

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Vliv použitých materiálů a parametrů šablonového tisku
na jeho kvalitu**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš JANDA**

Osobní číslo: **E16B0108P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Vliv použitých materiálů a parametrů šablonového tisku na jeho kvalitu**

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. Popište princip šablonového tisku a materiály standardně používané ve výrobním podniku.
2. Navrhněte experiment pro zjištění vlivu materiálů a procesních parametrů na kvalitu šablonového tisku ve výrobním podniku.
3. Realizujte a vyhodnoťte navržený experiment.
4. Na základě výsledků experimentu navrhněte doporučení pro optimální nastavení šablonového tisku a optimální volbu použitého materiálu z kvalitativního i ekonomického pohledu.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- 1. P. Mach, V. Skočil, J. Urbánek; Montáž v elektronice**
- 2. R. J. Klein Wassink; Soldering in electronics**
- 3. Internetové zdroje**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Hirman, Ph.D.**

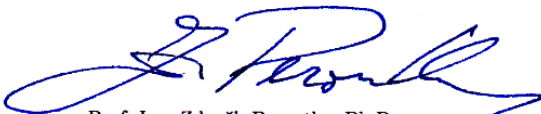
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Václav Wirth, Ph.D.**


Rohde&Schwarz závod Vimperk s.r.o.

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2019**



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



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

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku šablonového tisku v moderním elektronickém průmyslu. V teoretické části je obsažen princip a rozbor šablonového tisku a defektů. V experimentální části byla prováděna série experimentů za účelem zjištění, zdali má automatické míchání pasty před jejím nanášením vliv na kvalitu šablonového tisku.

Klíčová slova

Šablonový tisk, automatické míchání, bezolovnatá pájecí pasta, SMT, materiály pro šablonový tisk, šablona, těrka, defekty tisku, optimalizace šablon, parametry šablonového tisku, odstředivý planetární mixér.

Abstract

The bachelor thesis presented is focused on the issues of the stencil printing in the modern electronics industry. The theoretical part contains the basic principle and the analysis of the stencil printing and the defects. Several experiments were conducted in the experimental part to find out if the influence of the automatic mixing of the solder paste before its application has an impact on the quality of stencil printing.

Key words

Stencil printing, automatic mixing, lead-free solder paste, SMT, stencil printing materials, stencil, squeegee, defects of printing, optimalization of stencils, parameters of stencil printing, centrifugal planetary mixing machine.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou 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 bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 9.6.2019

Tomáš Janda

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Martinu Hirmanovi, Ph.D. za všechny poskytnuté konzultace a jeho odborné vedení. Poděkování patří také mému odbornému konzultantovi Ing. Václavu Wirthovi, Ph.D., který koordinoval experimentální část. Poděkování patří i společnosti Rohde & Schwarz závod Vimperk, s.r.o., především oddělení 3VB, kde jsem měl možnost svou bakalářskou práci realizovat.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 ŠABLONOVÝ TISK	12
1.1 PŘEHLED ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ	12
1.1.1 Konvenční sítotisk.....	12
1.1.2 Dispensing	13
1.1.3 Jetting a Aerosol Jet Printing.....	14
1.2 PRINCIP ŠABLONOVÉHO TISKU.....	15
1.3 MATERIÁLY A VÝROBA ŠABLON.....	16
1.4 ČIŠTĚNÍ ŠABLON.....	18
1.5 TĚRKA.....	18
1.6 TRENDY V ŠABLONOVÉM TISKU	20
1.6.1 Nanopovlaky a povrchové úpravy	20
1.6.2 Pin-in-Paste.....	21
1.6.3 Step a 3D šablony.....	23
1.6.4 Wafer Bumping.....	24
1.6.5 PumpPrint™	25
1.7 VZNIK DEFEKTŮ A OPTIMALIZACE ŠABLON	26
1.7.1 Špatné zamíchání a teplota pájecí pasty.....	26
1.7.2 Tombstones	26
1.7.3 Solder Beading	27
1.7.4 Bridges.....	28
1.7.5 Objem pájecí pasty	28
1.7.6 Studený a horký sesuv.....	30
1.7.7 Dog Ears.....	31
1.7.8 Zaměření šablony	31
1.7.9 Solder Graping	32
1.7.10 Voids.....	32
1.7.11 Dendrity.....	33
1.7.12 Whiskers	33
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
2.1 POUŽITÉ MATERIÁLY A ZAŘÍZENÍ	35
2.1.1 Pájecí pasta	35
2.1.2 Testovací deska plošných spojů.....	36
2.1.3 Odstředivý mixér	37
2.1.4 Šablonový tisk.....	38
2.1.5 Inspekce pájecí pasty.....	39
2.2 PRVNÍ EXPERIMENT	40
2.3 DRUHÝ EXPERIMENT	44
2.4 TŘETÍ EXPERIMENT.....	51
2.5 ZÁVĚREČNÉ VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ	52

2.6 EKONOMICKÉ HLEDISKO	53
ZÁVĚR	54
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	55
PŘÍLOHY	1

Úvod

Šablonový tisk je jednou z nejpoužívanějších aditivních technologií v oblasti elektroniky. Hraje zásadní roli ve výrobním procesu a je neodmyslitelnou součástí nejen hromadné výroby. Kvalita konvenčních elektronických systémů do jisté míry závisí právě na šablonovém tisku. Ačkoliv se nejedná o novou technologii, její vývoj neustále pokračuje, aby vyhovovala stále přísnějším podmínkám, nejen z pohledu náročnosti spotřebitelů, ale také kvůli vývoji v celém elektronickém odvětví, které je charakteristické svou dynamičností.

V teoretické části jsou rozebrány jednotlivé nanášecí metody. Tato část je zaměřena především na šablonový tisk, jeho princip, výrobu šablon, konstrukci těrek, trendy ve vývoji, optimalizaci šablon a defekty vznikající při nanášení a přetavení.

Experimentální část se zaměřuje na přípravu pájecí pasty před samotným nanášením na desky plošných spojů. Cílem experimentů bylo najít vhodné nastavení odstředivého mixéru, které by dokázalo zachovat ideální parametry pájecí pasty, neovlivnit negativně výrobní proces a automatizovat ho. Motivací byl i fakt, že žádný rozsáhlý objektivní výzkum dopadů automatického míchání pasty a jeho vlivu na šablonový tisk nebyl zveřejněn. Experimentální část probíhala v moderní průmyslové společnosti a byla vyhodnocena nejen z hlediska technologického, ale také z hlediska ekonomického.

Seznam symbolů a zkratk

<i>AOI</i>	Automatická optická inspekce
<i>BGA</i>	Ball Grid Array (komponenta s kuličkovými vývody)
<i>CNT</i>	Uhlíkové nanotrubičky
<i>DARPA</i>	Agentura ministerstva obrany pro pokročilé výzkumné projekty (USA)
<i>DPMO</i>	Počet defektů na milión příležitostí
<i>DPS</i>	Deska plošných spojů
<i>DPU</i>	Počet defektů na jednotku
<i>ESD</i>	Opatření proti vzniku elektrostatických výbojů
\vec{F}	Vektor síly [N]
<i>FR4</i>	Požár potlačující materiál
<i>LED</i>	Elektroluminiscenční dioda
<i>MICE</i>	Mesoskopická integrovaná konformní elektronika
<i>PEDOT</i>	Poly(3,4-ethylendioxythiofen)
<i>PiP</i>	Pin-in-Paste technologie
<i>POM</i>	Polyoxymetylén
<i>PPM</i>	Počet vadných kusů na milión příležitostí
<i>PUR</i>	Polyuretan
<i>RoHS</i>	Směrnice EU týkající se restrikce vybraných materiálů
<i>rpm</i>	Počet otáček za minutu
<i>SA:V</i>	Poměr plochy povrchu a objemu
<i>SMD</i>	Zařízení pro povrchovou montáž
<i>SMT</i>	Povrchová montáž
<i>SPI</i>	Systém inspekce pájecí pasty
<i>THR</i>	Through hole reflow technologie
<i>THT</i>	Through hole technologie
μBGA	Typ BGA komponenty
\vec{v}	Vektor rychlosti [m/s]

1 ŠABLONOVÝ TISK

Úkolem aditivních technologií obecně je přenesení obrazce (pájecí pasty, vodivého lepidla, ...) na daný substrát. Uplatnění nenachází jen ve výrobě elektroniky, ale užívají se také například v textilním nebo grafickém průmyslu. Rozmanitost těchto technologií spočívá v zaměření na hromadnou nebo kusovou výrobu, v druhu nanášené substance, v materiálech substrátů a v požadované míře přesnosti.

1.1 Přehled aditivních technologií

V této kapitole jsou představeny nanášecí technologie, které jsou relevantní pro elektronický průmysl a na které navážou kapitoly specializované přímo na šablonový tisk.

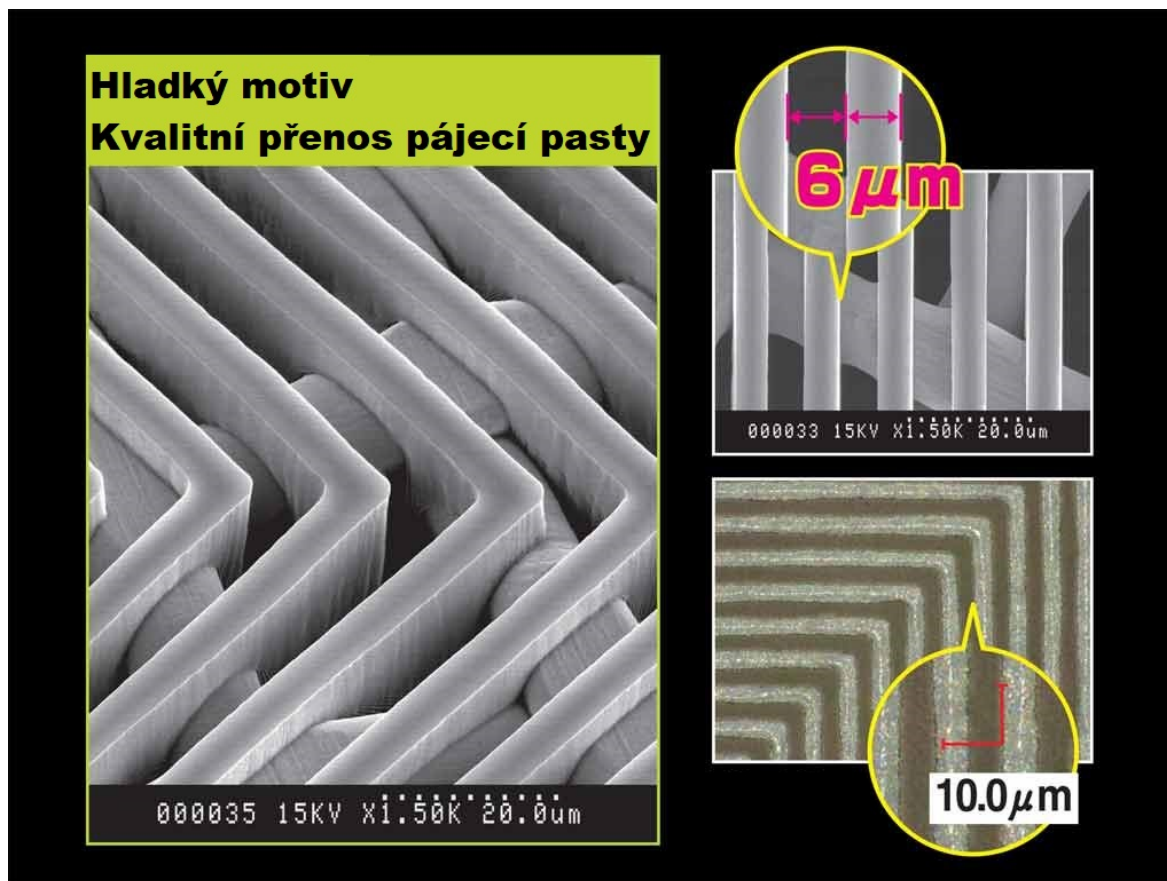
1.1.1 Konvenční sítotisk

Sítotisk je předchůdce šablonového tisku. Sítotisk využívá sítovinu (korektně sítoovou šablonu) uchycenou v sítotiskovém rámu. Důležitým prvkem je napínací zařízení, které zajišťuje optimální napětí síta nutné ke správnému nanášení pasty. Nejpoužívanějšími materiály na rámy jsou hliník a ocel. Vlákná síta se standardně vyrábějí z polyesteru, nylonu a nerezové oceli a jsou obecně monofilní. Při výrobě elektroniky se nepoužívají nylonová vlákna, která nesplňují nároky na mechanickou a chemickou odolnost. Motivy na sítu se realizují mokrou, suchou či kombinovanou metodou, kdy má fotocitlivá emulze formu pasty, filmu nebo jsou použity obě formy. [1, 2]

Výška natisknuté pájecí pasty je závislá na výšce síta, její velikost je přibližně třetina výšky síta. U šablonového tisku je výška pasty stejná jako výška síta. To je dáno odtrhem. Odtrh je parametr, který udává vzdálenost síta od povrchu substrátu. Zatímco odtrh síta může být i několik milimetrů, u šablonového tisku je odtrh nulový. Princip tisku je až na zmíněné odlišnosti shodný se šablonovým tiskem a je rozebrán v kapitole 1.2. [3]

Výhodou síta oproti šablonovému tisku jsou především menší náklady na vytváření motivů i samotných síta. Další pozitivní vlastností sítotisku je jeho chování při nerovném povrchu substrátu, který dokáže lépe kompenzovat. [1]

Omezujícím parametrem sít se zdá být šířka motivů, které mohou být touto technologií natisknuté. Jiří Starý ve svých skriptech [1] uvádí minimální velikost apertur přibližně 0,35 mm. Dnes se však objevují nové progresivní technologie, které umožňují výrazně zmenšovat motivy. Příkladem je ultrajemný síťotisk, který dosahuje vysoké míry hustoty síta na jednotku plochy. Rozteč mezi vlákny a šířka vláken jsou zvládnuty až na 6 μm [4].



