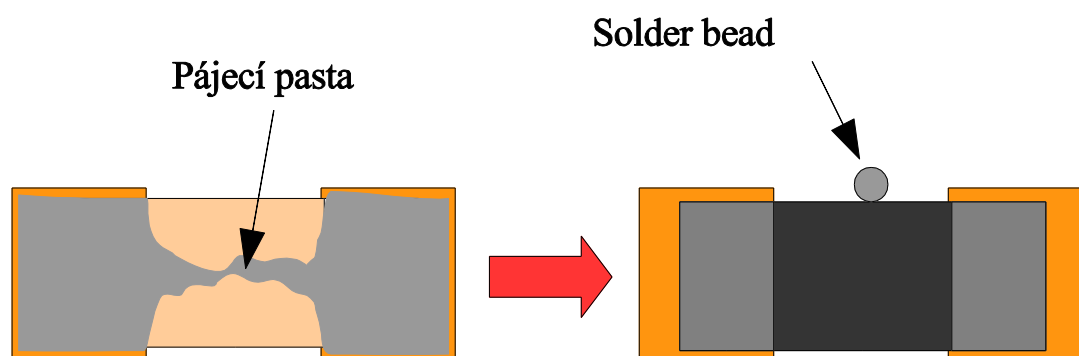
Mikrokuličky pájky mohou být zapříčiněny také roztečením pasty po jejím natištění nebo při umístění komponentu v osazovacím stroji. [4]



Obr. 3.9 Mikrokuličky pájky u QFN

3.3.2 Solder bead

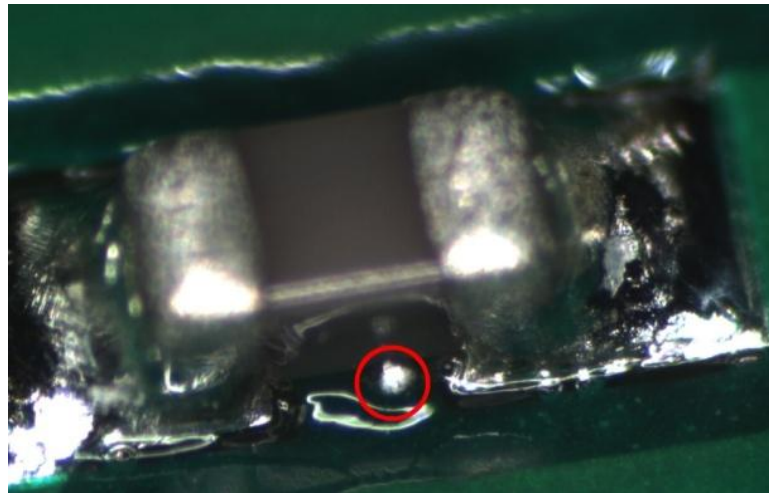
Solder bead se vyznačuje přítomností velké kuličky pájky, která je usazená ve zbytku tavidla v nejbližších místech připájené součástky, zpravidla na jejím boku. Tento případ defektu je nejčastěji pozorovaný u součástek, které mají velmi malou vzdálenost mezi vývody. Patří sem čipové pasivní součástky (rezistory, kapacitory), TSOP, SOT a D-PAK tranzistory. Solder bead může způsobit zkrat mezi komponenty nebo pájecími ploškami. Typický proces vzniku defektu solder bead je takový, že během umístění součástky na pastou natištěné plošky je část pasty stlačena pod tělo komponentu. V průběhu procesu přetavení se tato uvízlá část pájky díky svým kohezním vlastnostem vytvaruje do velké kuličky pájky. Povrchové napětí chladnoucí pájky stahuje součástku blíže k ploškám DPS, a to má za následek vytlačení kuličky pájky zespodu komponentu na stranu součástky, kde zůstane. Obecně řečeno, za vznik solder bead může nadměra množství pasty. Od toho se pak z velké části odvíjejí řešení, která mají vzniku tohoto defektu zabránit. [27]



Obr. 3.10 Vznik solder bead [4]

Jedná se o úpravy těchto parametrů:

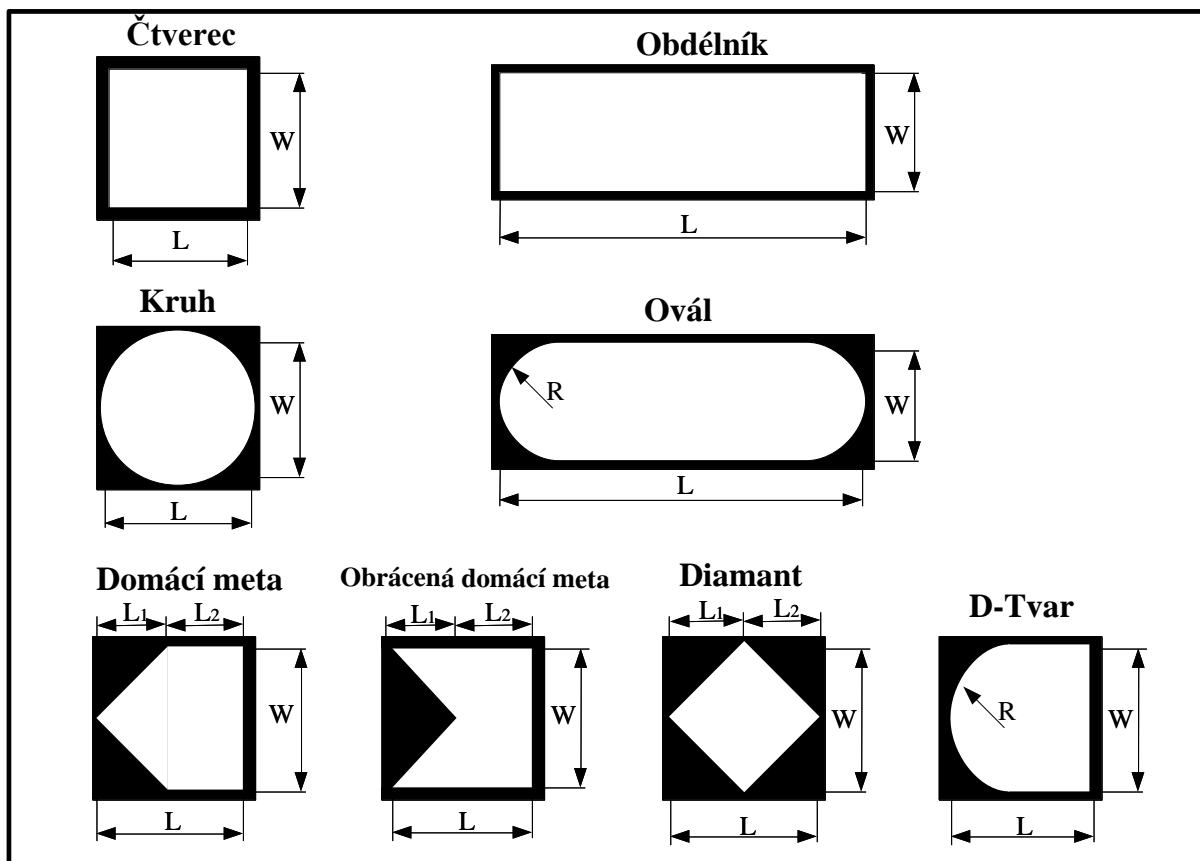
- velikost a tvar otvorů šablony,
- tloušťka šablony,
- mezera mezi šablonou a DPS během tisku,
- rychlost a tlak stěrek,
- teplotní profil.



Obr. 3.11 Solder bead

Velikost a tvar otvorů šablony

Patrně nejefektivnější způsob jak předcházet defektu solder bead je úprava velikosti a tvaru otvorů šablony pro tisk pájecí pasty. V minulosti bylo běžné, že otvory byly naprosto totožného tvaru a velikosti jako příslušné pájecí plošky na DPS. V dnešní době se využívá minimálně 10% redukce. To znamená zmenšení všech stran otvoru vůči plošce o danou procentní hodnotu. Tvary otvorů jako ovál, trojúhelník a další netradiční formy jsou používány s různou mírou úspěchu. Hojně využívanou redukcí je tzv. „domácí meta“ (home plate – výraz pochází z baseballu), která snižuje množství natisknuté pasty a zabraňuje roztékání pasty z plošky. Kromě typu a velikosti redukce je klíčová také pozice pasty na plošce. [27]



Obr. 3.12 Příklady redukci otvorů šablony [28]

Tisková mezera

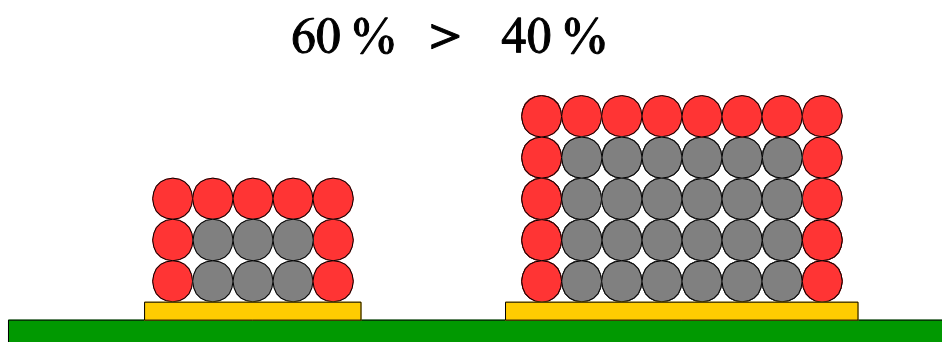
Tisková mezera (snap-off distance) je nastavitelná vzdálenost mezi svrchní plochou DPS a spodní plochou šablony během tisku pájecí pasty. Někdy může být tiskové mezery využito pro snadnější uvolnění pasty z otvoru šablony, avšak bude natištěno na pájecí plošku větší množství pasty než při nulové tiskové mezeře („on-contact“, „zero snap-off“). [27]

Teplotní profil

K zamezení tvorby solder bead může pomoci úprava teplotního profilu přetavovací pece. Doporučený maximální interval rychlosti předehřevu je 0,8 °C/s až 1,5 °C/s. Pokud je pasta prohřívána příliš rychle, rozpouštědla v tavidle se začnou velmi rychle vypařovat a způsobí tak malé „exploze“, které po sobě zanechají solder bead izolovaný od pájeného spoje. V případě velmi pomalého prohřátí, se tavidlo z natisknuté pasty rozteče do okolí pájeného spoje a hrozí, že během toho může s sebou vzít částice pájecí pasty. [27, 15]

3.4 Solder graping

Solder graping znamená špatné přetavení pájecí pasty, kdy jsou na povrchu pájeného spoje patrná pájecí zrna, která se z důvodu velké míry oxidace neschlila zcela dohromady. Anglický výraz pro vadu vychází z podobnosti s trsem hroznového vína (grape = hrozen). Nejvíce se tento defekt vyskytuje, je-li nanášeno pouze malé množství pasty. To je typické pro malé pasivní komponenty s pouzdry 0201 nebo 01005. Malé množství pasty vystavuje okolí relativně více pájecích zrn. Vzniká tak plocha, která bude ve velké míře oxidovat a nebude docházet k požadované koalescenci. Tato problematika je naznačena na obrázku *Obr 3.13*, kde je patrný větší relativní počet pájecích zrn na povrchu menšího nánosu pasty oproti většímu nánosu. [29, 30]