Obr. 1: Mikroskopické snímky ultrajemných vláken – převzato z [4]

1.1.2 Dispensing

Dispensing neboli dávkování se dělí dle typu přenosu pasty na dávkování plnou jehlou, dutou jehlou a na bezkontaktní dispensing. Především duté jehly hrají významnou roli při výrobě a servisu elektronických zařízení. Rychlost lze zvýšit (kromě simultánní práce více hlav) bezkontaktním dispensingem, kdy se pájecí pasta uvolňuje z výšky až několik jednotek milimetrů. Mezi výhody dispensingu lze zařadit vyšší variabilitu, menší náklady na změnu produktu, odpadnutí skladování šablon a sít, jejich čištění a instalování do rámců a strojů. Na již osazenou desku standardně nelze aplikovat tiskové technologie (existují výjimky, viz kapitola 1.6.5), zatímco dispensing ano. Nevýhodou dispensingu je naopak nižší rychlost, nižší přesnost a rozdílnost dispensovaných tvarů. [1, 2]

1.1.3 Jetting a Aerosol Jet Printing

Jetting je do jisté míry podobný dispensingu. Technologie se liší tím, že u jettingu je trajektorie kapek pájecí pasty řízena elektrickým polem a výsledkem je přesnější a rychlejší nanášení pasty na substrát. [2]

V roce 1990 koordinovala DARPA projekt MICE, který měl za cíl vytvořit nový nástroj pro tisk elektroniky pro různé materiály a substráty. Výsledkem byl vznik technologie Aerosol Jet Printing. Jedná se o velice pokročilou selektivní depoziční bezkontaktní technologii. Zařízení vytváří aerosol z inkoustu, jehož kapky mají velikost od 1 do 5 μm a jejich vlastnosti lze upravovat přidáním rozpouštědel. Minimální šířka tisknutých čar je 10 μm , zatímco výška nanesené vrstvy může být i 10 nm. Pro lepší adhezi k substrátu se provádí plazmatická úprava povrchů. Při té se zvýší povrchová energie substrátu, která má za následek lepší smáčivost. [5]

Velikou výhodou Aerosol Jet Printingu není ovšem jen jemnost motivů, ale i nenáročná změna motivu, což nachází uplatnění při rapid prototypingu. Také šířka spektra nanášených materiálů a substrátů je mnohem větší. Motivy se mohou tisknout i na 3D substráty. Nevýhodami oproti běžným technologiím jsou vysoká cena inkoustu, nevhodnost tisku na velké plochy a komplikovaná implementace do hromadné výroby. Vhodná je tedy kombinace různých aditivních technologií, kdy se výsledný produkt označuje jako hybridní elektronika. Konkrétní aplikace můžeme najít například v kontaktování SMD čipů, v tisku pasivních součástek nebo v tisku aktivních vrstev (PEDOT, CNT, ...). [5, 6]



Obr. 2: 3D substrát
– převzato z [6]

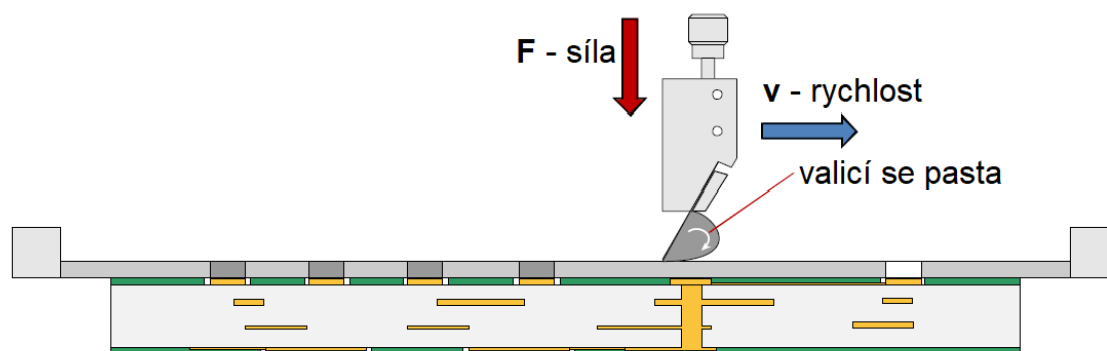


Obr. 3: Anténní systém mobilního telefonu
– převzato z [6]

1.2 Princip šablonového tisku

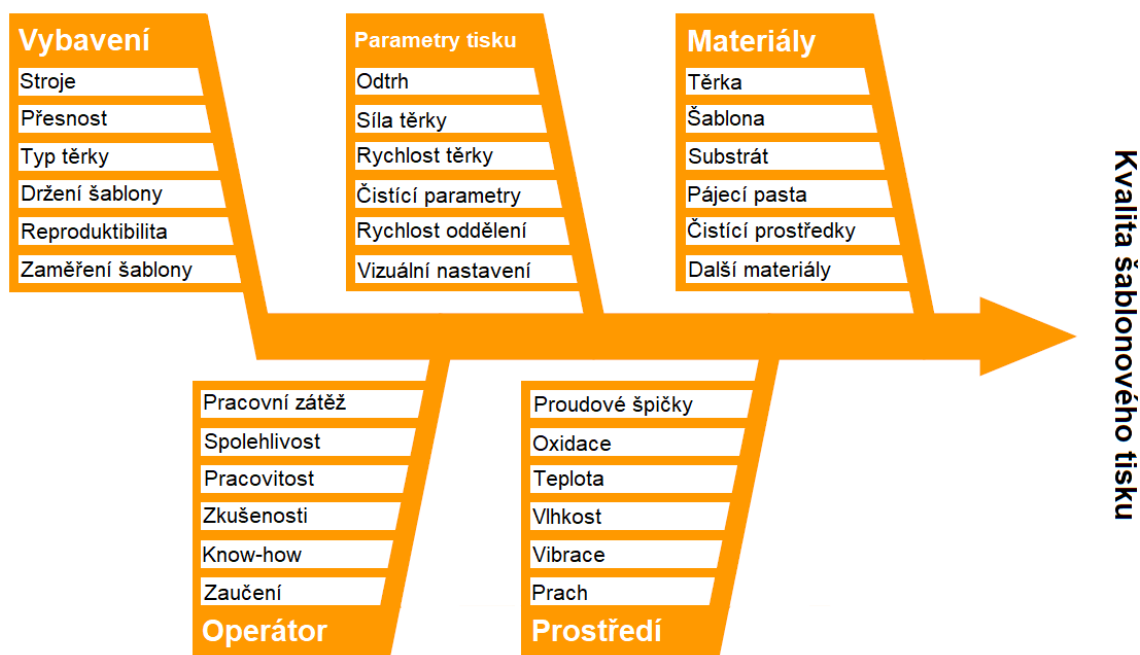
Jak již bylo nastíněno v kapitole 1.1.1., šablonový tisk funguje na stejném principu jako sítotisk. Hlavním rozdílem je použití šablony namísto síta. Mezi výhody šablonového tisku patří vyšší životnost šablony, přesnost a možnost tisknout jemnější motivy. Ve výrobě konvenční elektroniky zaujímá šablonový tisk stěžejní pozici.

Samotný proces nanášení probíhá vyskladněním šablony a jejím následným připevněním do rámu. Existují i šablony s fixovaným rámem pro lepší stabilitu. Toho je využíváno pro velké objemy produkce. Rám se šablonou se posléze vloží do tiskového stroje, nastaví se příslušný program se všemi parametry tisku a na okraj šablony se nanese pájecí pasta, případně lepidlo. Šablona klesne na substrát s nulovým odtrhem. Proběhne zaměření osazovacích značek („fiducials“) a poté před sebou valí těrka pájecí pastu, která se otvory v šabloně nanáší na plošky substrátu, viz *Obr. 4*. Šablona se po natisknutí pasty nadzvedne a deska plošných spojů pokračuje dopravníkem na další stanoviště ve výrobním procesu. [7, 8]



Obr. 4: Znárodnění působení těrky na pastu – převzato z [8]

Principiálně jednoduchý proces v sobě obsahuje veliký počet vstupních parametrů, které zásadně ovlivňují výslednou kvalitu tisku. Kvůli této komplexitě je prakticky nemožné přiblížit se matematickými modely k přesné simulaci. Na *Obr. 5* jsou v Ishikawa diagramu vypsány jednotlivé vlivy na kvalitu tisku. Podle C. H. Mangina v [9] vzniká 64 % chyb v SMT výrobním procesu právě na šablonovém tisku. Je tedy nutné věnovat nanášení pasty zvýšenou pozornost.



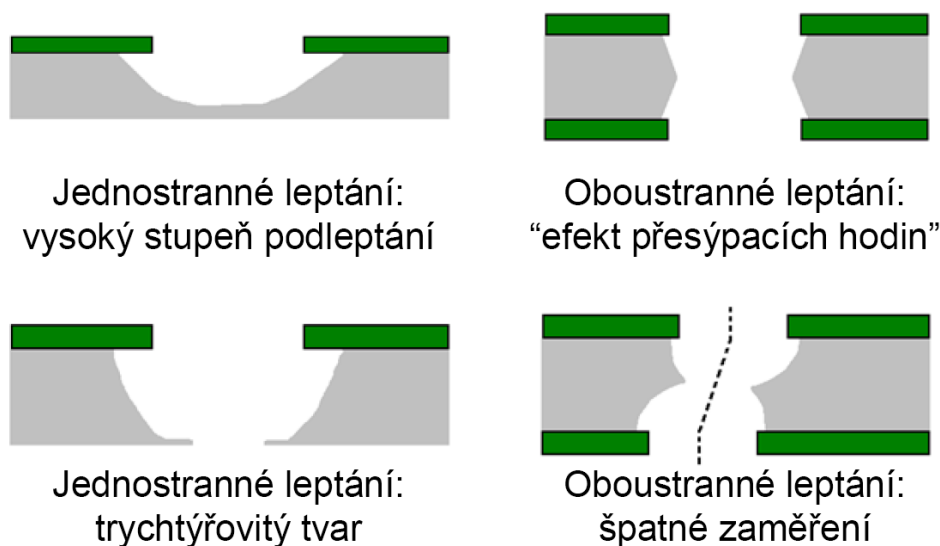
Obr. 5: Diagram příčin a následků kvality šablonového tisku – převzato z [7]

1.3 Materiály a výroba šablon

Šablony jsou standardně 75 až 500 μm vysoké kovové fólie, které mají v sobě vytvořený motiv v podobě otvorů. Tyto otvory se nazývají apertury a jejich velikost je 90 až 95 % velikosti příslušných pájecích plošek. [1, 7]

Materiály nejčastěji používané pro výrobu šablon jsou niklové mosazi kvůli snadnému zpracování. Dalším materiálem je měď, která se stejně jako mosaz pokovuje niklem. Využívaná je i nerezová ocel z důvodu své mechanické odolnosti, která značně prodlužuje životnost šablony. Mezi nově používané materiály patří také plasty. Základní výrobní technologie šablon jsou leptání, výroba laserem a galvanoplastika. [1, 2, 8]

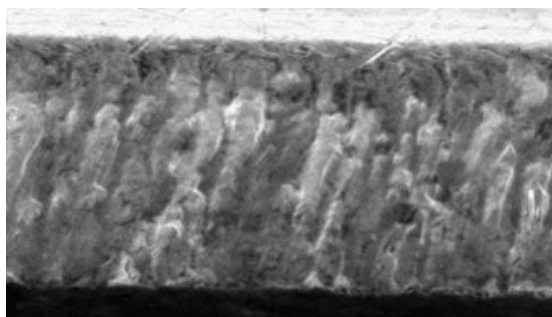
Chemické leptání se řadí mezi levné výrobní technologie. Jedná se o subtraktivní metodu, která je vhodná pro rozteče větší než 0,63 mm, pro menší rozteče se zhoršují vlastnosti. Leptání může být jednostranné či oboustranné. Využívanější je oboustranné leptání. Eliminuje se riziko nedoleptání otvoru nebo vytvoření tzv. „knife-edge“, což v praxi znamená trychtýřovitý tvar otvoru a značné omezení průchodu pájecí pasty. Dále je méně znatelné podleptání, které má za následek horší parametry apertur. I oboustranné leptání má své nedostatky. Nejvýznamnější je zúžení v místě spojení leptacích procesů, dále pak špatné vycentrování leptání. [1, 2, 8]