Obr. 3.13 Relativní podíly ploch nanesené pájecí pasty

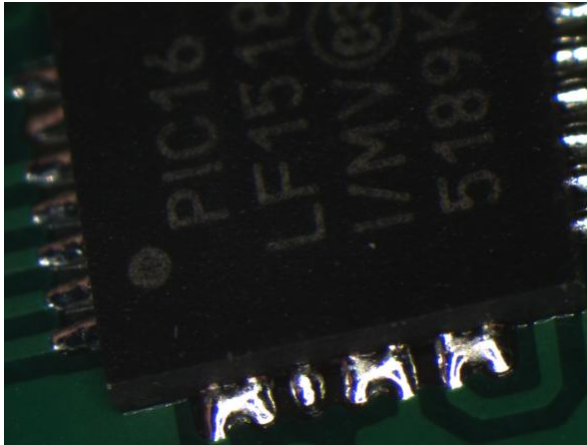
Prvním obecným opatřením, kterým lze zčásti defektu předcházet, je maximalizovat nános pasty a zároveň respektovat velikost součástky. Druhým řešením může být úprava teplotního profilu zkrácením doby temperování, případně použitím profilu typu RTS. [29, 30]



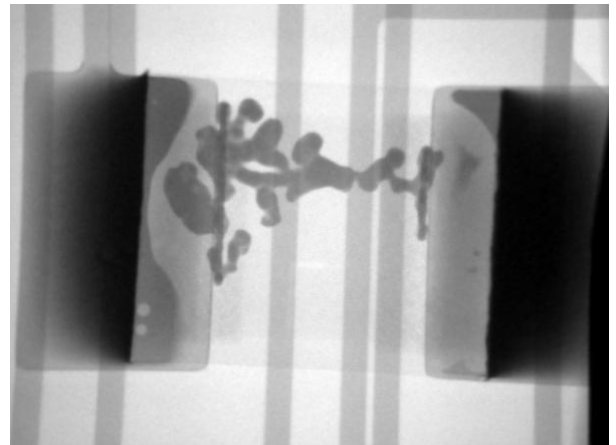
Obr. 3.14 Příklady defektu solder graping – převzato z [29, 30]

3.5 Zkrat

Zkrat, čili vodivé spojení dvou pájecích plošek pájkou, se nejčastěji vyskytuje u integrovaných obvodů (např. pouzdra QFP a QFN). Čím jemnější rozteče součástka má, tím je riziko zkratu větší. Zkratky mohou vznikat z tzv. můstků (viz kapitola 3.1) nebo díky solder bead (kapitola 3.3.2).



Obr. 3.15 Zkratky u QFN



Obr. 3.16 Zkrat pod čipovou součástkou – převzato z [31]

3.6 Horký sesuv pájecí pasty

Druhým typem sesutí pájecí pasty je tzv. „horký sesuv“ (první typ – viz kapitola 2.6). Vyskytuje se v průběhu procesu přetavení pájecí pasty. Je patrný během přehřevu a temperování, kdy dochází k aktivaci tavidla. V tuto chvíli je obtížné udržet relativně těžká pájecí zrna pohromadě ve tvaru, ve kterém byla natištěna. Díky gravitaci se následně tvar natištěné pasty začne deformovat. [20]

4 Experimentální část diplomové práce

4.1 Vzorky testovaných pájecích past

Pro experiment byly vybrány čtyři vzorky pájecích past. Tři z nich jsou podle údajů v katalogových listech po jistou dobu teplotně stabilní a není třeba je skladovat při snížené teplotě. Čtvrtým vzorkem je pájecí pasta, která by měla být skladována při teplotě do 10 °C. Tato pasta byla vybrána jako referenční vzorek pro srovnání pájecích a tiskových vlastností teplotně stabilních past a past konvenčního typu. Všechny vzorky past obsahují stejnou kovovou složku SAC 305 a jsou typu 4. Ve srovnávací tabulce *Tab 4.1* jsou některé vlastnosti, které uvádí výrobci pájecích past v katalogových listech. V následujících odstavcích jsou všechny testované vzorky krátce představeny.

AIM M8

Pájecí pasta M8 od americké společnosti AIM je prezentována jako nástupce pasty NC258. Rychlost stěrek během tisku pasty AIM M8 může být až 152 mm/s, což je nejrychlejší tisk ze všech zkoumaných vzorků. Tato pasta může být skladována až 3 měsíce při teplotě 22 °C.

Indium 8.9HF

Pájecí pastu 8.9HF, kterou vyrábí americká firma Indium, je podle katalogového listu nutné skladovat po celou dobu životnosti pasty při teplotě do 10 °C. Jedná se o jediný vzorek, který je nutné skladovat při snížené teplotě. Co se týká teplotního profilu, má pasta 8.9HF oproti ostatním vzorkům největší procesní okno pro maximální teplotu (229 ~ 267 °C).




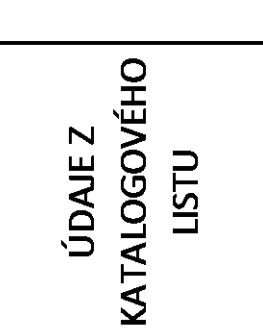




KOKI S3X48-M406ECO

Třetím zkoumaným vzorkem je pájecí pasta S3X48-M406ECO od japonského výrobce KOKI. Tato pasta je prezentována jako teplotně stabilní. Podle výrobce je možné pastu skladovat až 6 měsíců při teplotě do 30 °C. Minimální doba, kterou pasta může strávit na šabloně bez ztráty deklarovaných vlastností, je podle katalogového listu 8 hodin.

Loctite GC 10

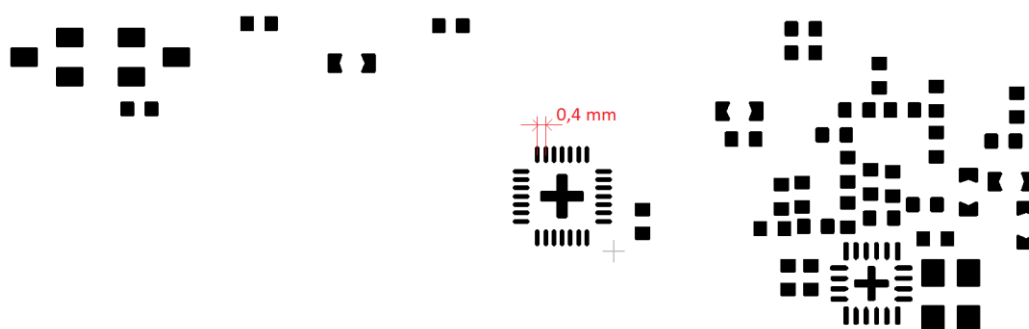
Poslední vzorek je pájecí pasta GC 10 od americké společnosti Loctite. Tato pájecí pasta je dle údajů v katalogovém listu teplotně nejstabilnější, protože je možné pájecí pastu skladovat až 12 měsíců při teplotě 26,5 °C, 1 měsíc při 40 °C a 1 týden při 50 °C. Deklarovaná doba pasty na šabloně je delší než 16 hodin, čímž převyšuje všechny testované vzorky.

Tab. 4.1 Srovnávací tabulka vybraných vzorků pájecích past [36, 37, 38, 39]

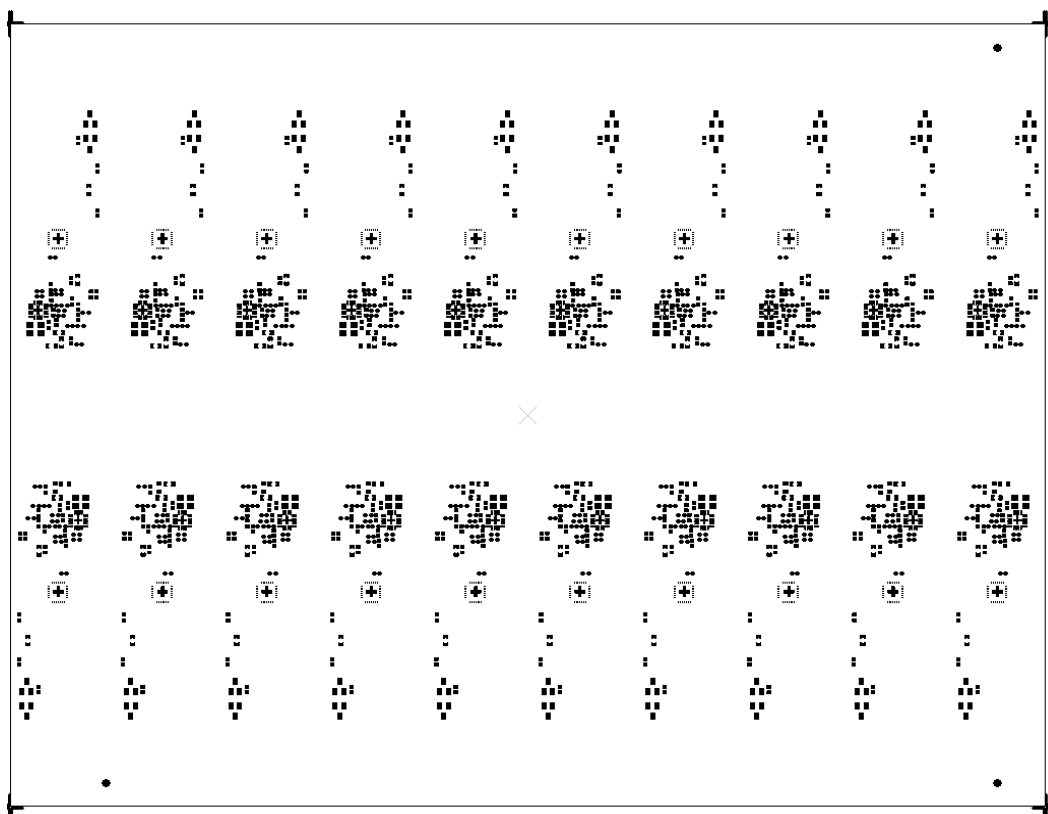
<p>ÚDAJE Z KATALOGOVÉHO LISTU</p>				
<p>Výrobce</p>	<p>AIM</p>	<p>Indium Corporation</p>	<p>KOKI</p>	<p>Loctite</p>
<p>Název</p>	<p>M8</p>	<p>Indium 8.9HF</p>	<p>S3X48-M406ECO</p>	<p>GC 10</p>
<p>Typ tavidla</p>	<p>ROLO</p>	<p>ROLO</p>	<p>ROLO</p>	<p>ROLO</p>
<p>Podíl kovové složky [%]</p>	<p>89,00 (13), 88,50 (14)</p>	<p>89,00 (13), 88,50 (14)</p>	<p>88,50</p>	<p>88,50</p>
<p>Velikost pájecích zrn</p>	<p>Typ 3, Typ 4</p>	<p>Typ 3, Typ 4</p>	<p>Typ 3, Typ 4</p>	<p>Typ 4</p>
<p>Doba skladování [měsíc]</p>	<p>12 <0 °C; 12°C; 3 <13 °C; 22°C></p>	<p>6 (<10 °C)</p>	<p>6 <0 °C; 30 °C></p>	<p>12 (26,5 °C), 1 (40 °C), 0,25 (50 °C)</p>
<p>Tlak stěrek [kg/25mm]</p>	<p>0,4 ~ 0,7</p>	<p>0,45 ~ 0,675</p>	<p>10 ~ 50</p>	<p>25 ~ 125</p>
<p>Rychlost tisku [mm/s]</p>	<p>13 ~ 152</p>	<p>25 ~ 100</p>	<p>0,5 ~ 10,0</p>	<p>25 ~ 125</p>
<p>Oddělovací rychlost [mm/s]</p>	<p>3,0 ~ 20,0</p>	<p>2</p>	<p>(0)</p>	<p>(0)</p>
<p>Doba temperace [h]</p>	<p>(0)</p>	<p>> 8</p>	<p>> 8</p>	<p>> 16</p>
<p>Doba na šabloně [h]</p>	<p>(0)</p>	<p>> 8</p>	<p>> 8</p>	<p>> 16</p>
<p>TEPLOTNÍ PROFIL</p>				
<p>Peak Temperature [°C]</p>	<p>240 ~ 245</p>	<p>229 ~ 267</p>	<p>230 ~ 250</p>	<p>244 ~ 260</p>
<p>Time Above Liquidus [s]</p>	<p>30 ~ 60</p>	<p>30 ~ 100</p>	<p>> 30</p>	<p>37 ~ 87</p>
<p>Rate of Rise [°C/s]</p>	<p>1,5 ~ 3,0</p>	<p>0,5 ~ 2,5</p>	<p>1,0 ~ 3,0</p>	<p><1,5</p>
<p>Soak Temperature [°C]</p>	<p>150 ~ 170</p>	<p>200 ~ 210</p>	<p>110 ~ 190</p>	<p>150 ~ 200</p>
<p>Soak Time [s]</p>	<p>45 ~ 75</p>	<p>< 120</p>	<p>60 ~ 120</p>	<p>140 ~ 205</p>

4.2 Testovací DPS

Pro testovací účely byly použity DPS, které se v IMI CZ používají k výrobě reálného produktu – dálkového ovladače garážových vrat. Na obrázku *Obr 4.1*, který je získán z Gerber dat, je patrný design otvorů šablony, jež byla použita pro nátisk pájecí pasty. Hlavním důvodem, proč byl vybrán tento produkt, je součástka s pouzdem QFN o rozteči 0,4 mm, díky které se jedná o nejkritičtější komponent s vysokými nároky na tisk pasty. Otvory šablony korespondující s ploškami na DPS mají 10% redukci. Na *Obr 4.2* je vidět celý panel složený z celkových dvaceti totožných DPS včetně fiduciálních bodů.