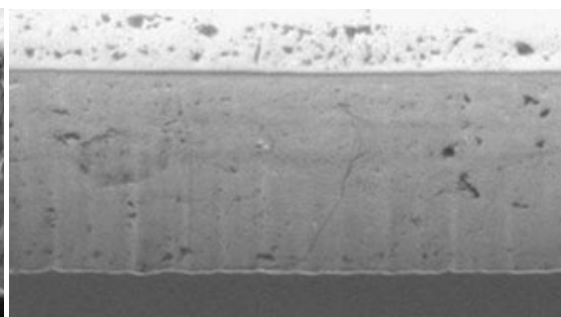
Obr. 6: Druhy chyb při chemickém leptání – převzato z [7]

Šablony vytvořené laserovým řezáním jsou přesnější než šablony vytvořené leptáním, narůstá ovšem i cena, která je až 7,5x vyšší. Tato cena je pouze orientační, protože u laserového zpracování si výrobci cenu určují dle počtu otvorů, zatímco u leptání dle velikosti plechu. Důvodem je, že laser vytváří jednu aperturu za druhou a s počtem otvorů se tak zvyšuje náročnost celého procesu výroby. Apertury jsou charakteristické tím, že mají lichoběžníkový tvar, který umožňuje snazší uvolnění pájecí pasty. Využívána je i kombinace laseru a leptání, která vykazuje lepší výsledky za příznivější cenu. [7, 8]

Nejpreciznější technologií výroby šablon je galvanoplastika, kde minimální rozměry roztečí jsou 0,2 mm. Cena je přibližně ještě 4x větší než cena laserem vyrobené šablony a je účtována dle tloušťky zpracovávaného plechu. Tvar apertur je lichoběžníkový. Na rozdíl od předešlých technologií se jedná o aditivní technologii. [7, 8, 10]



Obr. 7: Apertura vyrobená laserem – převzato z [10]



Obr. 8: Apertura vyrobená galvanoplastikou – převzato z [10]

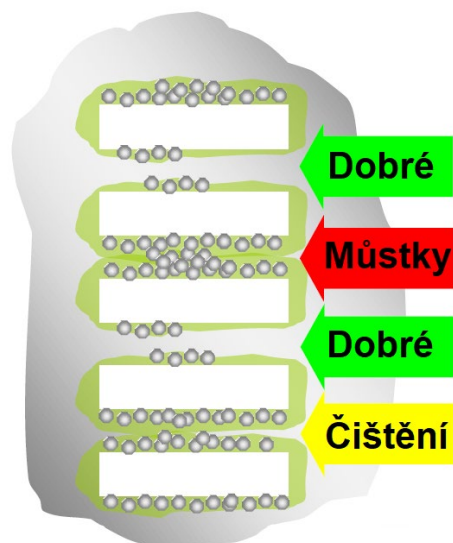
1.4 Čištění šablon

Zásadním aspektem, který ovlivňuje kvalitu tisku a životnost šablon, je čištění. Během tisku a obecně během manipulace se šablonou přichází šablona do styku s různými objekty, např. poletujícími částicemi prachu, textilními vlákny, nečistotou na substrátech atd. Nejdůležitějším faktorem je ale vyčištění šablony od pájecí pasty, která zůstává na šabloně po tisku. Cílem je minimalizace potřeby čištění šablon, protože samotným čištěním vzrůstají náklady (především výrazné zpomalení procesu a náklady na mycí prostředky). Čištění spodní strany šablony probíhá

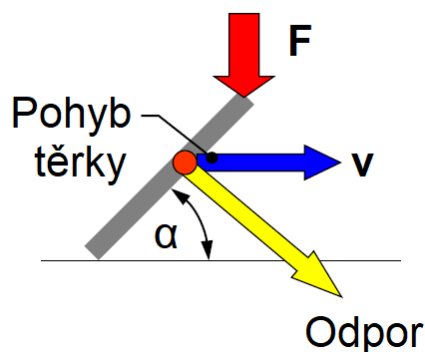
v nanášecím stroji speciální tkaninou, to ovšem není dostatečně účinná metoda a v některých případech může naopak šablonu ještě více znečistit. V dnešním průmyslu se nejčastěji využívají automatizované myčky, které dokáží silným vstřikem detergentů vyčistit i více šablon najednou. Hojně využívané jsou alkalické detergenty, jejichž složení a vlastnosti se liší v závislosti na aplikaci (čištění sít, šablon, substrátů, odstranění kalafuny, deoxidace, pasivace povrchů, ...). [7, 11]

1.5 Těrka

Těrka v šablonovém tisku se pohybuje rychlostí \vec{v} . Ve směru vektoru rychlosti před sebou valí pájecí pastu, na kterou působí silou \vec{F} , jejíž směr je ortogonální ke směru rychlosti. Standardní napětí šablon je přibližně $50 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-1}$, rychlost těrky se liší dle velikosti roztečí od 20 do $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Parametry tisku musí být optimálně nastaveny pro daný tisk, jinak bude docházet k nekvalitnímu tisku a hrozí zničení šablony nadměrným silovým působením. [1, 7, 8]

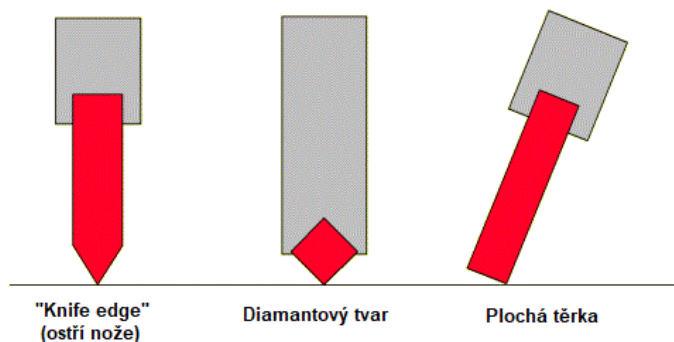


Obr. 9: Zbytky pájecí pasty na spodní straně šablony – převzato z [7]



Obr. 10: Fyzikální působení těrky – převzato z [7]

Sklon těrky je realizován jejím náklonem pod úhlem α od roviny šablony, nejčastěji používané úhly jsou v rozmezí 45–60°. Úhel naklonění je ovlivňován i materiálem těrky, který má jistou elasticitu, a silou \vec{F} . Úhel α v kombinaci s rychlostí \vec{v} určuje výsledné množství pájecí pasty, která vyplní aperturu. Přehled druhů těrek je na Obr. 11. [1, 2, 7, 8]



Obr. 11: Druhy těrek – převzato z [12]

Z konstrukčního hlediska je důležité těrky dimenzovat na šířku desky plošných spojů. Doporučené hodnoty šířky těrky jsou o 5-15 mm větší, než je šířka substrátu. Základní vlastností těrek musí být odolnost proti chemickému působení složek pájecí pasty. Používané materiály jsou nejčastěji kov (nerezová ocel, nikl) nebo polyuretan. Kovová těrka umožňuje tisk jemnějšího rastru, ale i přes svou tvrdost se používáním zvlňuje jako následek mechanického opotřebení při nerovnoměrném tisku a dále pak třením. Mezi další defekty patří zničení při nevhodné manipulaci (např. pád těrky). PUR šablony lépe kompenzují nerovnoměrné povrchy, nicméně i tak jsou preferovanější kovové těrky, především kvůli větší životnosti, eliminaci nabírání pasty těrkou a vyšší kvalitě tisku. [1, 2, 7, 8, 12, 13]

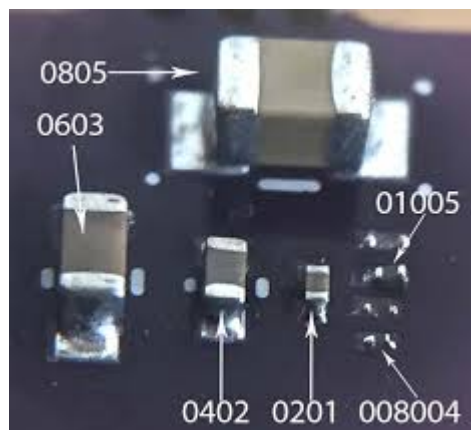
Z předchozích odstavců je patrné, že důležitým faktorem při nanášení pasty je samotná rovnoměrnost povrchu šablony a substrátu. S tím souvisí řada technických problémů. Nejčastějším zdrojem defektů v této oblasti bývají nepájivé masky kvůli své nekonstantní výšce a technologické značce, které mají za následek nadměrné vytváření můstků, protože šablona nedosedá přímo na povrch pájecích plošek. Podrobnější rozbor defektů se nachází v kapitole 1.7. [14]



Obr. 12: Kovová šablona při nanášení – převzato z [13]

1.6 Trendy v šablonovém tisku

Veškerý vývoj elektronických zařízení je vzájemně spjat se snahou o co největší miniaturizaci. Nejznámějším úkazem miniaturizace v elektronice je Moorův zákon. Se stále zmenšujícími se roztečemi se musí měnit i šablonový tisk, především preciznost výroby šablon. Zvýšené požadavky se netýkají jen šablonového tisku. Mění se i vlastnosti ostatních aspektů SMT montáže. Jsou požadavky na zapojení through hole technologie do surface mount technologie. Zmenšují se součástky (velikosti pouzder až 008004), využívají se více komponenty typu μ BGA, vyvíjí se pájecí pasty s novými vlastnostmi a mnoho dalšího, na co všechno musí celý výrobní proces reagovat. [7, 15, 16]



Obr. 13: Srovnání velikostí komponent – převzato z [16]

1.6.1 Nanopovlaky a povrchové úpravy

Již v roce 1959 predikoval laureát Nobelovy ceny za fyziku Richard Feynman ve své slavné přednášce „*There's Plenty of Room at the Bottom*“ široké využití nanotechnologií. Dnes probíhá intenzivní výzkum v oblasti pájecích past se speciálními nanočásticemi, které mohou zlepšit mechanické vlastnosti, SA:V, povrchovou energii a další parametry [17]. Do klasických pájecích past se přidávají nanočástice mědi [18], TiO_2 [19] a dalších prvků či sloučenin. Potenciál mají také pasty vytvořené pouze z nanočástic, u nichž je důraz na homogenní nanášení standardními aditivními technologiemi, aby mohly být v dohledné době aplikovány v průmyslovém měřítku [17].

Nanotechnologie se týkají i přímo šablon. V posledních letech zaznamenaly veliký vývoj nanopovlaky („nanocoating“). Tyto povlaky se vyznačují mnoha užitečnými vlastnostmi, mezi ně patří například hydrofobní a oleofobní chování, existují i povlaky fobní vůči tavidlu. Pro šablony s nanopovlaky je charakteristické snížení procenta výskytu můstků, zlepšení uvolnění pasty z apertur a snížení potřeby mytí. Bylo experimentálně potvrzeno, že nanopovlaky zlepšují až o desítky procent parametry, jako jsou solder beading (vytváření kuliček pájecí pasty), solder graping (nedostatečné přetavení kuliček pájecí pasty)