Obr 4.1 Testovací DPS



Obr 4.2 Panel DPS

4.3 Použité stroje a jejich nastavení

V této podkapitole jsou představeny některé stroje včetně nastavovaných parametrů, které byly použity v průběhu experimentů.

4.3.1 DEK Horizon 03ix

Pro nátisk pájecí pasty byla použita platforma Horizon 03ix od společnosti DEK. Šablona pro tisk pasty byla vyrobena galvanickou cestou a měla tloušťku 100 μm . Pastu po šabloně roztíraly kovové stěrky. Pro všechny vzorky past byly nastaveny stejné parametry s jedinou výjimkou. Pájecí pasta Loctite GC 10 měla nastavena větší tlak stěrek, protože při nastavené hodnotě 7 kg zanechávaly stěrky stopy pasty v oblasti otvorů šablony.

Tab 4.2 Nastavené parametry pro tisk pájecí pasty

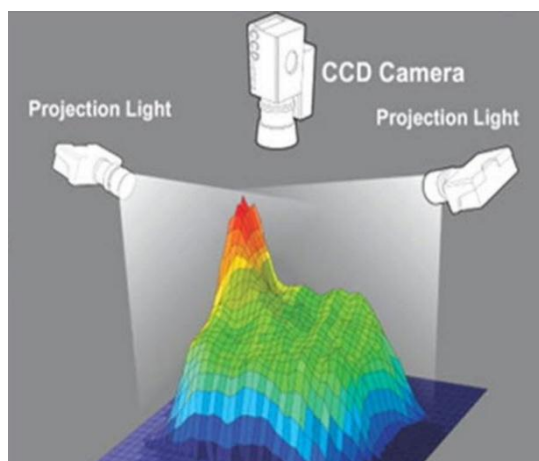
Délka stěrek [mm]	250
Tlak stěrek [kg]	7 (8,4 pro GC10)
Rychlost tisku [mm/s]	50
Oddělovací rychlost [mm/s]	3
Teplota vzduchu ve stroji [°C]	22,5 - 23,5
Relativní vlhkost vzduchu [%]	40 - 43



Obr 4.3 DEK Horizon 03ix - převzato z [32]

4.3.2 SPI Koh Young KY8030-2

Kontrola nátisku pájecí pasty byla provedena pomocí stroje SPI KY8030-2 od firmy KOH YOUNG. Toto zařízení dokáže zobrazit trojrozměrný model natištěné pájecí pasty a vyhodnotit ukazatele, které jsou pro správný tisk pájecí pasty stěžejní. Je to například výška, pozice, množství a plocha natisknuté pasty. Princip SPI spočívá v projekci světla na natištěnou pájecí pastu a následném snímání kamerou s vysokým rozlišením. Podle barvy jednotlivých pixelů snímku systém vyhodnotí, jestli byla pasta natisknuta správně či nikoliv. SPI velkou mírou dokáže usnadnit proces nastavení a „ladění“ tiskové platformy. Kromě toho je schopné uživateli zobrazit SPC diagram a případně uživatele za chodu stroje upozornit, že proces tisku pasty není stabilní.



Obr 4.4 Princip snímání SPI [34]



Obr 4.5 SPI KY8030-2 [33]

4.3.3 Osazovací stroje Yamaha YS12 a YS24

Pro osazení panelů DPS součástkami byly použity dva osazovací stroje od firmy Yamaha. Jsou to modely YS12 a YS24, které jsou v SMT lince za sebou a pracují tak, že každý ze strojů osazuje danou část komponentů. Osazovací program je optimalizován tak, aby se poměr využití (working ratio) u obou strojů blížil hodnotě 100 %. Yamaha YS12 má osazovací kapacitu 36 000 CPH (Components per Hour) a Yamaha YS24 se dvěma stanovišti pro osazování (Dual stage) disponuje osazovací kapacitou 72 000 CPH.

4.3.4 Přetavovací pec Heller 1809 MKIII

Přetavovací pec 1809 MK III disponuje devíti topnými zónami shora i zdola a dvěma chladicími zónami. Pec má speciální kolej pro tzv. centrální podporu, která zabraňuje prohýbání panelů DPS po jejich zahřátí. V této peci je možné nastavovat pouze rychlost kolejí a teplotu jednotlivých topných zón. Pro experiment byly připraveny dva teplotní profily – krátký profil a dlouhý profil. Krátký profil měl rychlost posuvu vyšší než dlouhý profil, a proto celkově trval kratší dobu. Měl také strmější nárůst teploty, kratší dobu předehřevu, kratší dobu nad likvidem pájky a rychlejší chlazení.

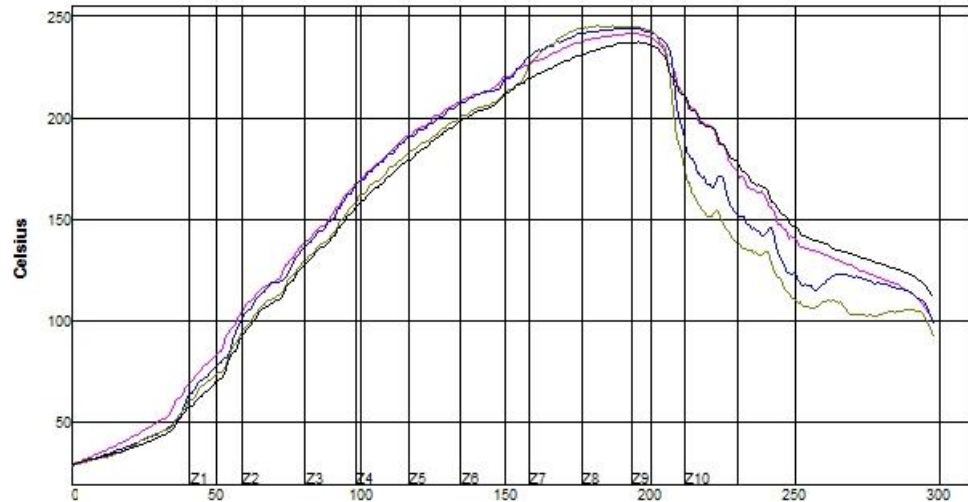
Tab 4.3 Nastavení krátkého profilu

Zóna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Horní	135	150	175	215	220	235	250	255	250	130	100
Dolní	135	150	175	215	220	235	250	255	250	-	-
Rychlost posuvu: 86 cm/min											

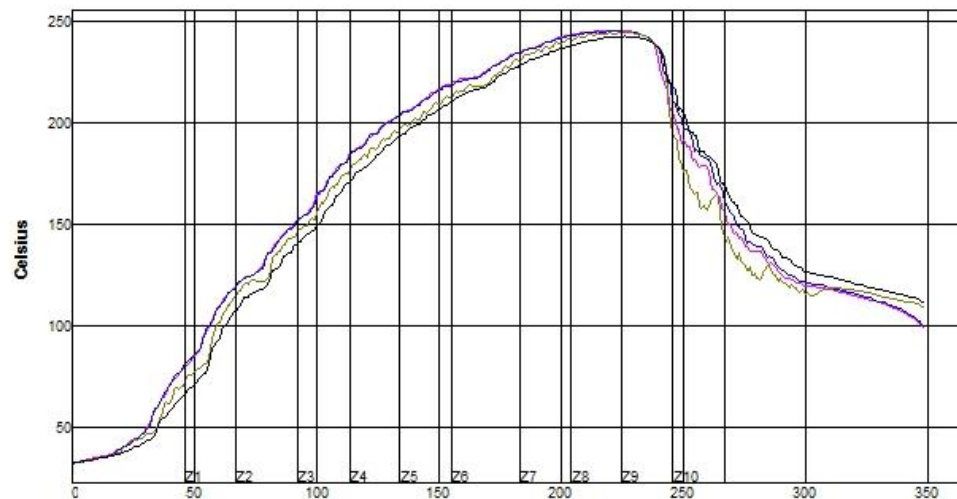
Tab 4.4 Nastavení dlouhého profilu

Zóna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Horní	135	150	175	220	225	240	250	255	250	100	100
Dolní	135	150	175	220	225	240	250	255	250	-	-

Rychlost posuvu: 70 cm/min



Obr 4.6 Krátký teplotní profil



Obr 4.7 Dlouhý teplotní profil

V následující tabulce jsou pro srovnání uvedeny průměrné hodnoty důležitých parametrů obou teplotních profilů.

Tab 4.5 Srovnání důležitých parametrů profilů

Profil	Max. nárůst teploty [°C/s] (20 - 150°C)	Předeheřev [s] (150 - 221°C)	TAL [s] (>221 °C)	Max. teplota [°C]	Rychlost chlazení [°C/s] (221 - 50 °C)
Krátký	1,65	63,50	52,42	242,22	2,85
Dlouhý	2,07	70,62	78,05	244,70	2,62

4.4 Návrh prvního experimentu

První experiment si kladal za cíl porovnat stabilitu testovaných vzorků pájecích past v průběhu tisku a ověřit tzv. „Stencil life“. Před každou sérií tisku panelů byla pauza, jejíž délka se po každé sérii navyšovala. Nátisk pasty byl po každém tisku vyhodnocen pomocí stroje SPI. V tabulce je naznačen celý průběh experimentu. Z důvodu časové náročnosti byla maximální délka pauzy omezena na 90 minut, čímž byla docílena doba pasty na šabloně delší než 165 minut. V každé sérii bylo natištěno a otestováno 5 panelů DPS, které byly před každou další sérií vyčištěné izopropylalkoholem. Po každém tisku bylo provedeno automatické strojní čištění spodní strany šablony pomocí vakua a suché utěrky.

Tab 4.6 Návrh prvního experimentu

Série	Pauza před tiskem [min]	Stencil life [min]
1	0	0
2	2	2
3	4	6
4	6	12
5	8	20
6	10	30
7	15	45
8	30	75
9	90	165

4.5 Vyhodnocení prvního experimentu

Dlouhá doba strávená na šabloně se nepříznivě projevila u vzorků past AIM a KOKI, kdy bylo na některé pájecí plošky natištěno nedostatečné množství pasty. Nutno ovšem podotknout, že se tato vada vyskytla až v poslední sérii tisku pasty, čili po 90minutové pauze před tiskem. Na druhé straně vzorky past od firem Loctite a Indium neprojevily zhoršené tiskové vlastnosti. Během testu pasty Loctite bylo zaznamenáno po poslední tiskové sérii nedostatečné množství pasty pouze u jedné pájecí plošky. V průběhu testu pasty od společnosti Indium se dokonce nevyskytla ani jedna vada. Tento výsledek byl velmi překvapivý, neboť pasta Indium 8.9HF není prezentována jako teplotně stabilní. Výsledek tohoto experimentu je zahrnutý v celkovém hodnocení v 5. kapitole.