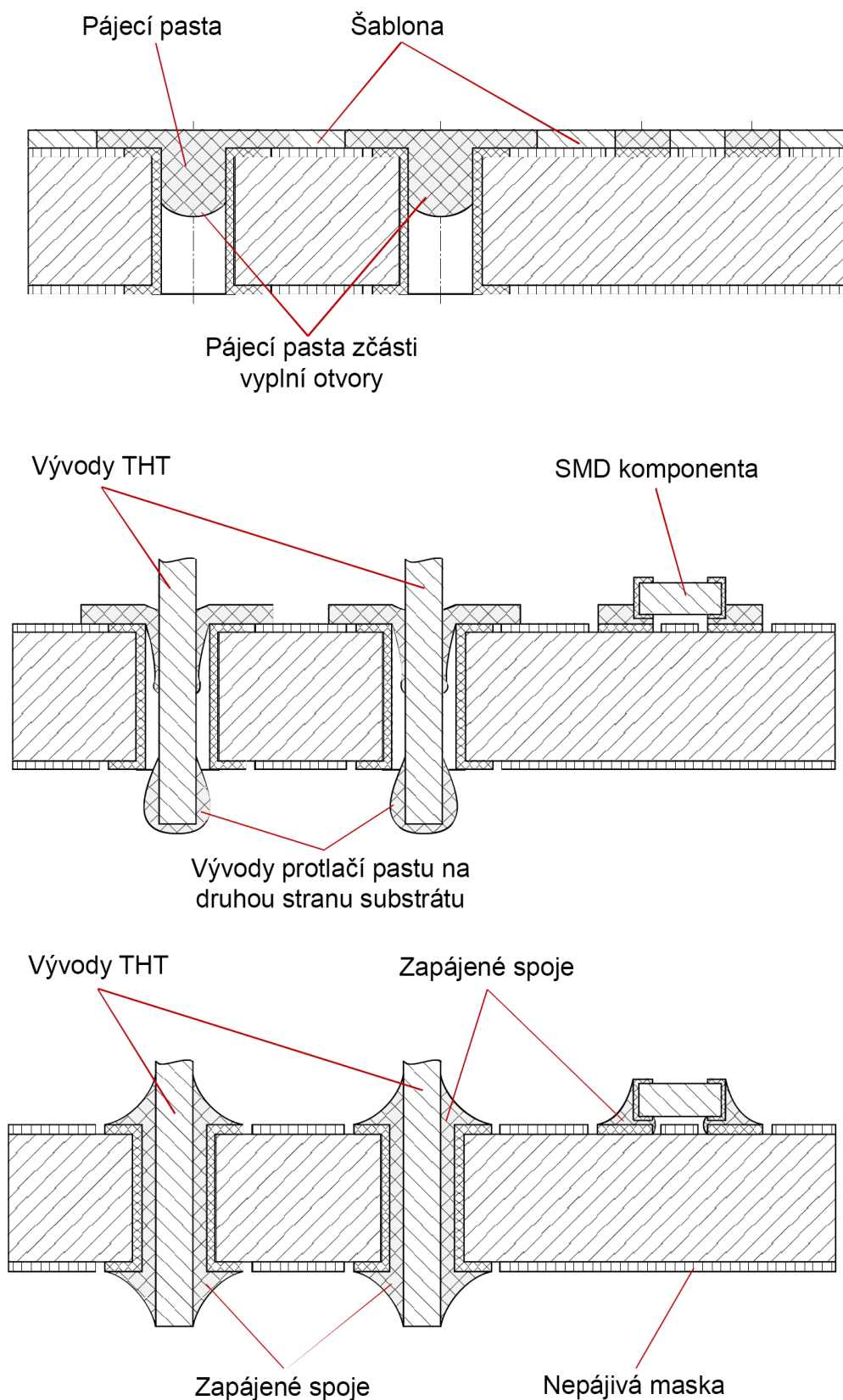
a žádaný objem nanesené pasty. Z ekonomického hlediska jsou povlaky také velice výhodné. Snižují náklady díky menšímu množství spotřebované pájecí pasty a čistících detergentů, urychlují výrobní proces a díky nižší chybovosti je snížena i potřeba servisu. Jako každá technologie i nanopovlaky mají své nedostatky. Mezi ně patří především nízká odolnost proti abrazi a některým chemickým vlivům (opakovanými nenáročnými nátěry nanosloučeninami lze tyto nedostatky minimalizovat). Některé povlaky vykazují zhoršení parametrů, proto musí být jejich aplikace důkladně experimentálně prověřena. Nanopovlaky se používají také na těrkách ke zlepšení jejich vlastností. [20–23]

I standardní šablony mají povrchové úpravy. Šablona ze strany těrky by měla být hrubší kvůli lepší adhezi pasty. Jednou z metod, jak docílit takového povrchu, je broušení. Strana substrátu by naopak měla být hladká, lehce čistitelná a se špatnou adhezí tavidla. Hlavní metodou pro úpravu této strany je leštění. Stěny apertur by měly mít co nejmenší adhezi za účelem snadného uvolňování pájecí pasty z otvoru a měly by být snadno čistitelné. Zde se využívá elektrolytické leštění, speciální povlaky nebo plazmatická úprava. Výborných výsledků dosahuje ošetření šablony plazmou v kombinaci s elektrolytickým leštěním. [7]

1.6.2 Pin-in-Paste

Mezi další progresivní technologie šablonového tisku patří Pin-in-Paste (PiP), někdy také označována jako through hole reflow (THR). Jedná se o přenesení klasické through hole technologie do procesů SMT. Potenciál má tato technologie v odpadnutí pájení vlnou či selektivního pájení, což by umožnilo centralizaci aplikování pasty na substrát do jednoho místa, zmenšení časové a prostorové náročnosti a snížení nákladů. Tato technologie je ovšem limitována stále značnou nekompatibilitou velké řady součástek. [7]

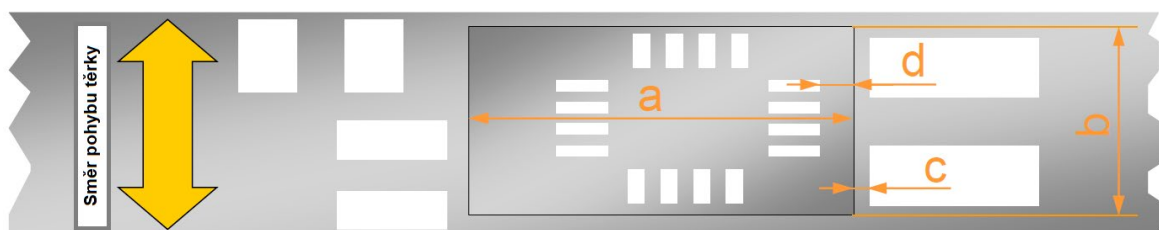
Pin-in-Paste proces probíhá tak, že do šablony se krom apertur pro SMD vytvoří i apertury pro through hole komponenty. Těrkou se nanese pájecí pasta. Ta se skrz apertury klasicky protlačí na pájecí plošky pro komponenty povrchové montáže a dále se protlačí částečně do otvorů v substrátu, kde mají být THT součástky. Poté se komponenty osadí. Vývody through hole součástek „prorazí“ pastu v prokovu a část vytlačí na druhou stranu substrátu. Pokud byly správně nastaveny parametry objemu pasty, pak se through hole komponenty zapájí z obou stran substrátu a i v otvorech. [7, 8]



Obr. 14: Proces THR – převzato z [8]

1.6.3 Step a 3D šablony

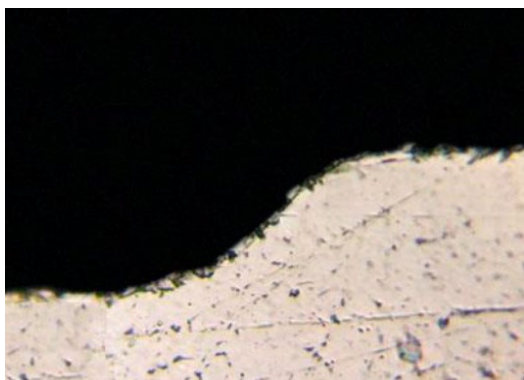
Problém s nerovnoměrnostmi na substrátu řeší step a 3D šablony. Hlavní motivací jejich vytvoření byla kompenzace výškových rozdílů, ať už se jedná o nanesení různého množství pájecí pasty pro různé druhy komponent (např. větší nános pro konektory) nebo o 3D substráty, jejichž reliéf je značně nerovnoměrný. Problém představovaly i oblasti na substrátu citlivé na tlak. To vše má za následek, že se musí tisknout ve více úrovních. Při klasické step technologii se musí řešit vzdálenosti apertur, pro které se používá step a pro které se nepoužívá. Nedodržení bezpečných vzdáleností vede ke špatnému nanesení pájecí pasty, protože těrka plně nepřilíná na okraji step oblasti. Obdobné tolerance jsou nutné i u 3D šablon. Step šablony se používají převážně pro konvenční elektroniku, kde je potřeba rozdílného množství pájecí pasty, zatímco 3D šablony jsou vhodnější pro rozdílné výšky přímo v substrátu. 3D šablony potřebují speciální těrku. Výroba 3D šablon je v současné době zaměřena především na laserovou technologii. [7, 8, 24]



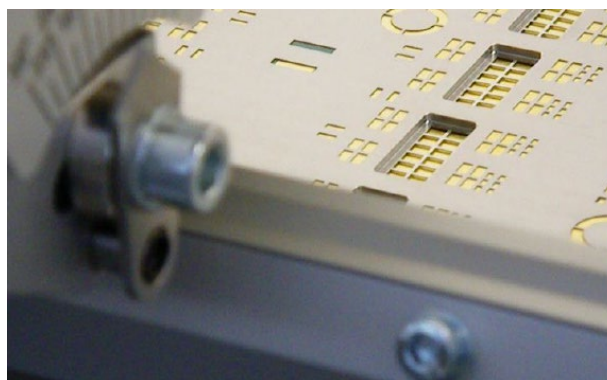
Obr. 15: Bezpečné vzdálenosti apertur od stepu šablony – převzato z [7]

Tabulka 1: Bezpečné vzdálenosti apertur od stepu šablony (v mm)

t = step	a = šířka stepu	b = délka stepu	c, d = vzdálenost apertur
0,01	>0,25	>0,25	<0,30
0,03	>1,00	>1,00	0,90
0,05	>10,00	>2,00	1,70
0,10	>30,00	>10,00	5,80
0,25	>75,00	>10,00	12,00



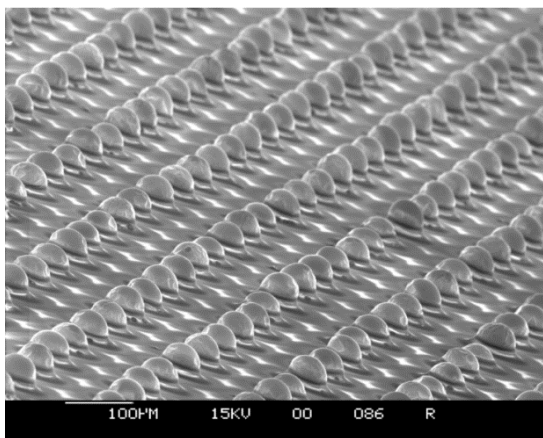
Obr. 16: Řez 50 μm stepem šablony – převzato z [7]



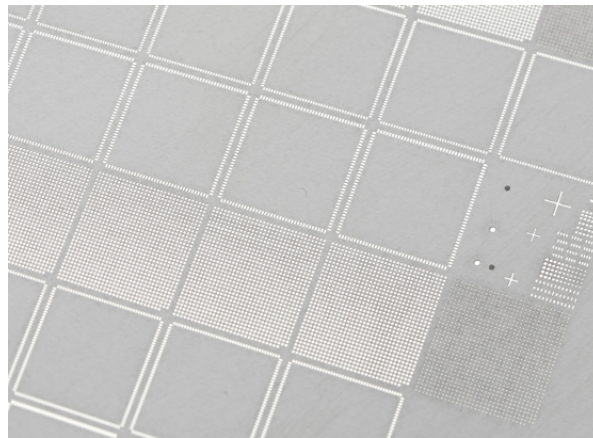
Obr. 17: 3D šablona – převzato z [7]

1.6.4 Wafer Bumping

Wafery jsou tenké polovodičové materiály (nejčastěji z křemíku), které dosahují vysoké čistoty. Wafery jsou esenciální složkou konvenční mikroelektroniky, protože se používají jako substráty k výrobě mikroobvodů a solárních článků. I v této oblasti nachází šablonový tisk uplatnění, především díky své technologické a ekonomické výhodnosti. Hlavním problémem wafer bumpingu je schopnost řídit depozici pájecí pasty pro velmi malé „bump pitches“, u nichž je velikost roztečí pod hranicí 100 μm . Dochází totiž k porušení tzv. „aspect ratio“ pravidla návrhu šablon, které udává, že délka kratší strany apertury vydělená výškou šablony by neměla mít menší hodnotu než 1,5. Tedy již pro rozteče 125 μm dochází k porušení pravidla pro šablony, které mají výšku větší než 85 μm . Šablony pro splnění pravidla tak musí být od 20 do 75 μm vysoké. Samozřejmým požadavkem je i vysoká přesnost výroby (vyločená je výroba chemickým leptáním) a schopnost zaměřit přesně DPS. Wafer bumping vyžaduje vysokou hustotu apertur těsně vedle sebe a poměrně velké množství natisknuté pájecí pasty. Musí být použita i vyhovující pájecí pasta (menší než typ 5). Kritickým místem je také kontrola kvality, protože při tomto procesu se vyskytuje nemalá chybovost. Nejdůležitějšími parametry jsou rychlost a především tlak tisku. [7, 25–29]



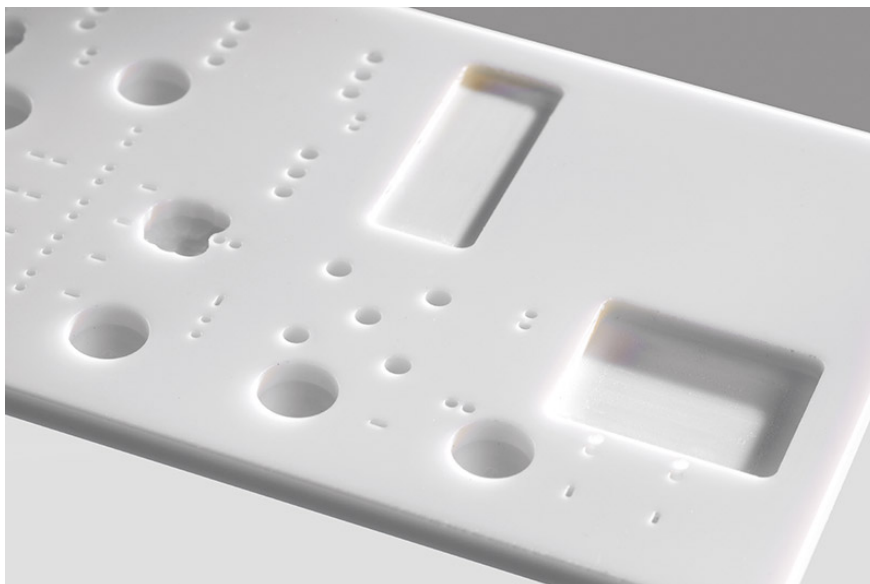
Obr. 18: Zapájená pájecí pasta s roztečí 100 μm – převzato z [26]



Obr. 19: Šablona pro wafer bumping – převzato z [29]

1.6.5 PumpPrint™

PumpPrint™ je další z technologií umožňující tisknout pájecí pastu nebo lepidlo na substráty s velice nerovnoměrným výškovým rozložením. Specifikum jsou vysoké šablony (standardně 2–3 mm, možno i 15 mm). Nejpoužívanějším materiálem je polyoxymetylén, který je možné vyrobit i v ESD provedení. POM je termoplastický polymer, který je odolný vůči rozpouštědlům v pájecí pastě. Jednou z oblastí využití této technologie je tisk na desky plošných spojů, které jsou již osazené komponentami. Zčásti tak tato technologie dokáže nahradit dispensing, přičemž odpadne nutnost výměny trysek a dojde ke zrychlení procesu, což má za následek další snížení nákladů. [7, 30]



Obr. 20: PumpPrint™ šablona – převzato z [30]

1.7 Vznik defektů a optimalizace šablon

Při přípravě, nanášení a přetavení pájecí pasty vznikají defekty, které mohou značně ovlivnit výslednou kvalitu produktu. Jsou tedy nutná opatření, která minimalizují pravděpodobnost výskytu defektů během výrobního procesu. Nutnou podmínkou je správně zaučená obsluha a kvalitně zkalibrované stroje s ideálně nastavenými parametry. Velice důležitý je samotný návrh apertur. Ten lze do jisté míry optimalizovat, ovšem ne každý defekt je řešitelný úpravou šablonového tisku.

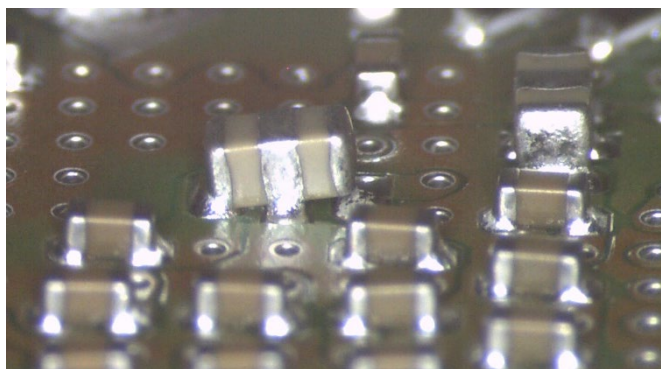
1.7.1 Špatné zamíchání a teplota pájecí pasty

Pájecí pasta je složena z několika složek. Základem jsou kuličky pájecí pasty. Podle jejich velikosti a hmotnostního podílu se určuje typ pasty. Další složkou je tavidlo, které má antioxidační účinky, a redukuje tak oxidační vrstvy na pájecích ploškách. Dále může pájecí pasta obsahovat rozpouštědla a složky pro zlepšení adheze a viskozity. Přirozenou snahou je mít tyto složky homogenně promíchané. Dalším kritickým bodem je správná teplota pájecí pasty. Pasta musí být skladována v lednici při nízkých teplotách, ale při tisku by měla mít teplotu určenou výrobcem v technické dokumentaci produktu. Oba tyto parametry jsou velice důležitým vstupním bodem pro šablonový tisk a jejich význam je hlouběji rozebrán v experimentální části, která je zaměřena právě na přípravu pájecí pasty před jejím natisknutím. [2, 7, 31]

1.7.2 Tombstones

Náhrobkem (z anglického „tombstone“) se nazývá defekt, kdy dojde k nadzvednutí nebo úplnému kolmému postavení komponent. Na součástku by měly působit stejně velké síly od nanesené pájecí pasty při přetavování. Původ tohoto jevu lze nalézt ve více faktorech. Nanesením rozdílného množství pájecí pasty se mění velikosti sil, a to způsobí nadzvednutí součástky. Další častou příčinou je offset šablony nebo samotných komponent v důsledku špatného osazení. Opět dojde ke změně rozložení sil a součástka má tendenci driftovat a nadzvedávat se. Je zřejmé, že tento jev je běžnější u malých a lehkých komponent, nejčastěji SMT rezistorů, kondenzátorů, cívek, diod atd. Najít tento defekt lze ale i u velkých komponent, například konektorů, kdy signálové vývody jsou zapájené správně, ale postranní pomocné mechanické vývody, které bývají zpravidla větší, jsou nedostatečně zapájené (např. kvůli malému množství natisknuté pasty). [7, 32, 33]

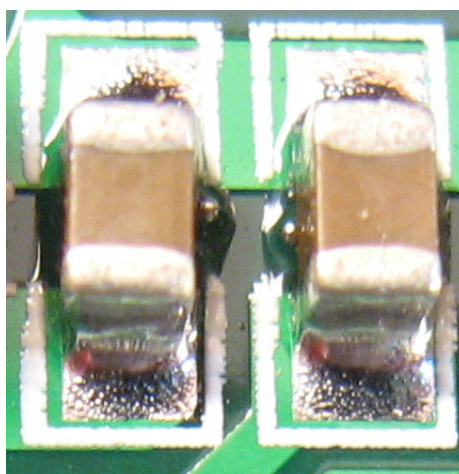
K redukci náhrobků je nutné přesné zaměření šablony. Je tedy nezbytné mít přesné zaměřování v tiskových strojích, disponovat kvalitně vyrobenými deskami plošných spojů (zaměřovací značky budou vždy na stejném místě bez offsetů) a precizně vyrobenou šablonou. Důležitým kritériem je objem nanesené pasty. Optimalizace je nutná i z pohledu vedení tepla, které musí být pro všechny pájecí plošky stejné. Komponenta by měla překrývat více jak 50 % pájecí plošky. [7, 33]



Obr. 21: Ukázka nadzvednuté komponenty

1.7.3 Solder Beading

Solder beading znamená vznik velikých kuliček pasty poblíž pájecích plošek nebo komponent. Příčinou je pájecí pasta, která se dostala pod součástku. Během přehřevu se pak uplatní kapilární jevy, které zformují kuličku. Podobně jako u náhrobků je tento defekt nejběžnější u malých komponent. Předcházet vzniku solder beadingu lze zmenšením objemu nanesené pasty, změnou přehřívacího procesu v pájecí peci nebo speciálním designem apertur, viz kapitola 1.7.5. [7, 34, 35]



Obr. 22: Defekty solder beading a solder graping – převzato z [35]

1.7.4 Bridges

Bridges (v překladu můstky) jsou pájecí plošky, které jsou neúmyslně spojeny pájecí pastou. To představuje vysoké riziko vzniku zkratu při přetavení. Nejčastějšími příčinami jsou nadměrné množství pasty, špatně vyčištěná šablona nebo nevyhovující viskozita pasty. Můstek se může vytvořit i lidskou chybou při nevhodné manipulaci s DPS. Vznik můstků hrozí i při prohýbání desky plošných spojů. Je-li deska tenká a osazená velkým počtem součástek, její mechanická pevnost nemusí být dostatečná a dojde k prohybu. Pochopitelně tento prohyb způsobí nenulový odtrh šablony, tím pádem dojde ke špatnému nanesení pasty, které může vést až ke vzniku můstků. Nejefektivnějším řešením v tomto případě jsou podpěry, které drží substrát v rovině. Doporučuje se také nepoužívat nepájivou masku mezi ploškami komponenty. [7, 36]



Obr. 23: Můstek mezi dvěma ploškami – převzato z [36]

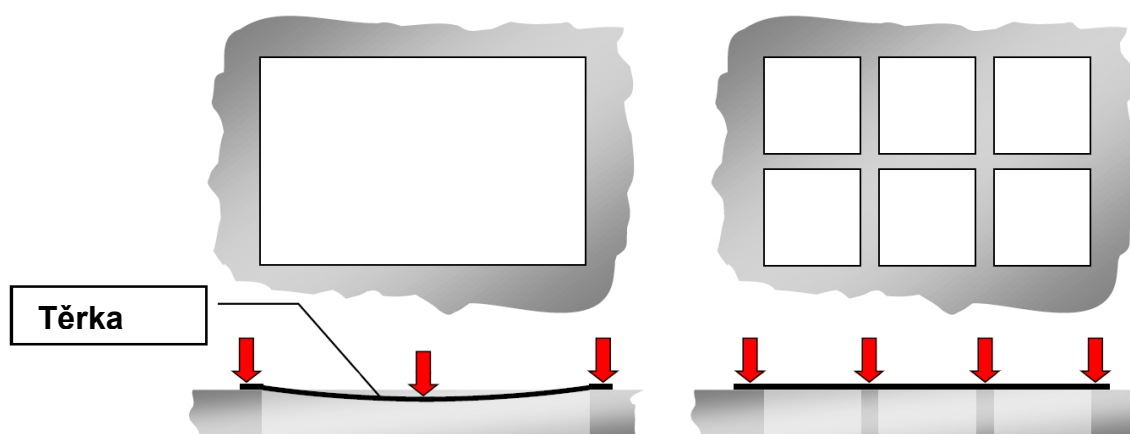
1.7.5 Objem pájecí pasty

Problematika objemu pájecí pasty se dělí na dvě části – nedostatečný a nadměrný objem. Nedostatečný objem způsobí, že pájený spoj bude mechanicky slabý nebo špatně elektricky vodivý, případně spoj nevznikne vůbec (elektrická izolace, neexistující mechanická pevnost). Naopak nadměrné množství pasty může způsobit náhrobky, solder beading nebo špatnou pozici komponenty, kdy dojde k významnému driftingu (v češtině se ujal název „zaplavání“) komponenty.

Nedostatečný objem může způsobit nízké tzv. „transfer efficiency“ (efektivnost přenosu), kdy se ze šablony uvolňuje menší množství pájecí pasty, než je požadováno. Tento jev je markantní především u malých apertur. Zabránit tomu lze změnou výroby šablony, kdy stěny apertur budou hladší a snížením rychlosti a tlaku. Do otvoru se tak sice protlačí menší množství pájecí pasty, ale významně se zmenší i tření a tlak kuliček v apertuře, tím pádem se ve výsledku uvolní více pájecí pasty. Pokud ovšem bude tlak příliš nízký, natiskne se více pájecí pasty, než je požadováno. Z tohoto faktu je patrné, jak komplikované je nastavit správný tlak, který vyhovuje šabloně a je s ním možno nanášet požadované množství pájecí pasty. Dalším problémem je nenulový odtrh šablony, kdy se natiskne pájecí

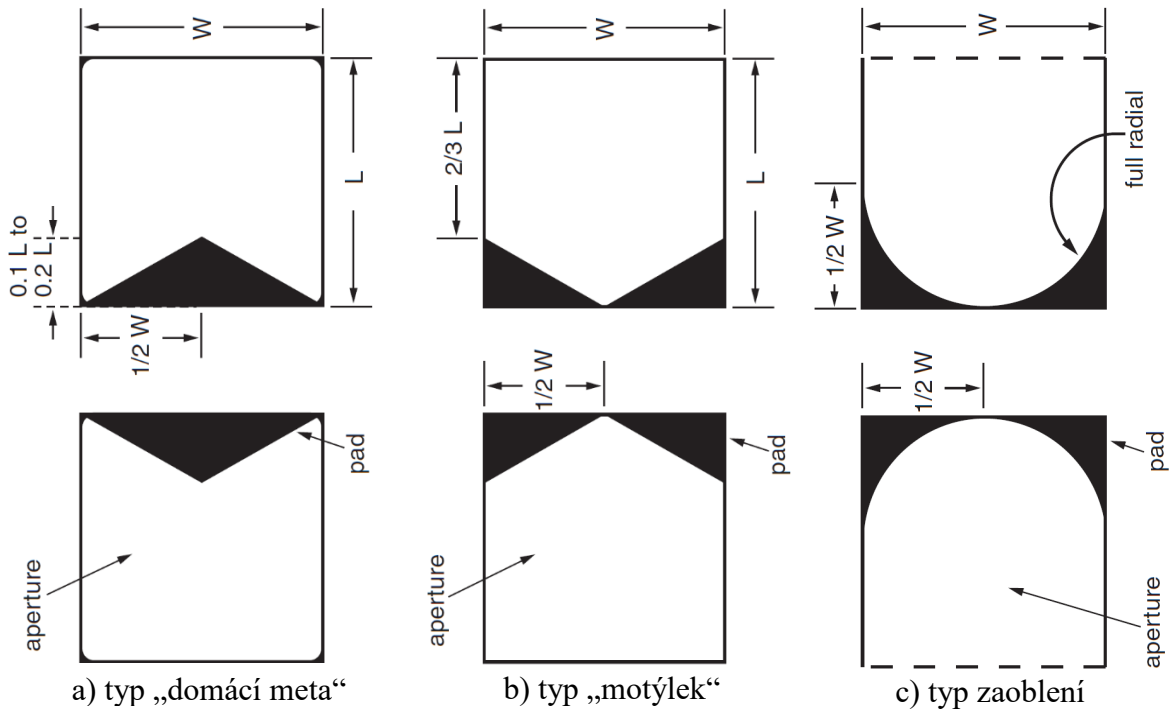
pasta, která má výšku o výšce šablony + velikost odtrhu. Tento odtrh může být způsoben prohybem desky plošných spojů nebo nerovnoměrností nepájivé masky na substrátu. [7]