Tab 4.7 Počet defektů

Pájecí pasta	Počet defektů
Loctite GC10	1
KOKI M406ECO	20
AIM M8	145
Indium 8.9HF	0

4.6 Návrh druhého experimentu

Cílem druhého experimentu bylo porovnat pájecí pasty s ohledem na výslednou kvalitu zapájeného spoje. Pro účely vyhodnocení byly sledovány chyby pájených spojů po procesu přetavení a mechanická pevnost pájených spojů. Experiment byl navržen pomocí metody Design of Experiment. Z tabulky lze vidět, že experiment má tři faktory. Prvním faktorem je pájecí pasta a má čtyři úrovně, protože byly testovány čtyři vzorky pájecích past. Druhým faktorem je pauza před tiskem, která má úrovně 0 a 15 minut. Tento faktor byl vybrán, protože se poměrně často stává, že je z různých důvodů chod SMT linky pozastaven. Třetím faktorem ovlivňující experiment je použitý teplotní profil v přetavovací peci. Tento faktor má také dvě úrovně. Pro experiment byly použity dva různé teplotní profily lišící se dobou trvání (viz 4.3.4). Takto navržený experiment měl na svém výstupu 16 různých variant vzorků DPS. Pro každou variantu byl osazen a zapájen jeden panel DPS, který obsahoval 20 DPS. Celkové množství vzorků DPS bylo tedy 320 kusů.

Tab 4.8 Návrh druhého experimentu

Pasta	Teplotní profil	Pauza před tiskem
Loctite GC10	krátký	0 min
Loctite GC10	krátký	15 min
Loctite GC10	dlouhý	0 min
Loctite GC10	dlouhý	15 min
KOKI M406ECO	krátký	0 min
KOKI M406ECO	krátký	15 min
KOKI M406ECO	dlouhý	0 min
KOKI M406ECO	dlouhý	15 min
AIM M8	krátký	0 min
AIM M8	krátký	15 min
AIM M8	dlouhý	0 min
AIM M8	dlouhý	15 min
Indium 8.9HF	krátký	0 min
Indium 8.9HF	krátký	15 min
Indium 8.9HF	dlouhý	0 min
Indium 8.9HF	dlouhý	15 min

4.7 Vyhodnocení druhého experimentu

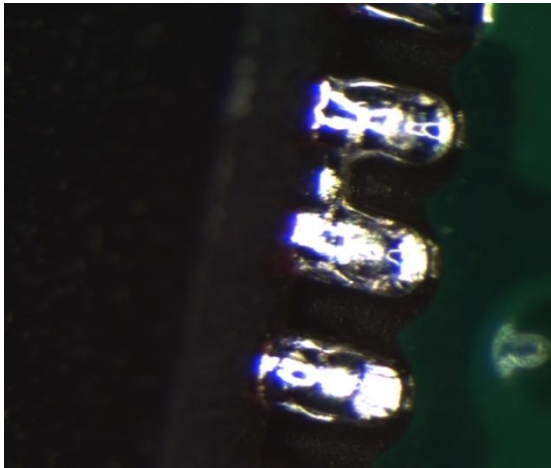
Pro účely vyhodnocení druhého experimentu byly všechny vzorky po procesu přetavení podrobeny optické kontrole pomocí mikroskopu (Olympus LEXT OLS 3000) a byly zaznamenány veškeré nalezené vady. Poté byly určité vzorky zrentgenovány (přístroj GE phoenix v|tome|x s 240) a rentgenové snímky byly poté využity pro zkoumání voidů. Třetina všech vzorků byla umístěna do klimatické komory, aby byl zjištěn vliv zrychleného stárnutí na mechanickou pevnost spoje. Zkoušky pro vyhodnocení mechanické pevnosti zapájeného spoje proběhly s pomocí trhacího zařízení LABTEST 3.030 od firmy LABORTECH. V následující tabulce *Tab 4.9* jsou veškeré zaznamenané hodnoty. Jednotlivé buňky jsou barevně rozlišeny, kde zelená barva značí nejlepší výsledky a naopak červená nejhorší. V dalších odstavcích jsou pak popsány významy jednotlivých výsledků a postupy, jaké byly použity k jejich zjištění. Dále jsou připojeny grafy znázorňující vliv pasty na daný výstup a také histogramy, které popisují vliv jednotlivých vstupních faktorů na daný výstup. Pokud je sloupec vnesený do kladných hodnot, znamená to, že daný faktor zvyšuje hodnotu výstupu, pokud byl nastaven na vyšší úroveň („dlouhý“ teplotní profil, „15 min“ pauza před tiskem). V případě sloupce vyvedeného do záporných hodnot, faktor zvyšuje hodnotu daného výstupu, pokud byl nastaven na nižší úroveň („krátký“ teplotní profil, „0 min“ pauza před tiskem).

Tab 4.9 Tabulka výsledků

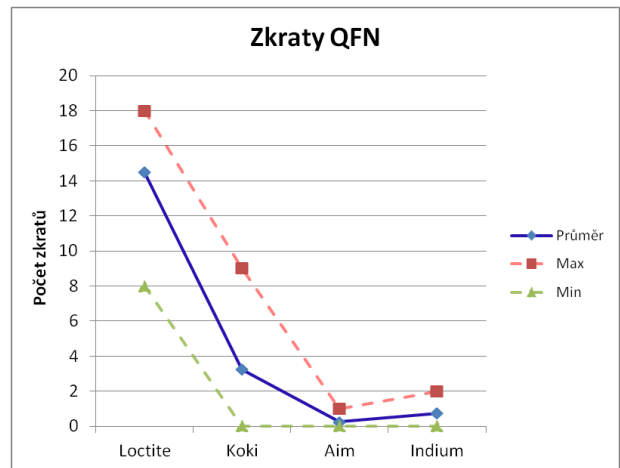
Test	Pasta	Profil	Pauza	Zkratky QFN0,4	Solder Beads	Kuličky pájky	F QFN04 [N]	F _{AGE} QFN04 [N]	F SOT23 [N]	F _{AGE} SOT2 [N]	Počet voidů	Plocha voidů [%]	Cp volume	Cp height	Cp area
1	Loctite	K (819A_B)	0	16	3	4,21	248,19	225,17	35,62	32,73	57	34,02	1,5945	1,5189	3,187
2	Loctite	K (819A_B)	15	8	6	8,85	242,52	208,05	35,87	33,44	56	36,38			
3	Loctite	D (819_2)	15	18	3	10,10	238,75	216,10	35,93	32,82	49	28,77			
4	Loctite	D (819_2)	0	16	2	13,95	237,70	213,22	35,56	32,67	57	27,97			
5	Koki	D (819_2)	0	2	0	1,60	248,98	220,45	37,24	33,38	22	17,98			
6	Koki	D (819_2)	15	0	0	3,65	241,67	237,68	37,23	34,05	23	15,26			
7	Koki	K (819A_B)	15	2	0	9,30	245,55	235,27	36,02	34,12	33	16,43	1,6147	1,7744	2,773
8	Koki	K (819A_B)	0	9	0	8,55	251,85	217,62	35,85	33,69	29	12,46			
9	Aim	K (819A_B)	0	0	0	3,70	264,82	231,41	34,33	32,63	13	4,36			
10	Aim	K (819A_B)	15	0	0	4,10	266,72	236,24	33,65	32,53	13	8,67	1,7681	1,9447	2,253
11	Aim	D (819_2)	15	0	0	2,70	245,62	238,90	36,43	33,15	26	10,5			
12	Aim	D (819_2)	0	1	1	1,00	252,92	235,78	35,43	31,46	24	7,67			
13	Indium	D (819_2)	0	0	0	6,90	237,85	222,82	36,61	32,86	32	2,18			
14	Indium	D (819_2)	15	2	1	9,30	248,93	244,28	36,68	32,87	31	3,56	1,647	1,7569	2,179
15	Indium	K (819A_B)	15	1	1	13,10	241,70	246,61	36,07	32,80	22	8,96			
16	Indium	K (819A_B)	0	0	0	20,00	259,48	251,98	36,37	33,46	30	2,113			

Zkratky u QFN04

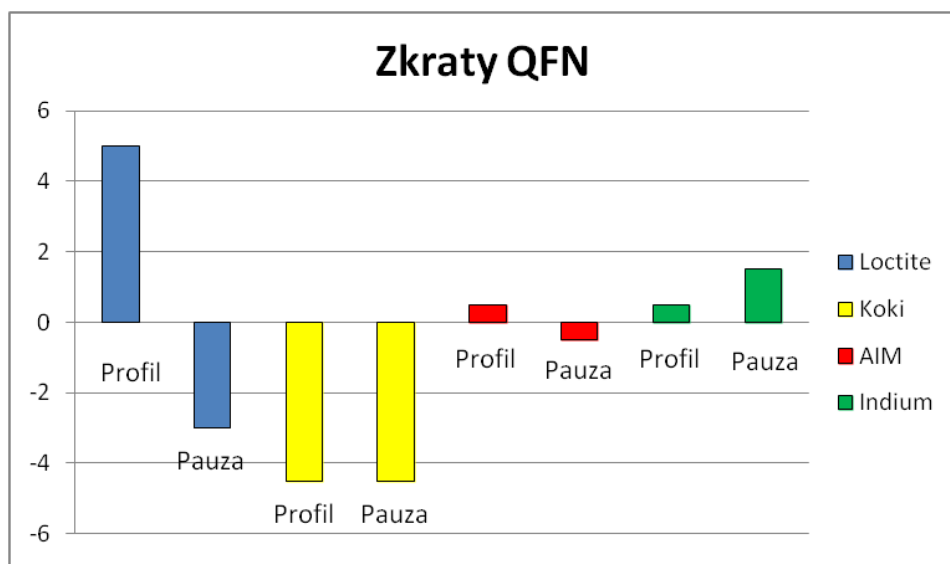
Po zapájení byly nalezeny zkratky pouze na součástkách typu QFN s roztečí 0,4 mm. Téměř všechny byly odhaleny pomocí automatické optické inspekce. Pouze jeden byl zaznamenán až při pozorování mikroskopem, protože byl ukrytý pod tělem součástky, jak je vidět na obrázku *Obr 4.8*. Do tabulky *Tab 4.9* byl zaznamenán počet výskytů zkratů. Celkově nejnižší počet zkratů byl nalezen u vzorků s pájecí pastou AIM M8 (1 zkrat) a KOKI M406ECO (3 zkrat). Nejhorší vlastnosti vedla pasta Loctite GC10.



Obr 4.8 Zkrat ukrytý pod tělem QFN



Obr 4.9 Vliv pasty na tvorbu zkratů

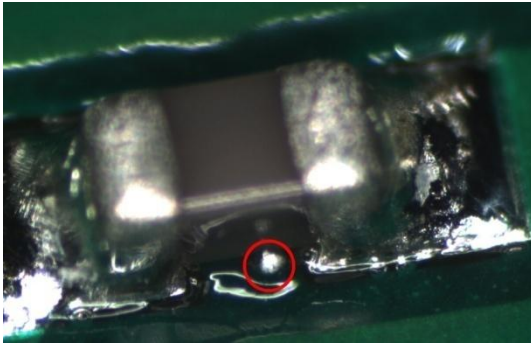


Obr 4.10 Vliv vstupních faktorů na tvorbu zkratů

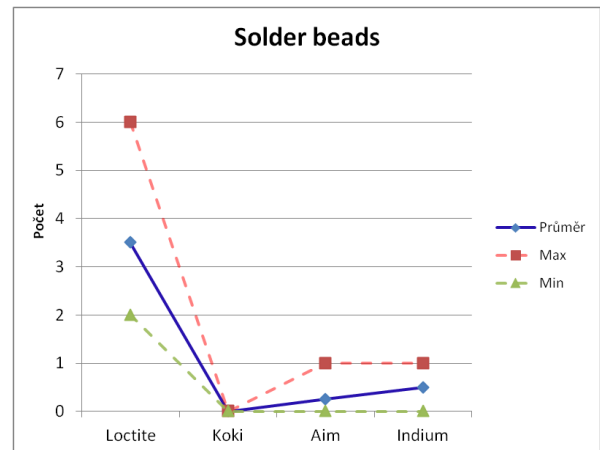
Zajímavým poznatkem je, že u pasty Loctite GC10 měl značný vliv „dlouhý“ teplotní profil, kdežto u pasty KOKI tomu bylo naopak a vznik zkratů podporoval „krátký“ teplotní profil.