Problémy nepředstavují jen malé apertury, ale také ty velké. Těrka není schopná rozeznat velikost apertury, aby mohla reagovat a udělá prohyb, který vede k tomu, že uprostřed je pájecí pasty natisknuto méně, zatímco u okrajů více. Předcházet tomu lze rozdělením velkých apertur do několika menších. Toto opatření vede ještě k redukci dutin, viz kapitola 1.7.10. [7]

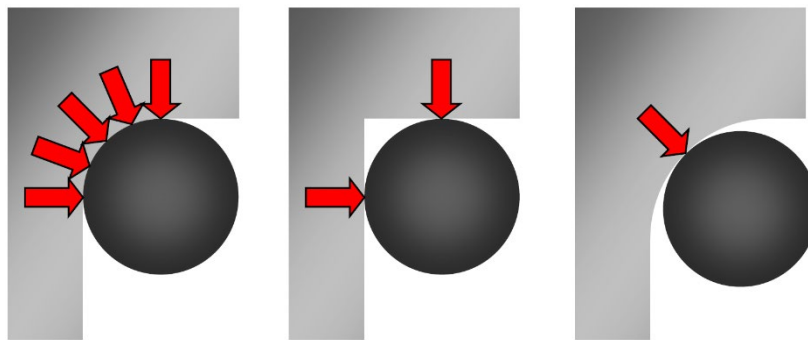


Obr. 24: Vliv rozdělení velkých apertur – převzato z [7]

Návrhář šablon by měl vytvářet pro nejmenší komponenty co největší možné apertury. Větší objem pasty dokáže lépe kompenzovat rozdílnou koplanaritu vývodů součástek. Optimalizace spočívá v obdélníkovém tvaru apertur, které se ucpávají méně než čtvercové či kruhové. Apertury jsou o 5 až 10 % menší než pájecí plošky. Tato redukce je podmíněna u bezolovnatých pájecích past dobrou smáčivostí substrátu (vzniká tak méně můstků a snižuje se potřeba mytí). Dále se rohy apertur zaoblují. To má za následek lepší uvolňování pasty z otvorů a snižuje se počet „dog ears“, viz kapitola 1.7.7. Zaoblením apertur dochází ke snížení adheze, kdy se zmenší styčná plocha stěn mezi aperturou a kuličkami pájky. Zde je nutné brát ohled na velikost kuliček, protože při stanovení špatného poloměru zaoblení rohů se může adheze naopak výrazně zvětšit. Další optimalizace lze provést speciálním designem apertur podle normy IPC-7525A. [7, 37]



Obr. 25: Speciální design šablon podle IPC-7525A – převzato z [37]



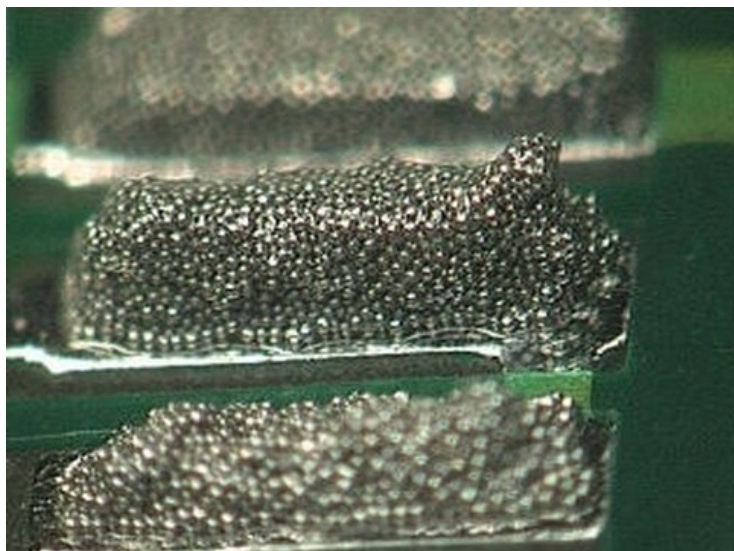
Obr. 26: Adheze kuličky pájky ke stěnám apertur – převzato z [7]

1.7.6 Studený a horký sesuv

Studený sesuv je jev, kdy nanosená pasta nedrží svůj tvar, roztéká se, a tak tavidlo může odnést kuličky pájecí pasty, kvůli čemuž může dojít ke vzniku můstků. Zde se lepších výsledků nedá docílit optimalizací šablony, máme-li nanese optimální množství pasty. Hlavním faktorem je pájecí pasta, její viskozita a složení. Pasty s vyšší viskozitou jsou na tento jev méně náchylné. Tímto jevem také velmi trpí některé nanopasty, které mají kuličky tak malé a lehké, že je tavidlo snáz odteče. V neposlední řadě je důležitá i teplota a vlhkost. Deska s natisknutou pájecí pastou by tak neměla dlouho čekat na osazení a přetavení. Druhým typem je horký sesuv. Během přehřevu se aktivují tavidla v pájecí pastě a tvar pájecí pasty začne kolabovat. [38, 39]

1.7.7 Dog Ears

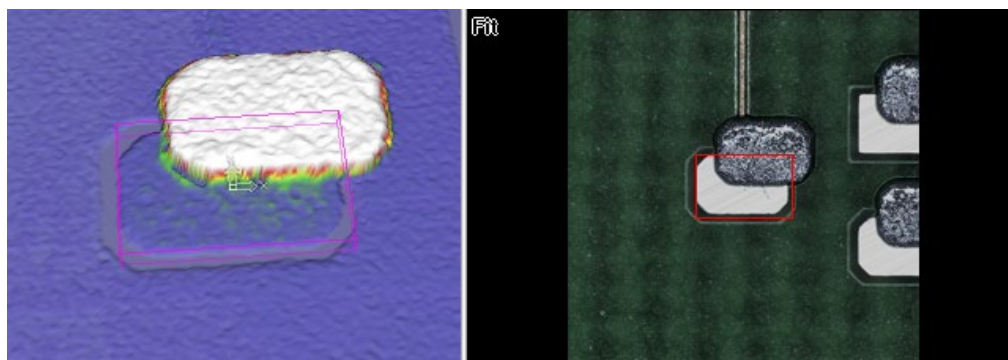
Je-li nastavena příliš velká nebo příliš nízká rychlost oddělení šablony od substrátu po natisknutí nebo je-li špatně optimalizován tvar apertur, pak dojde ke špatnému transferu pasty, kdy okraje natisknuté pasty výrazně přesahují optimální výšku. Tato chyba je označována v překladu jako psí uši kvůli jisté podobnosti. [7, 40]



Obr. 27: Ukázka defektu "dog ears"
– převzato z [40]

1.7.8 Zaměření šablony

Při špatném zaměření může dojít k offsetu natisknutí pájecí pasty od požadovaného stavu. Příčina může být ve špatné kalibraci automatického stroje, který nedokáže dorovnat šablonu, jak má. Chybou mohou být špatná technologická značení na substrátech nebo jejich měnící se poloha způsobená nekvalitní výrobou. Toto vede k různým defektům, kdy se pájecí pasta tiskne částečně mimo plošky a může docházet k můstkům, solder beadingu, náhrobkům a dalším chybám.



Obr. 28: Špatná pozice pasty v důsledku chybného zaměření šablon

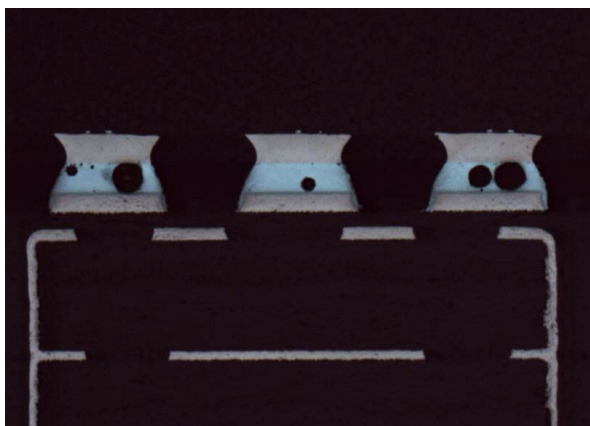
1.7.9 Solder Graping

Solder graping vzniká nevhodným přetavením pájecí pasty. Na povrchu jsou znatelné kuličky pájecí pasty, protože se kuličky roztavily pouze částečně. Problém solder grapingu hrozí především u malých komponent, protože podíl vnějších kuliček pájecí pasty z celkového množství je podstatně větší. Snaha je tedy docílit největšího možného objemu pájecí pasty. Manipulovat lze i s procesem přetavení, kde je možné upravit čas a teplotu předehřevu a tečení. Solder graping je vyfocen na *Obr. 22.* [41]

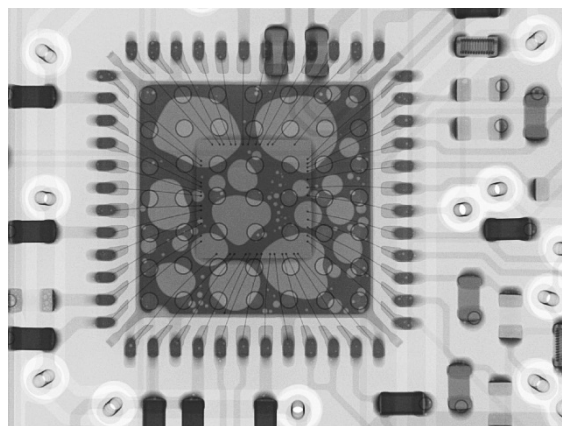
1.7.10 Voids

Během procesu přetavení musí být zajištěn kanál pro únik výparů tavidla a dalších plynů. Nemůžou-li se výpary odpařit, pak vznikají v pájecí pastě plynové dutiny, které mají zásadní vliv na kvalitu pájeného spoje. Čím jsou voidy větší, tím horší vliv mají. Potíž je i v jejich diagnostice, kdy jedinou nedestructivní metodou je rentgen, který je finančně nákladný. [7]

Předcházet dutinám lze různými metodami. Pro velké plošky je vhodné aperturu rozdělit na více menších otvorů. Tím se krom lepší kontroly nad nanášeným objemem pasty vytvoří i kanály umožňující únik výparů. Další metodou, jak zabránit vzniku voidů, je zvětšit výšku natisknuté pasty. Tím se zvětší výška kanálu pro únik výparů a také se předejde problému, kdy roztékající se tavidlo ucpe během předehřevu kanál. Vznik voidů lze eliminovat i změnami parametrů přetavení. Je doporučována maximální teplotní špička a také prodloužení doby tečení. Skvělých výsledků dosahují přetavovací pece s vakuem. [7]



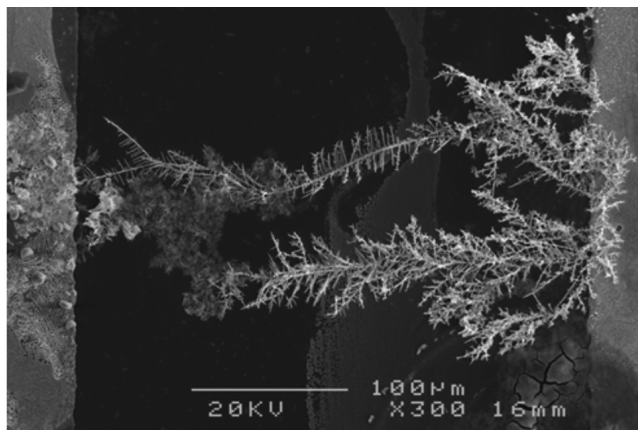
Obr. 29: Výbrus odhalující dutiny



Obr. 30: Rentgenový snímek komponenty s dutinami

1.7.11 Dendrity

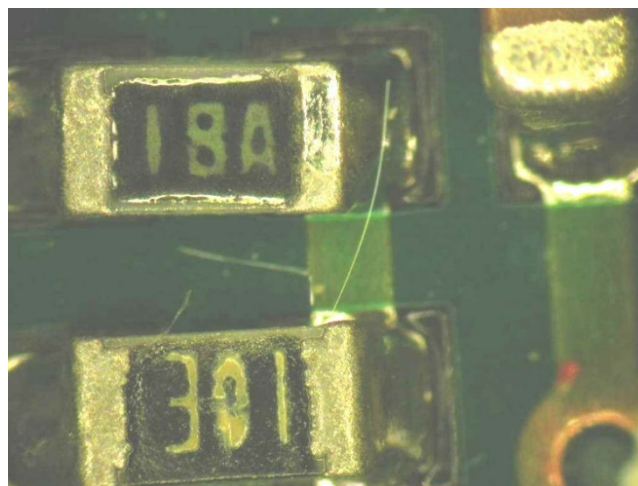
Při elektrochemické migraci vznikají vlivem stejnosměrného napětí a přítomnosti jistých elektrolytických roztoků metalická vlákna na povrchu substrátu. Tato vlákna jsou vodivá a můžou se z nich vyvinout dendrity. Dendrity jsou strukturně podobné stromečkům a mohou způsobit zkrat mezi pájecími ploškami. Vysoká proudová hustota může vést až k tomu, že malý dendrit vyhoří. Předcházet dendritům lze čištěním substrátů a ochrannými povlaky před klimatickými jevy. Vznik dendritů šablonový tisk neovlivňuje. [42, 43]