Solder bead

Defekt solder bead se vyskytoval pouze u čipových součástek s pouzdry 0603 a 0402. V tabulce *Tab 4.9* je vždy uvedena četnost. Nejlépe si v tomto ohledu vedla pasta od firmy KOKI, protože u vzorků s touto pastou nebyl nalezen jediný defekt solder bead. Špatně si nevedly ani pasty od AIM a Indium, u kterých byl pozorován jeden respektive dva výskyty.



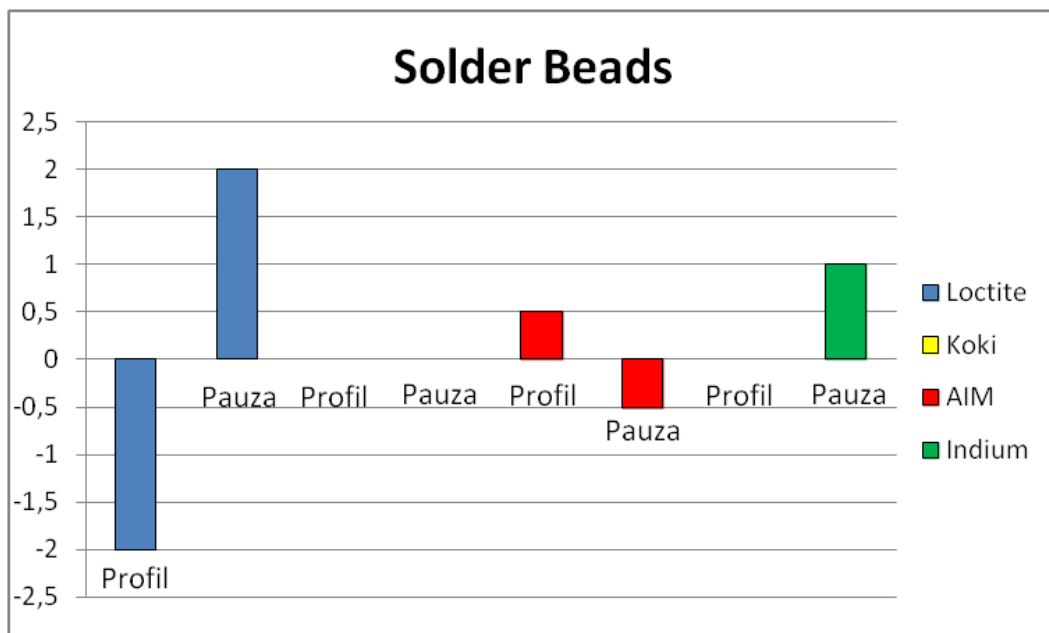
Obr 4.11 Solder bead



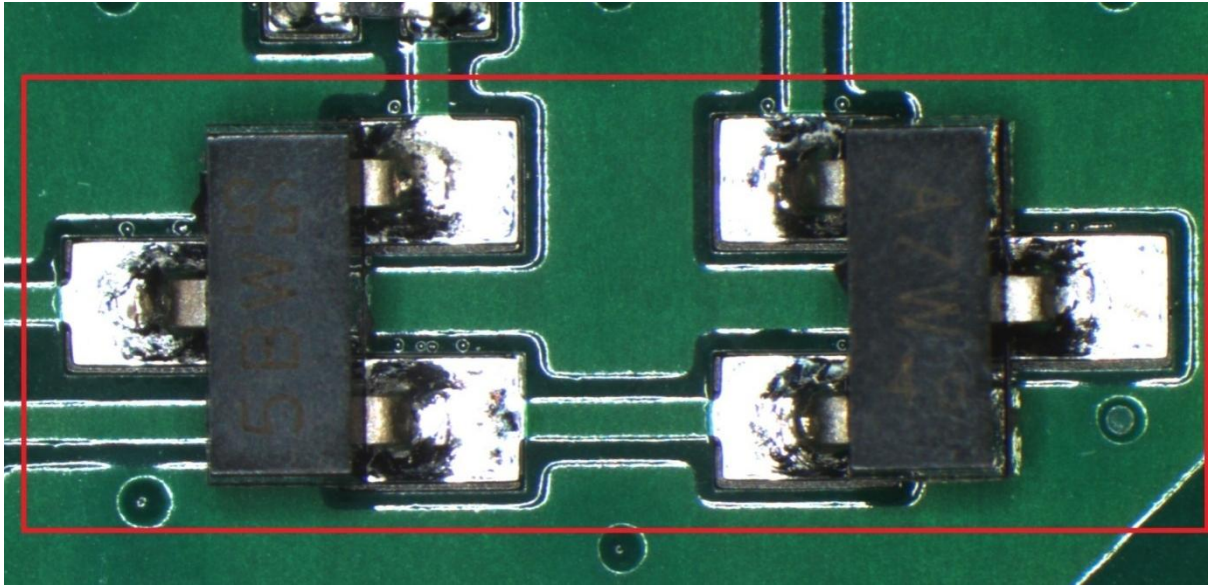
Obr 4.12 Vliv pasty na tvorbu solder bead

Kuličky pájky

Z důvodu zjednodušení byl defekt zvaný „kuličky pájky“ hodnocen vždy na stejné ploše v okolí dvou součástek SOT-23, kde byly spočítány veškeré kuličky pájky a následně zaznamenány. Plocha, jež byla kontrolována, je naznačena na obrázku *Obr 4.14*. V tabulce *Tab 4.9* je průměrný počet kuliček pájky pro každou variantu.

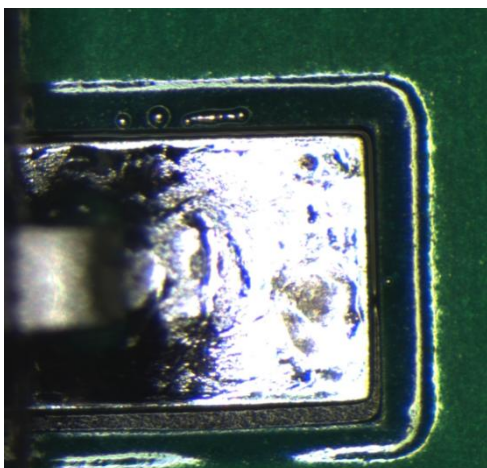


Obr 4.13 Vliv vstupních faktorů na tvorbu solder bead

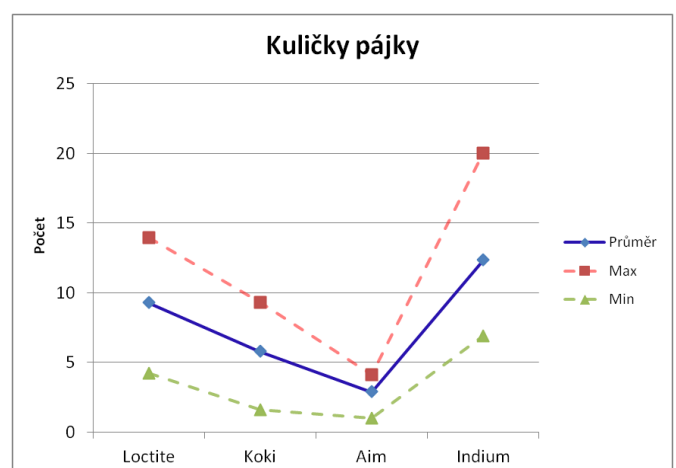


Obr 4.14 Zkoumaná oblast na kuličky pájky

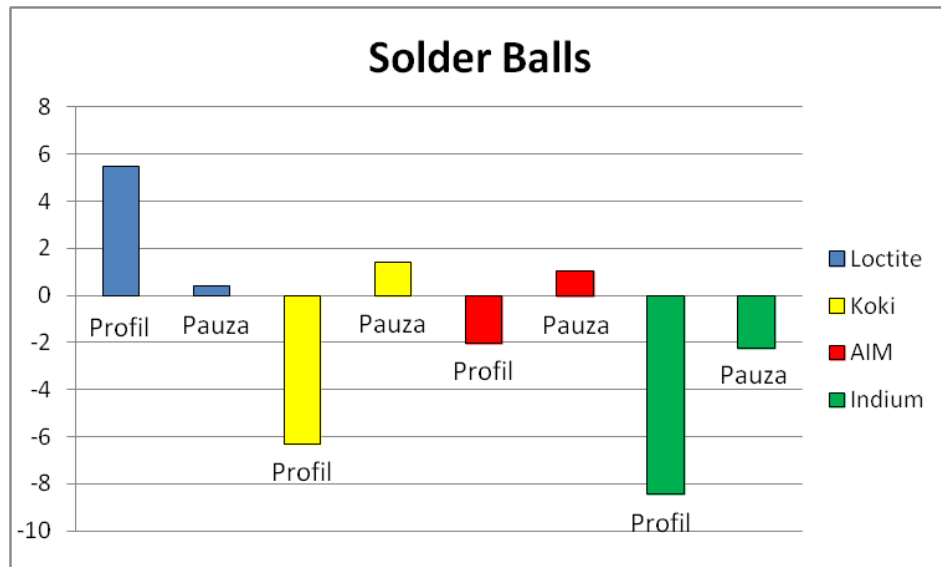
Nejnižší průměrný počet kuliček pájky vykázala pasta AIM, nejvíce pasta od firmy Indium, která měla v mnoha případech kuličky spojené do klastrů. V tomto parametru se pravděpodobně nejvíce projevila výhoda teplotně stabilních pájecích past, které měly lepší výsledky oproti zástupci past, jenž je nutné skladovat při snížené teplotě. Z celkové tabulky Tab 4.9 je patrný postupný nárůst výskytu kuliček pájky s časem, který pájecí pasta strávila na šabloně. To se však netýkalo pájecí pasty AIM, která naopak s postupujícím časem prokazovala méně kuliček pájky. Ačkoliv mohly být výsledky výše uvedeným výrazně ovlivněny, je zde uveden histogram s vlivy vstupních faktorů. Podle výsledků podporoval vznik kuliček pájky u všech vzorků past, kromě vzorku od Loctite, „krátký“ teplotní profil.



Obr 4.15 Kuličky pájky



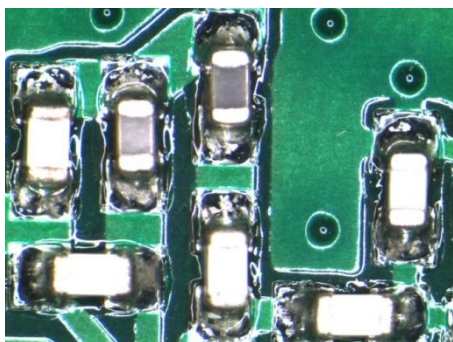
Obr 4.16 Vliv pasty na tvorbu kuliček pájky



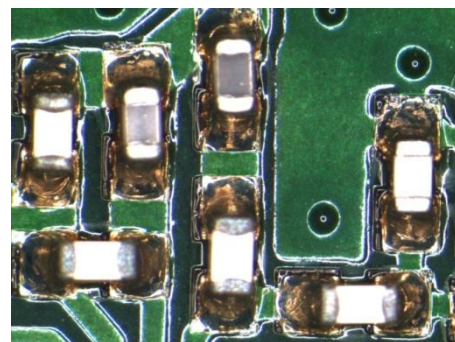
Obr 4.17 Vliv vstupních faktorů na tvorbu kuliček pájky

Mechanická pevnost pájených spojů

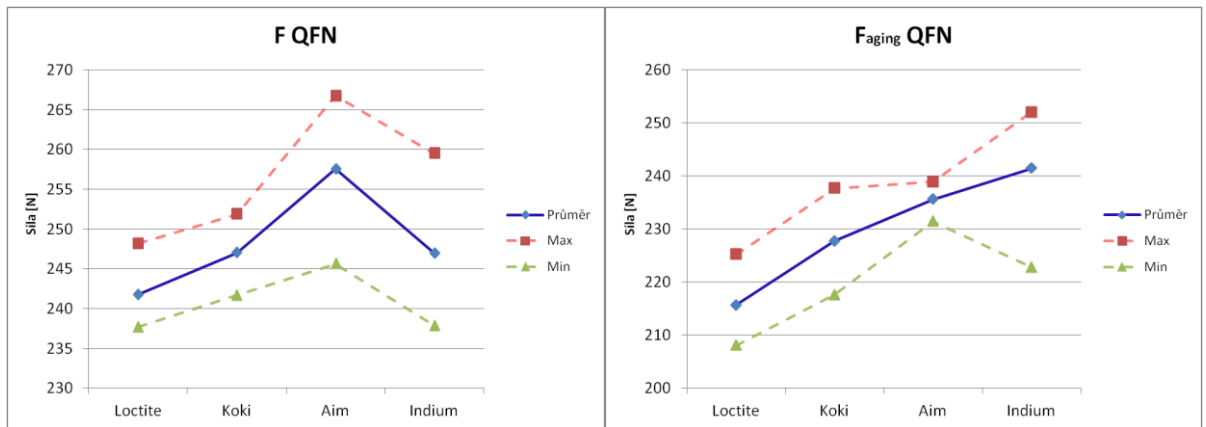
V tabulce *Tab 4.9* jsou uvedeny pro každou variantu průměrné hodnoty maximální síly změřené při odtržení součástky od DPS. Byly odtrhány součástky QFN s roztečí 0,4 mm a SOT-23 jednak ze vzorků nevystavených zrychlenému stárnutí a jednak ze vzorků uložených v peci po 1000 hodin při 125 °C [40]. Na *Obr 4.18 a 4.19* je patrná oxidace pájených spojů po pobytu v peci pro klimatické zkoušky. Kromě oxidace se zrychlené stárnutí projevilo také na pevnosti pájených spojů, když průměrná hodnota maximální síly změřené při odtržení klesla o zhruba 7 % až 11 %. Tyto hodnoty neodpovídají pouze u pasty Indium při odtrhávání součástky QFN, kde byl sledován pokles jen o cca 2,3 %. U součástky QFN si nejlépe vedla pasta AIM, u které byla průměrná potřebná maximální síla k odtržení součástky 257,5 N a špatně nedopadla ani v porovnání s ostatními vzorky past po procesu zrychleného stárnutí, když zaostala cca o 6 N za pastou Indium. Naopak pasta AIM vykazovala nejhorší výsledky mechanické pevnosti u součástky SOT-23, kde naopak ostatní vzorky dopadly celkem podobně. Z křivek je dále patrné, že u vzorků s pastami KOKI a Loctite nebyly pozorovány výrazné rozdíly, co se týká maximální a minimální naměřené hodnoty.



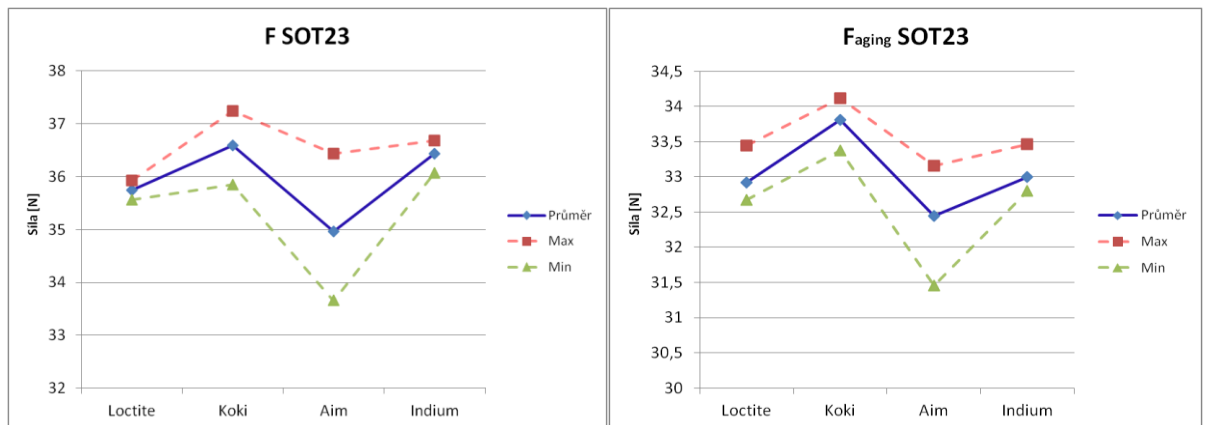
Obr 4.18 Vzorek před klimatickou zkouškou



Obr 4.19 Vzorek po klimatické zkoušce

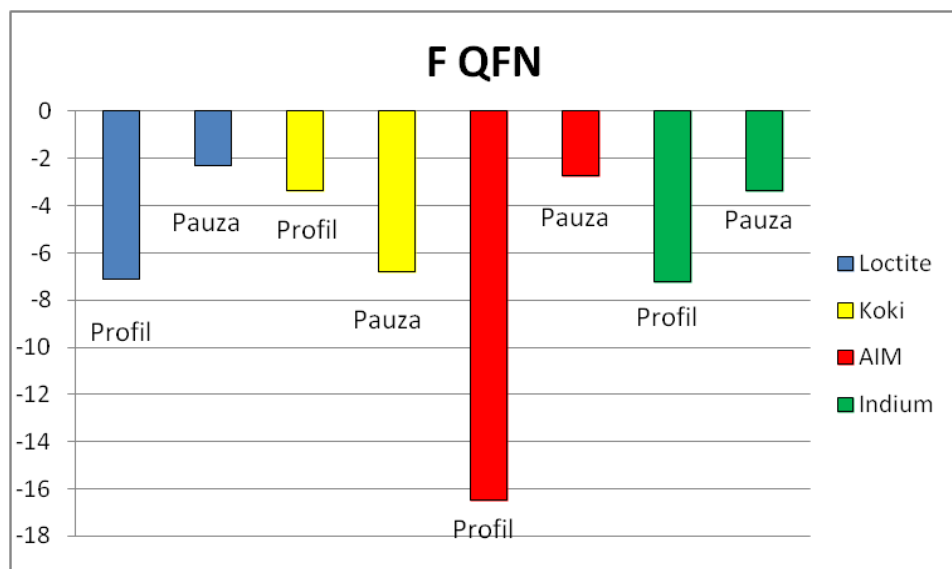


Obr. 4.20 Maximální síla nutná k odtržení součástky QFN před klimatickou zkouškou a po klimatické zkoušce



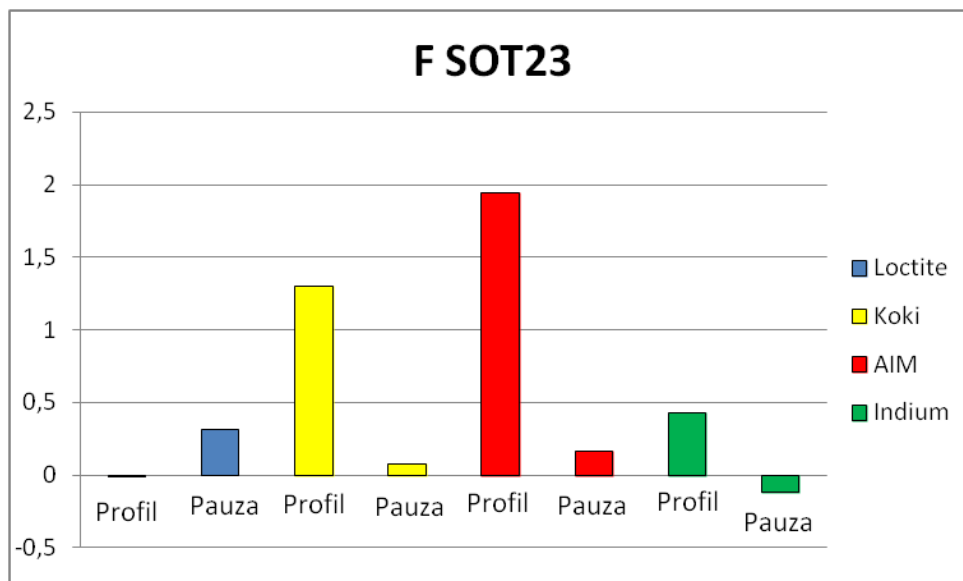
Obr. 4.21 Maximální síla nutná k odtržení součástky SOT-23 před klimatickou zkouškou a po klimatické zkoušce

U všech vzorků podporoval mechanickou pevnost QFN „krátký“ teplotní profil, který nejvíce ovlivňoval vzorky s pastou AIM. Lepších výsledků dosahovaly také vzorky, u kterých byla pauza natisknuta bez předchozí pauzy. Tento faktor však výsledky neovlivnil tolik jako použitý teplotní profil.



Obr. 4.22 Vliv vstupních faktorů na mechanickou pevnost pájeného spoje u QFN

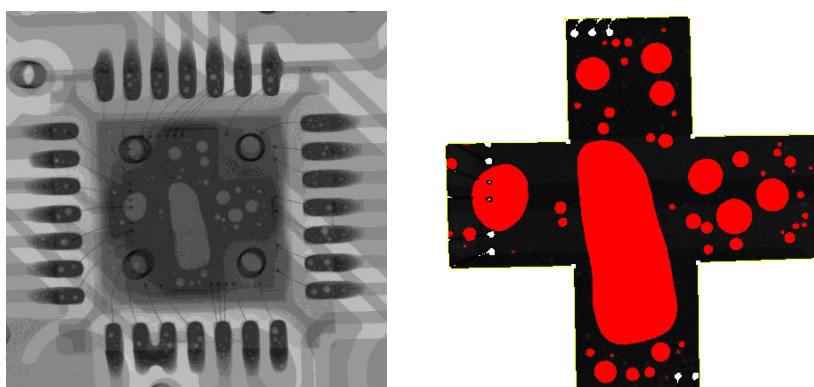
V případě součástky SOT-23 měl příznivější vliv na pevnost spoje dlouhý profil u past KOKI a AIM. U zbylých dvou vzorků nebyl vliv teplotního profilu tolik patrný.



Obr 4.23 Vliv vstupních faktorů na mechanickou pevnost pájeného spoje u SOT-23

Počet a plocha voidů

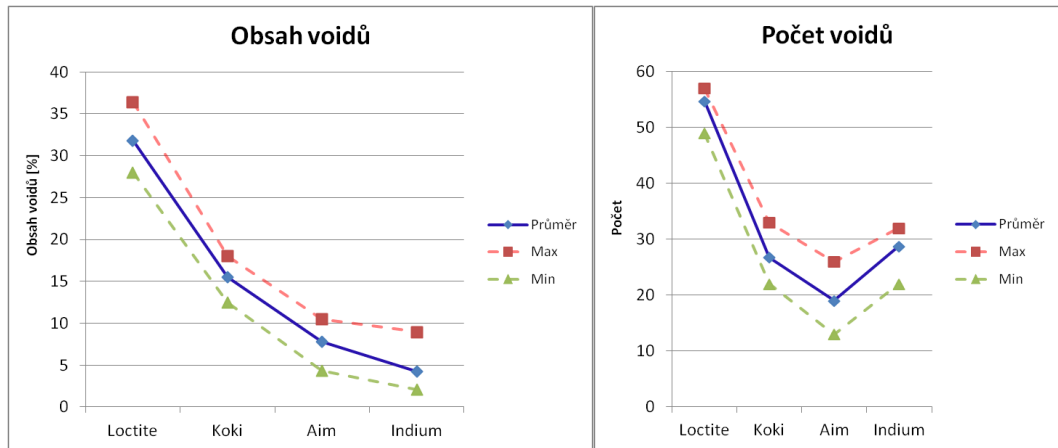
Pomocí rentgenového stroje byly pořízeny snímky součástky QFN04, u které byl zkoumán spoj mezi součástkou a chladicí ploškou na DPS. Pro následné vyhodnocení celkového počtu voidů a poměrné plochy voidů vůči celkové ploše chladicí plošky byl použit program ImageJ, který dokáže na základě barvy jednotlivých pixelů fotografie vyseparovat voidy.