Obr. 31: Ukázka dendritu na DPS – převzato z [43]

1.7.12 Whiskers

Whiskery jsou krystaly, které vznikají na povrchu kovů. Jedním z náchylných kovů je i cín, který tvoří podstatnou část pájecích past. Whiskery jsou elektricky vodivé a mohou způsobit zkrat, ať už v místě svého vzniku nebo v jiné části DPS (odlomením a přemístěním). Whiskery je poměrně těžké diagnostikovat, protože jejich průřez se pohybuje od 1 do 5 mikrometrů a jejich délka nepřesahuje 500 mikrometrů. [44]



Obr. 32: Ukázka whiskeru – převzato z [45]

Z pohledu šablonového tisku lze výskyt whiskerů minimalizovat větším množstvím pájecí pasty, protože bylo experimentálně prokázáno, že malý objem pájecí pasty je náchylnější k výskytu whiskerů. [44]

2 Experimentální část

Jak již bylo nastíněno v teoretické části práce, pájecí pasta obsahuje mnoho složek, které je nutné před tiskem zamíchat, aby bylo dosaženo homogenního rozložení. Pájecí pasty se skladují v lednicích o řízené teplotě nejčastěji od 2 do 9 °C v závislosti na typu pasty. Pro nanášecí proces se musí pasta aklimatizovat přibližně na pokojovou teplotu, aby bylo docíleno ideální viskozity. Přesné hodnoty ke konkrétním produktům jsou uvedeny v technické dokumentaci výrobce.

Výrobci garantují vlastnosti pájecí pasty pouze pro následující postup: vyjmout pájecí pastu z lednice, nechat ji samovolně ohřát na pokojovou teplotu a ručně ji třerkou zamíchat. Proces aklimatizování ale trvá několik hodin a manuální míchání pájecí pasty je silně závislé na lidském faktoru.

Praktická část je z výše uvedených důvodů zaměřena na manipulaci s pájecí pastou před jejím nanesením na substrát. Byl zkoumán vliv automatického mixéru na kvalitu pájecí pasty a šablonového tisku. Cílem bylo zjištění, zdali lze automatizovat ohřívání a míchání pájecích past beze ztráty kvality tisku.

Experimentální část probíhala ve společnosti Rohde & Schwarz závod Vimperk, s. r. o. Jedná se o soukromou nadnárodní společnost s tradicí 86 let. Specializuje se v oblastech měřicí a testovací techniky, broadcasting, monitoringu a testování sítí, kybernetické bezpečnosti a zabezpečených komunikací. Část výrobních kapacit má Rohde & Schwarz na jihu Čech ve Vimperku, kdy zde byl v roce 2001 založen první závod společnosti mimo německé území. Jedním z oddělení vimperského závodu je výroba elektronických sestav, kde byly experimenty realizovány.

2.1 Použité materiály a zařízení

2.1.1 Pájecí pasta

Pájecí pastou pro experimenty byla určena DP 5505 od výrobce Interflux® Electronics. Tento materiál byl vybrán vzhledem k direktivě RoHS 1 (akronym pro „Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment“, předpis 2002/95/EU, později nahrazen předpisem 2011/65/EU), která s účinností od 1. července 2006 výrazně omezuje užití olovnatých pájecích past v elektronickém průmyslu. Tuto legislativu přebraly i země mimo EU (Švýcarsko, USA, Jižní Korea, ...). Olovnaté pájení se v těchto zemích omezilo především na oblasti medicínských aplikací, automotive a armády. S pastou DP 5505 má společnost dlouhodobě dobré zkušenosti, a proto byla snaha neměnit pastu, ale pouze procesní parametry. [46, 47]

Složení pasty je 96,5 % cínu, dále 3,0 % stříbra a 0,5 % mědi. Celkový váhový podíl kovových částic je 88,5 %. Typ pasty je 4, tj. kuličky pasty mají velikost od 20 do 38 μm . Její vlastností je tzv. „no-clean“. Zbytky tavidla není potřeba v ideálním prostředí (bez výkyvů teplot, vlhkosti a dalších environmentálních parametrů, které by umožnily iontovou migraci zbytků aktivátoru) po přetavení čistit, a je tak možné přímo po přetavení elektronickou sestavu testovat, například metodou flying probe. Svým chemickým složením předchází pasta vzniku dutin a splňuje standard IPC 7095, který se týká implementace technologie bezolovnatého pájení pro BGA komponenty. [47]

Výrobce doporučuje samovolné ohřátí na pokojovou teplotu a zamíchání třkou. Provozní teplota pasty je 15 až 25 °C při 40 až 75% relativní vlhkosti vzduchu. Nastavení rychlosti třky je doporučeno 20 až 150 milimetrů za sekundu a tlak 250 až 300 gramů na centimetr délky třky. Viskozita by se měla pohybovat mezi 700 000 a 1 000 000 cPs (měřeno Brookfieldovým viskozimetrem). [47]

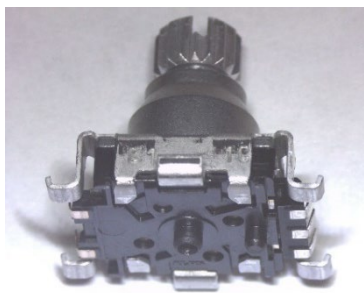
2.1.2 Testovací deska plošných spojů

Testovací deskou byla relativně jednoduchá deska plošných spojů, která obsahuje pouze tři druhy komponent určené pro povrchovou montáž. Důvodem výběru této desky byla rozmanitost velikostí pájecích plošek a také zmíněná jednoduchost desky, kdy samotné natisknutí pájecí pasty je závislé na méně faktorech. Experimenty probíhaly pouze na horní (TOP) straně desky. Pevná oboustranná deska je vytvořená z FR4 laminátu, kdy výztuž tvoří skleněná tkanina a pojivem je epoxidová pryskyřice. Tloušťka měděných cest je 18 μm . Na každém formátu byly dvě desky.

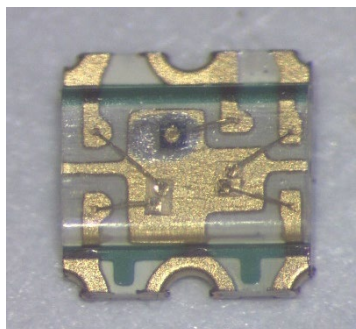
Nejvýraznější součástí desky je rotační enkodér (na desce značen jako B300x). Jedná se o elektromechanickou komponentu, která převádí polohu hřídele na elektrický signál. Rozměry jsou 18x15x16 milimetrů. Na jedné desce se jich vyskytuje šest. [48]

Další komponentou byl LED čip s šesti vývody v pouzdře 0606 (značen P00x). Vývody jsou anody a katody modré, červené a zelené elektroluminiscenční diody. Rozteč vývodů je 0,3 milimetrů. Rozměry pouzdra jsou 1,6x1,6x0,35 mm. Těchto komponent se na desce vyskytovalo 16. [49]

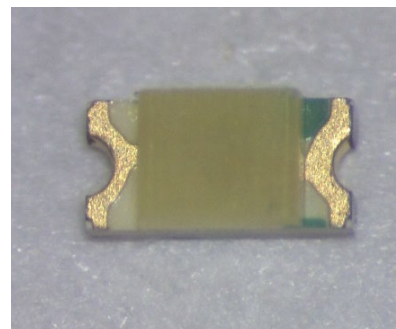
Poslední a nejmenší komponentou jsou opět elektroluminiscenční diody, tentokrát se dvěma vývody v pouzdře 0603 s rozměry 1,6x0,8x0,6 mm (značeny také P00x). Těchto diod bylo na desce 9. [50]



Obr. 33: Rotační enkodér



Obr. 34: 0606 LED čip



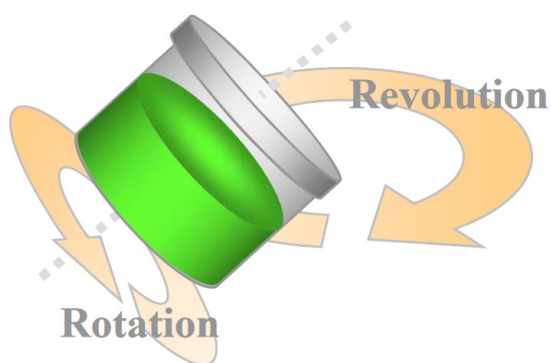
Obr. 35: 0603 LED čip

2.1.3 Odstředivý mixér

Použitým míchacím zařízením byl THINKY Mixer SR-500. Jedná se o planetární odstředivý automatický mixér. Přídavné jméno planetární je použito kvůli analogii s planetárním modelem známým z astrofyziky. Kelímek pájecí pasty se totiž neotáčí jen kolem osy mixéru (v analogii revoluce Země kolem Slunce), ale také má vlastní rotaci (rotace Země = 1 siderický den). Osa kelímku je nakloněná pod úhlem 45° vůči ose mixéru (obdobně je nakloněná osa Země vůči ose Slunce). Poměr revoluce a rotace je 1:2,5. [51]

Rychlost otáčení určuje přetížení, které dosahuje hodnot okolo 400 G. Pro srovnání trénování astronauti upadají do bezvědomí při hodnotách větších jak 9 G, při 20 G dochází k hromadným frakturám kostí. Revoluce a rotace zajistí, že se materiál promíchá, zatímco vzduchové bubliny mají tendenci dostávat se z materiálu. K vyvážení se buď používá míchání dvou past proti sobě zároveň nebo při míchání jedné se pasty se nastavuje závaží, aby nedocházelo k mohutným vibracím zařízení. [51, 52]

Novější typy mixérů mají například speciální algoritmy míchání, kdy po různě dlouhou dobu se substance v kelímku míchá různou rychlostí. Dále se mixéry mohou lišit vnitřní atmosférou. Nejlepší mixéry na trhu jsou vakuové. [51]



Obr. 36: Rotace a revoluce kelímku
– převzato z [51]