Obr 4.24 Rentgenový snímek QFN04 a tentýž snímek „vymaskován“ pomocí programu ImageJ

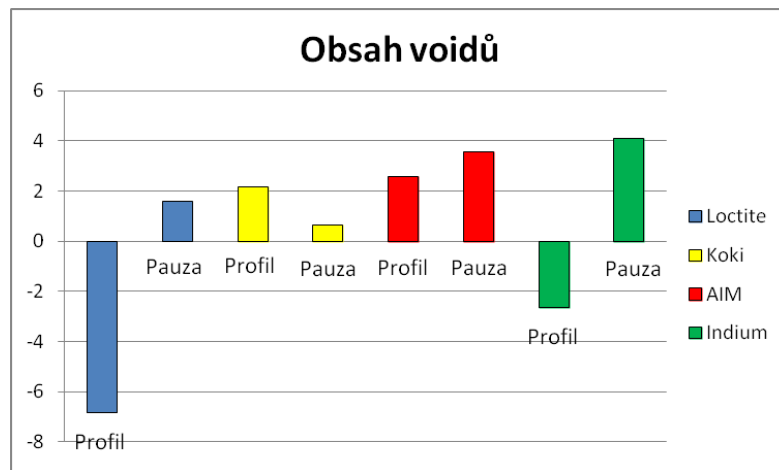
Průměrný celkový obsah voidů ve spoji byl nejnižší u vzorků s pastou od firmy Indium s výsledkem 4,2 %. Co se týká počtu jednotlivých voidů, v tomto ohledu byla nejlepší pasta od AIM s průměrným počtem 19 voidů.

Celkový obsah voidů byl u past Loctite a Indium vyšší s použitím „krátkého“ teplotního profilu. Jistý vliv u všech testovaných vzorků měla na velikost voidů také pauza před tiskem.



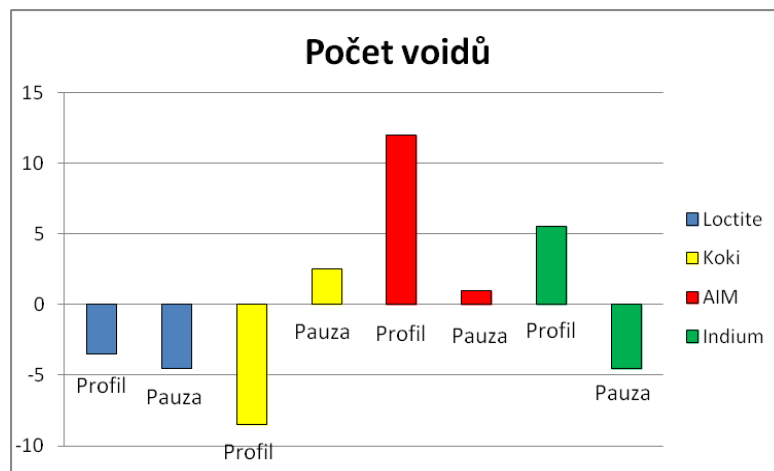
Obr 4.25 Vlivy pájecích past na plochu a počet voidů ve spoji

Celkový obsah voidů byl u past Loctite a Indium vyšší s použitím „krátkého“ teplotního profilu. Jistý vliv u všech testovaných vzorků měla na velikost voidů také pauza před tiskem.



Obr 4.26 Vliv vstupních faktorů na plochu voidů ve spoji

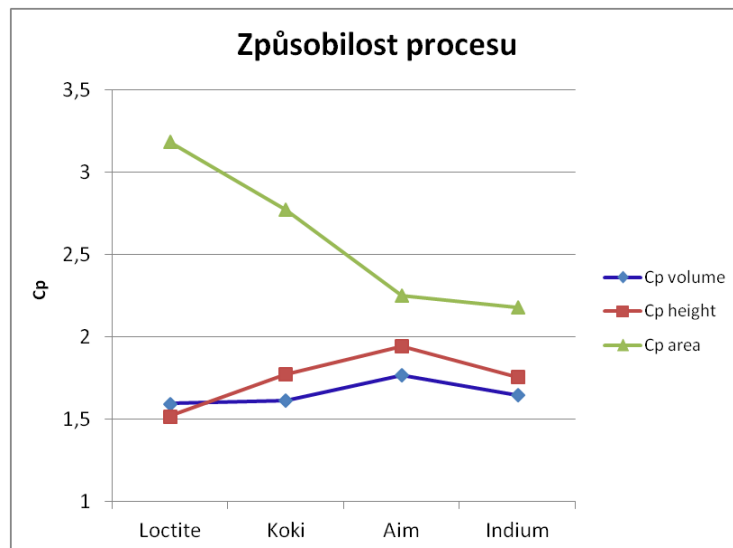
Četnost voidů nejvýrazněji narostla s použitím „dlouhého“ profilu u pasty AIM.



Obr 4.27 Vliv vstupních faktorů na počet voidů ve spoji

Ukazatele způsobilosti procesu

Ukazatele způsobilosti procesu Cp pro množství natištěné pasty, výšku pasty a natištěnou plochu byly získány pomocí stroje SPI. Ukazatele byly získány z dat pro každou pájecí pastu zvlášť. Nejstabilnějšího tisku z pohledů celkového množství a výšky pasty dosáhla pasta AIM. Naopak nejlepšího výsledku z pohledu stability pokrytí pájecí plošky pastou prokázala pasta od Loctite.



Obr 4.28 Způsobilosti procesu tisku pasty pro jednotlivé vzorky past

5 Doporučení pro využití v praxi

Pro určení pájecí pasty, která obstála v experimentu nejlépe, bylo využito principu bodového ohodnocení. Pro tyto účely byla vytvořena tabulka *Tab 5.2*, ve které jsou průměrné hodnoty výstupních dat jednotlivých pájecích past poměrně vyjádřeny vůči ostatním pastám. Čím lepší výsledek předvedla pájecí pasta v daném parametru, tím více bodů jí bylo připsáno.

Tab 5.1 Průměrné hodnoty jednotlivých výstupů

Pájecí pasta	Zkratky	Solder beads	Kuličky pájky	Nedostatečné množství pasty	Počet voidů	Obsah voidů	Cp množství pasty	Cp výška pasty	Cp plocha natištěné pasty	F QFN	Faging QFN	F SOT23	Faging SOT23
Loctite GC10	14,50	3,5	9,28	1	54,75	31,79	1,5945	1,5189	3,1866	241,79	215,63	35,74	32,91
KOKI M406ECO	3,25	0	5,78	20	26,75	15,53	1,6147	1,7744	2,7728	247,01	227,75	36,58	33,81
AIM M8	0,25	0,25	2,88	145	19	7,8	1,7681	1,9447	2,2533	257,52	235,58	34,96	32,44
Indium 8.9HF	0,75	0,5	12,33	0	28,75	4,2	1,647	1,7569	2,1793	246,99	241,42	36,43	33

V případě, že se jednalo o defekt vyjádřený počtem výskytů, byl 1 bod přiřazen nulovému výskytu a 0 bodů pastě s největším počtem výskytů. U zbylých výstupů byl přiřazen 1 bod pastě, která měla nejlepší výsledek a 0 bodů pastě s nejhorším výsledkem. Zbylé pasty vždy obdržely poměrné vyjádření jejich výsledků v intervalu $\langle 0;1 \rangle$.

Tab 5.2 Bodovací tabulka bez koeficientů vážnosti

Pájecí pasta	Zkratky	Solder beads	Kuličky pájky	Nedostat ečné množství pasty	Počet voidů	Obsah voidů	Cp množství pasty	Cp výška pasty	Cp plocha natištěné pasty	F QFN	Faging QFN	F SOT23	Faging SOT23	Cena
Loctite GC10	0,00	0,00	0,25	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,48	0,34	0,00
KOKI M406ECO	0,78	1,00	0,53	0,86	0,51	0,51	0,12	0,60	0,59	0,33	0,47	1,00	1,00	1,00
AIM M8	0,98	0,93	0,77	0,00	0,65	0,75	1,00	1,00	0,07	1,00	0,77	0,00	0,00	1,00
Indium 8.9HF	0,95	0,86	0,00	1,00	0,47	0,87	0,30	0,56	0,00	0,33	1,00	0,91	0,41	0,00

V dalším kroku byly jednotlivým výstupním parametrům autorem přiřazeny koeficienty vážnosti, aby byla rozlišena důležitost jednotlivých výstupů. Přiřazeným koeficientem pak byly vynásobeny všechny body v daném sloupci. Koeficienty jsou uvedeny v závorkách u jednotlivých výstupů.

Tab 5.3 Celková tabulka zohledňující vážnost výstupu

Pájecí pasta	Zkratky (5)	Solder beads (4)	Kuličky pájky (4)	Malé množství pasty (3)	Počet voidů (3)	Obsah voidů (3)	Cp množství pasty (2)	Cp výška pasty (2)	Cp plocha natištěné pasty (2)	F QFN (1)	Faging QFN (1)	F SOT23 (1)	Faging SOT23 (1)	Cena (1)	Body celkem
Loctite GC10	0,00	0,00	0,99	2,98	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,48	0,34	0,00	6,79
KOKI M406ECO	3,88	4,00	2,12	2,59	1,53	1,53	0,23	1,20	1,18	0,33	0,47	1,00	1,00	1,00	22,07
AIM M8	4,91	3,71	3,07	0,00	1,96	2,26	2,00	2,00	0,15	1,00	0,77	0,00	0,00	1,00	22,84
Indium 8.9HF	4,74	3,43	0,00	3,00	1,42	2,60	0,60	1,12	0,00	0,33	1,00	0,91	0,41	0,00	19,57

V celkovém hodnocení získala nejvíce bodů pájecí pasta AIM M8. Velmi dobře si vedla v četnosti defektů včetně voidů a v ukazatelích způsobivosti procesu. Také její cena je nejpříznivější. Hůře byla hodnocená ve srovnání s ostatními vzorky v experimentu, který testoval stabilitu tisku pájecích past v závislosti na pauze mezi jednotlivými tisky pasty

a době, kterou pasta strávila na šabloně v tiskové platformě. Nejhorší výsledky měla pasta AIM M8 v testování mechanické pevnosti po procesu zrychleného stárnutí.

Druhým vzorkem dle bodového pořadí je pasta KOKI S3X48-M406ECO. Tento vzorek zaostal za pastou AIM M8 jen o necelých 0,8 bodu. Tato pasta prokázala velmi stabilní výsledky ve všech bodovaných aspektech. Je důležité zmínit, že v žádném hodnoceném výstupu nepropadla. Co se týká ceny, je na tom KOKI M406ECO stejně jako AIM M8.

Pájecí pasta Indium 8.9 HF získala třetí nejvyšší počet bodů. Velmi dobře se prezentovala obsahem voidů v pájeném spoji. Možná trochu překvapivě si tato pasta vedla nejlépe ze všech vzorků v experimentu zkoumajícím kvalitu tisku pasty s postupujícím časem a s prodlužující se pauzou před tiskem, protože stroj SPI u ní neobjevil žádný defekt. Největší slabinou této pasty byla tvorba mikrokuliček pájky v okolí pájeného spoje. Zde se pravděpodobně projevil fakt, že se nejedná o teplotně stabilní pájecí pastu. V její neprospěch také hovoří cena, která je ze všech testovaných vzorků nejvyšší.

Pájecí pasta Loctite GC 10 si v některých ohledech nevedla vůbec špatně. Prokázala např. velmi stabilní tiskové vlastnosti i po 90minutové pauze před tiskem. Nicméně v celkovém hodnocení získala tato pasta nejméně bodů.

Společnosti Integrated Micro-Electronics Czech Republic doporučuji k dalšímu a podrobnějšímu testování pájecí pasty AIM M8 a KOKI S3X48-M406ECO. Tyto pasty získaly v celkovém hodnocení téměř totožný počet bodů a cena je v podstatě stejná. V dalších testech by bylo dobré hlouběji se zaměřit na deklarovanou teplotní stabilitu a např. vyzkoušet, kolik dní pasta „vydrží“ mimo chladničku. Vhodné by také bylo otestovat pasty při dalších teplotních profilech a na produktech s většími součástkami (např. elektrolytický kapacitor).

Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo otestovat poměrně nový typ pájecích past, které jsou výrobci prezentovány jako teplotně stabilní pájecí pasty, porovnat jejich vlastnosti s konvenčním typem pájecích past a případně doporučit některou z testovaných past pro nasazení ve výrobě ve společnosti Integrated Micro-Electronics Czech Republic s.r.o. (IMI CZ).

Celkem byly otestovány čtyři vzorky pájecích past. Tři z nich byly zástupci teplotně stabilních pájecích past a čtvrtý vzorek byl z řady past, které je nutné skladovat při snížené teplotě. V rámci testování proběhl jeden experiment, jenž se soustředil na tiskové vlastnosti pájecích past v závislosti na čase, který pasta strávila na šabloně a zároveň na pauzu před tiskem pasty na DPS. Druhý experiment byl zaměřen na hodnocení výsledné kvality pájených spojů u SMD součástek. Vstupními faktory do tohoto experimentu byla použitá pájecí pasta, pauza před tiskem DPS a použitý teplotní profil. Byly sledovány výskyty defektů, které se mohou vyskytovat po procesu přetavení pájecí pasty v SMT peci a také mechanická pevnost pájených spojů

Z výsledků experimentů je patrná menší náchylnost ke generaci mikrokuliček pájky u teplotně stabilních past v porovnání s konvenční pastou. Naopak pasta Indium 8.9HF, zástupce konvenčních pájecích past, překvapila během prvního experimentu, co se týká stability tiskových vlastností, když u vzorků DPS natištěných touto pastou nebyl pomocí stroje SPI nalezen jediný defekt.

Na základě dat získaných v průběhu experimentu a jejich následném vyhodnocení, byly firmě IMI CZ doporučeny teplotně stabilní pájecí pasty AIM M8 a KOKI S3X48-M406ECO, které měly ze všech vzorků testovaných vzorků nejlepší výsledky. Tyto dvě pasty by před zavedením do výroby měly projít dalším testováním a ověřením deklarovaných vlastností v katalogových listech od výrobců past. Pokud by tyto pájecí pasty prošly hlubším testováním s pozitivními výsledky a následně byly zavedeny do výroby, mohlo by to společnosti IMI CZ ušetřit náklady spojené s dopravou a operátorům SMT linek by nasazení těchto past mohlo usnadnit manipulaci s nimi.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] 3.1.1 Solder Paste: (1) Material Structure. *Renesas Electronics Corporation* [online]. 2016 [cit. 2016-01-09]. Dostupné z: http://am.renesas.com/products/package/manual/3/3_1/3_1_1/.
- [2] ABEL, Martin a Vladimír CIMBUREK. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. Vyd. 1. Pardubice: ABE.TEC, 2005, 179 s. ISBN 80-903-5970-1.
- [3] Solder Paste Basics. *IDC Technologies: Technology Training that Works* [online]. [cit. 2016-01-09]. Dostupné z: http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/Solder_Paste_Basics.pdf
- [4] KOKI COMPANY LIMITED. *General Information on Solder Paste*. Dostupné také z: http://www.pmdtk.upc.smm.lt/dokumentai/Medziaga/inzinerine/mm12/Priedai/3_4%20priedas.%2023_Solder_paste_general_info_KOKI.pdf
- [5] ABEL, Martin. *SMT Technologie povrchové montáže: Technologie povrchové montáže*. Vyd. 1. Pardubice: Platan, 2000, 246 s. ISBN 80-902-7331-9.
- [6] Techcon Systems to Exhibit Precision Valves at SMTAI 2011. *SMTnet* [online]. 2011 [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: http://www.smtnet.com/news/index.cfm?fuseaction=view_news&news_id=10524
- [7] Solder Paste Dispenser MD100. *Magnum: Tools for change* [online]. 2016 [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: <http://www.magnumonline.co.za/products/solder-paste-dispenser-md100>
- [8] ČSN EN 29454-1. *Tavidla pro měkké pájení. Klasifikace a požadavky. Část 1: Klasifikace, označování a balení*. Praha, 1997.
- [9] ANSI/J-STD-004A, *Requirements for Soldering Fluxes*. American National Standard, Joint Industry Standard, 2004.
- [10] DEK Set for Major Debut at Electronics Midwest and SMTA International. *SMTnet* [online]. 2016 [cit. 2016-02-14]. Dostupné z: http://www.smtnet.com/news/index.cfm?fuseaction=view_news&news_id=8949
- [11] MOHANTY, Dr. Rita a Peter BIOCCA. *Stencil Printing Fundamentals*.
- [12] MOHANTY, Rita, Bill CLAIBORNE a Frank ANDRES. *Effect of Squeegee Blade on Solder Paste Print Quality* [online]. [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: <https://www.smtnet.com/library/files/upload/EffectOfSqueegeeBlade.pdf>
- [13] HOBBY, Alan. *SCREEN PRINTING FOR THE INDUSTRIAL USER. Gwent group: Advanced material systems* [online]. 1997 [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: http://www.gwent.org/gem_screen_printing.html
- [14] Application Advice. *AIM: Global Manufacturer of Solder Assembly Materials for the Electronics Industry* [online]. [cit. 2015-11-28]. Dostupné z: <http://www.aimsolder.com/services/applications-advice>
- [15] O'LEARY, Brian. *Profiling Guide for Six Sigma*. Druhé. DiggyPod, 2011. ISBN 978-0-9840903-1-0.
- [16] SHEA, Chris. *ting the Stencil Printing Process* [online]. In: . [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: http://www.smta.org/chapters/files/Houston_Troubleshooting_The_Stencil_Printing_Process_-_Chrys_Shea.pdf
- [17] Misprint Cleaning: Prevent Misprinted PCBs and Boards from Going to Waste. *Zestron: High Precision Cleaning* [online]. [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.zestron.com/precision-cleaning-applications/smt-electronic-cleaning/stencil-cleaning/misprinted-board-cleaning.html>
- [18] SHEA, Chris. *ting the Stencil Printing Process* [online]. In: . [cit. 2016-02-20].

- Dostupné z:
http://www.smta.org/chapters/files/Houston_Troubleshooting_The_Stencil_Printing_Process_-_Chrys_Shea.pdf
- [19] *The Quick Pocket Reference for Tin/Lead and Lead-Free Solder Assembly* [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z:
http://www.aimsolder.com/sites/default/files/soldering_handbook_rev_10-13.pdf
- [20] *Characteristics of Solder Paste* [online]. , 10 [cit. 2016-03-13]. Dostupné z:
http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/Characteristics_of%20Solder_Paste.pdf
- [21] YUNUS, Mohammad, K. SRIHARI, J.M. PITARRESI a Anthony PRIMAVERA. *Effect of voids on the reliability of BGA/CSP solder joints* [online]. 2003, 2015-11-24 [cit. 2015-11-24]. Dostupné z:
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.85.2519&rep=rep1&type=pdf>
- [22] AIM SOLDER. *Reflow profile supplement*. Dostupné také z:
http://www.aimsolder.com/sites/default/files/reflow_profile_supplement-lead-free_9.15.pdf
- [23] STARÝ, Jiří. *Dutiny – voidy v pájených spojích, druhy, mechanismy vzniku a vliv na spolehlivost* [online]. Brno: SMT-info konsorcium, 2014, 2015-11-24 [cit. 2015-11-24]. ISSN 1211-6947. Dostupné z:
http://www.smtinfo.cz/download/bulletiny/SMT_bulletin1410.pdf
- [24] YUNG-HERNG, Yau, Karl WENGENROTH a Joseph ABYS. A STUDY OF PLANAR MICROVOIDING IN Pb-FREE SOLDER JOINTS. *HKPCA Journal* [online]. WestHaven, USA, 2015-11-24, : 14 [cit. 2015-11-24]. Dostupné z:
http://www.academia.edu/17381741/A_STUDY_OF_PLANAR_MICROVOIDING_IN_Pb-FREE_SOLDER_JOINTS
- [25] HILLMAN, Dave, Dave ADAMS, Tim PEARSON, Brad WILLIAMS, Brittany PETRICK, Ross WILCOXON a Rockwell COLLINS. *THE LAST WILL AND TESTAMENT OF THE BGA VOID*. Dostupné také z:
http://www.ipc.org/committee/comments/5-22a_c_Hillman-BGA-void-paper.pdf
- [26] BAO, David. METALLIC RESOURCES, INC. *Tombstoning Explained*. 3 s. Dostupné také z:
<http://metallicresources.com/documents/Tombstoning%20explained.pdf>
- [27] PIGEON, Kevin. *Advanced Issues in Assembly: Part 2 Causes and Cures in Solder Beading* [online]. In: . 2001, s. 5 [cit. 2015-11-28]. Dostupné z:
http://www.kondner.com/files/Solder_Beading.pdf
- [28] Stencil Design Guidelines. *SolderConnection: Experts in Soldering Technology* [online]. [cit. 2015-11-28]. Dostupné z:
http://www.solderconnection.com/alphametals_stencils_design.php
- [29] SolderingDefects Database: Solder Paste Non Coalescence. *NPL* [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z:
http://defectsdatabase.npl.co.uk/defectsdb/defect_details.php?d_pkey=211&ff_search=graping
- [30] TUDOR, Cristian. *AmtestSeminarTraining 2012*. 2012.
- [31] SolderingDefects Database: Solder Short under Chip Component. *NPL* [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z:
http://defectsdatabase.npl.co.uk/defectsdb/defect_details.php?d_pkey=72&ff_search=short
- [32] DEK Set for Major Debut at Electronics Midwest and SMTA International. *SMTnet* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z:

- http://www.smtnet.com/news/index.cfm?fuseaction=view_news&news_id=8949
- [33] KOH YOUNG SPI AND AOI 3D: SPI 8030-2 PLUS. *Tecnolab* [online]. [cit. 2016-03-18]. Dostupné z: <http://www.tecnolab-srl.it/?p=1105&lang=en>
- [34] PatentedShadow Free Moiré Technology. *KohYoung* [online]. [cit. 2016-03-18]. Dostupné z: <http://kohyoung.com/en/tech-1/>
- [35] DomesticAnimalsSilhouettes. *Sillhouettes free.com* [online]. [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: <http://silhouettesfree.com/silhouettes/domestic-animals/10>
- [36] *Technical Data Sheet: M8 NO CLEAN SOLDER PASTE* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.aimsolder.com/sites/default/files/m8_solder_paste_tds.pdf
- [37] *S3X48-M406ECO* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.ko-ki.co.jp/en/products/pdf/B1-06_S3X48-M406ECO_E.pdf
- [38] *LOCTITE GC10* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.henkel-adhesives.com/com/content_data/386403_GC_10EN_TDS.pdf
- [39] *Indium8.9HF: Pb-Free Solder Paste* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.eis-inc.com/files/pdf/supplier_showcase_page_downloads/indium/98485_HalogenFree_Pb_Free_Paste.pdf
- [40] ČSN EN 60068-2-2. *Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-2: Zkoušky - Zkouška B: Suché teplo.*