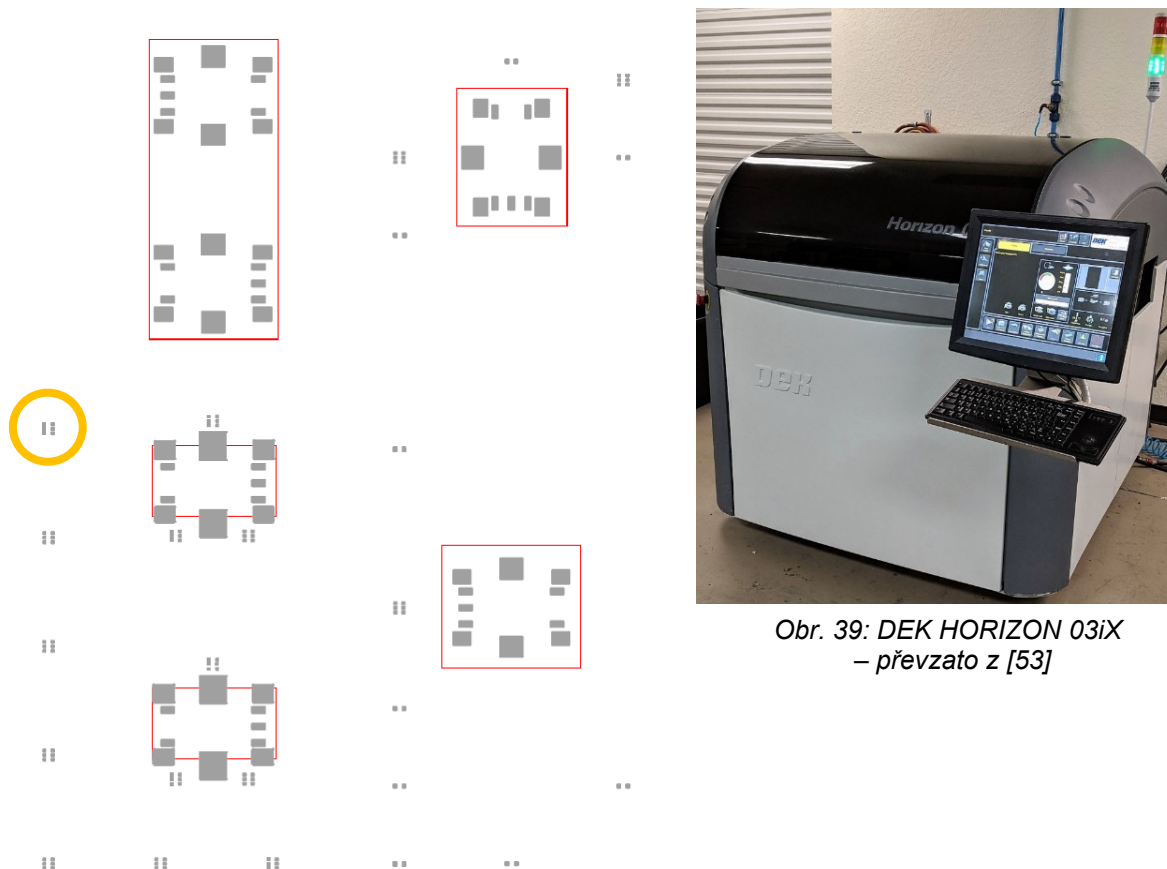
Obr. 37: Automatický mixér

2.1.4 Šablonový tisk

Sítotiskovým strojem byl DEK HORIZON 03iX, který je velice rozšířenou platformou v průmyslu. Motiv šablony pro jednu desku je znázorněn na Obr. 38. Výška šablony je 200 μm a v místě stepu 120 μm . Step je vyznačen červenými obdélníky. Šablona byla vyrobená laserem a je zhotovena z nerezové oceli. Jako čisticí prostředek pro mytí šablon byl užit VIGON[®] SC od společnosti Zestron, který byl vyvinut právě pro potřeby čištění SMT šablon od pájecí pasty. Pro stabilizaci desky plošných spojů se používají mechanické podpěry, které zajišťují, že je substrát v rovině bez prohybů.

Tabulka 2: Nastavení parametrů šablonového tisku

Parametr	Nastavení
Přední a zadní tlak	12 kg/483 mm
Přední a zadní rychlost tisku	50 mm/s
Oddělovací rychlost	15 mm/s
Oddělovací vzdálenost	3 mm
Mezera při tisku (odtrh)	0 mm
Míra čištění	po 5 deskách
Těrka	kovová



Obr. 38: Šablona testovací desky se zvýrazněnou pozicí P4001 (viz kapitola 2.3)



Obr. 39: DEK HORIZON 03iX – převzato z [53]

2.1.5 Inspekce pájecí pasty

Použitým systémem SPI („Solder Paste Inspection“ = inspekce pájecí pasty) bylo zařízení HS-70 od společnosti PARMi. Mezi hlavní parametry zařízení patří rychlost snímání, která dosahuje 100 cm²/s při rozlišení 13x13 μm nebo 80 cm²/s při rozlišení 10x10 μm. Skenování probíhá vyzařováním laserových paprsků pod daným úhlem a body těchto paprsků snímá kamera kolmá na povrch substrátu. V programu pro daný výrobek jsou nastaveny očekávané parametry (výška, plocha, objem, offset) a tolerance, na základě kterých SPI vyhodnotí natisknutou pastu na dané pozici jako vyhovující či nevyhovující. Obdobně jako u tisku se i zde používá podpěrný systém, aby se předešlo prohýbání DPS, jinak by systém SPI nebyl schopen měřit přesně. [54]



Obr. 40: SPI HS70 – převzato z [54]

The screenshot displays the SPI software interface. At the top, there are navigation tabs for 'Period View' and 'Daily Group View'. Below this is a 'Model List' table with columns for No., Model Name, and Panel Size(um). A 'Panel List' table follows, showing inspection results for various panels, including columns for Barcode, Insp. Time, Warp(um), Defect Type, and User. The bottom right section shows a detailed view of a defect, labeled '#3052[18/30]', with a 3D surface plot and a corresponding 2D image. A table below the images provides specific inspection results for this defect.

Insp. Result	Excessive Area, Excessive Volume, Bridge	Name / Shape	3052 [1(0,0)]_(T402) / Circle
Height	164.64 um(137.20%)	Size / Pitch	254.00x558.00 / 0.00(um)
Area	185409.9929 um ² (144.85%)	Pin Number	3
Volume	26998300.105333 um ³ (175.77%)	Height	120.00 um(60~180%)
Offset X	-27.91 um(-10.99%)	Area	128000.0061 um ² (60~140%)
Offset Y	-6.26 um(-1.12%)	Volume	15359999.611974 um ³ (60~160%)
Bridge	0 (H : 134.7um L : 298.1um)	Offset X	-200.00~-200.00 um
Shape	-	Offset Y	-200.00~-200.00 um

Obr. 41: Vyhodnocení můstku programem SPI

2.2 První experiment

Cílem prvního experimentu bylo zjistit, která nastavení jsou vhodná pro automatické míchání pájecí pasty, a která by tak mohla postoupit do dalšího experimentu k hlubší analýze. Sekundárním cílem v této části bylo zjistit, kdy se pájecí pasta mícháním znehodnotí, ať už přehřátím nebo odloučením jednotlivých složek.

Rozsah otáček automatického mixéru se pohybuje od 200 do 1200 otáček za minutu ($\text{ot/min} = \text{rpm} = \text{„revolutions per minute“}$). Byl stanoven krok 200 rpm. Testovalo se tak šest nastavení otáček (200; 400; 600; 800; 1000; 1200 rpm). Každé nastavení otáček se testovalo pro stanovené časové intervaly. Maximální doba míchání mixéru je 15 minut. Především zpočátku byl stanoven hrubší krok míchání, protože se předpokládalo, že při krátké době míchání pasty budou výsledky nezajímavé. Jednotlivé kroky v minutách byly: 1; 4; 6; 8; 10; 12,5; 15 min. Bylo tak provedeno 42 měření teploty po zamíchání pájecí pasty.

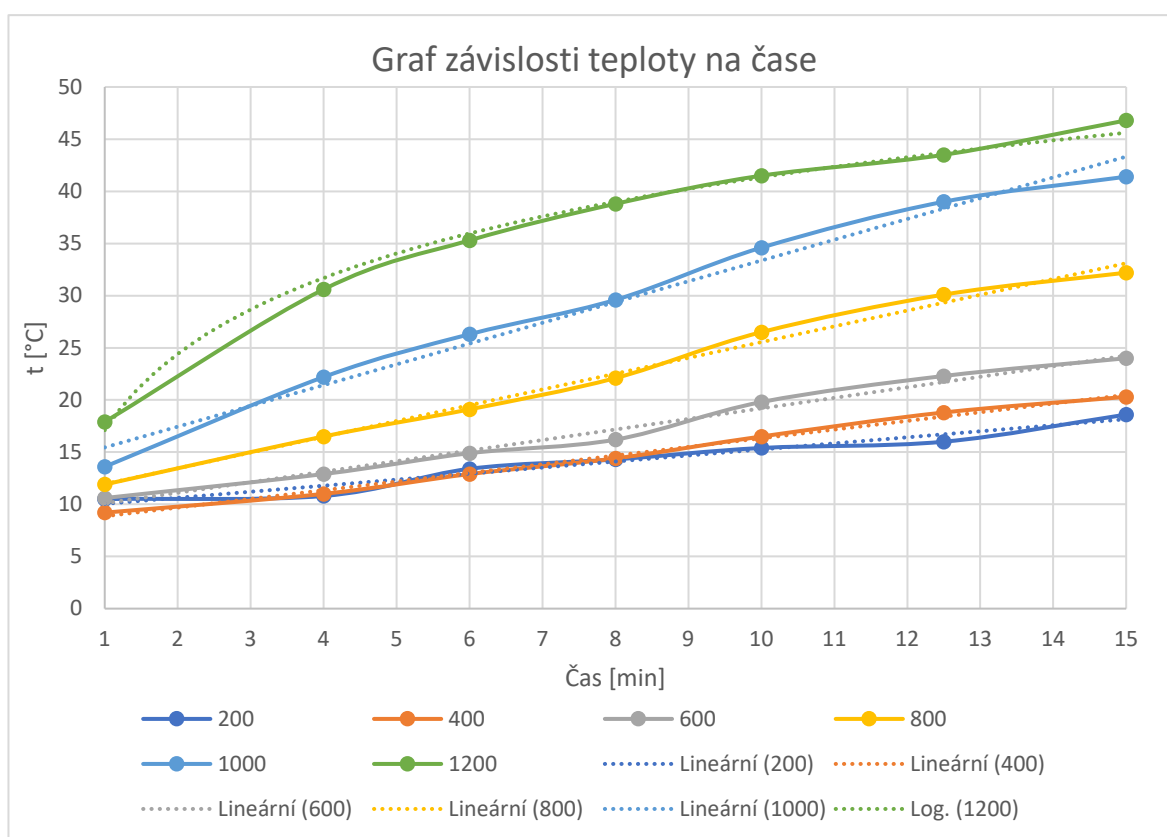
Teplota pájecí pasty byla měřena pokaždé i před mícháním po vyjmutí z lednice. Technická dokumentace pájecí pasty uvádí, že maximální skladovací teplota pájecí pasty je $7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při měření vyšlo najevo, že některé pájecí pasty měly teplotu vyšší jak maximální povolenou. Byl vyloučen vliv periodického způsobu udržování teploty v lednici či opakovaného otevírání lednice (např. přes víkend s pastami ani s lednicí nebylo nijak manipulováno). Rozdíl naměřených teplot past byl až $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, lze tedy vyloučit i měřicí chybu teploměru Voltcraft K101. Nebyl nalezen žádný vzorec chování či korelace k tomuto jevu a tento problém je nadále otevřený.

Kromě teploty pájecí pasty byla vyhodnocována i její viskozita. Viskozita se měřila orientačně postupem doporučeným výrobcem pasty. Zaznamenáván byl i okamžik, kdy se tavidlo začalo od kuliček pasty oddělovat. Pájecí pasta byla posléze nanášena na substrát a kontrolována pod mikroskopem Lynx od Visual Engineering.

Naměřené hodnoty teploty pájecí pasty po zamíchání mixérem zobrazuje *Tabulka 3*. Data z tabulky jsou zanesena do *Grafu 1*. Jedná se o závislost teploty pájecí pasty po zamíchání na čase pro každé nastavení otáček. Data jsou proložena funkcemi, pro které mají největší spolehlivostní interval.

Tabulka 3: Naměřené teploty pájecí pasty [°C] pro jednotlivá nastavení

Čas [min]	Otáčky [rpm]					
	200	400	600	800	1000	1200
1,0	10,5	9,2	10,6	11,9	13,6	17,9
4,0	10,8	11,0	12,9	16,5	22,2	30,6
6,0	13,4	12,9	14,9	19,1	26,3	35,3
8,0	14,3	14,4	16,2	22,1	29,6	38,8
10,0	15,4	16,5	19,8	26,5	34,6	41,5
12,5	16,0	18,8	22,3	30,1	39,0	43,5
15,0	18,6	20,3	24,0	32,2	41,4	46,8



Graf 1: Závislost teploty pájecí pasty na čase pro dané nastavení otáček

Proložení všech nastavení odpovídají lineární funkci, pouze nastavení 1200 otáček za minutu odpovídá logaritmické funkci. Z této skutečnosti lze usuzovat, že toto nastavení významně mění vlastnosti pájecí pasty již po velmi krátké době od počátku míchání. Už při měření na čtyřech minutách byla tato pasta o více jak 5 °C přes povolený teplotní interval daný výrobcem. Při šesté minutě už bylo znatelné i oddělení složek pájecí pasty.

Důležité momenty v měření zachycuje *Tabulka 4*. Tabulka znázorňuje, kdy bylo pozorováno promíchání pasty (odpovídající viskozita), kdy se pasta dostala mimo své teplotní limity a kdy došlo k oddělení složek (usazení a ztvrdnutí těžkých kuliček pasty na dně, tavidlo tendence přesunu k hladině).

Tabulka 4: Důležité časové okamžiky měření teploty pájecí pasty

Otáčky [rpm]	Promíchaná pasta	Přehřátí pasty	Oddělení složek pasty
200	-	-	-
400	-	-	-
600	12,5 min	-	-
800	8,0 min	10,0 min	15,0 min
1000	6,0 min	6,0 min	10,0 min
1200	4,0 min	4,0 min	6,0 min

Při měření bylo zjištěno, že dosavadní nastavení mixéru (1000 rpm po dobu 5,5 minut) není vyhovující. Viskozita sice vyhovuje, ale teplotně je nastavení na horní hranici. Toto zjištění dokládá podrobnější měření teploty i odpovídající proložení z *Grafu 1*.

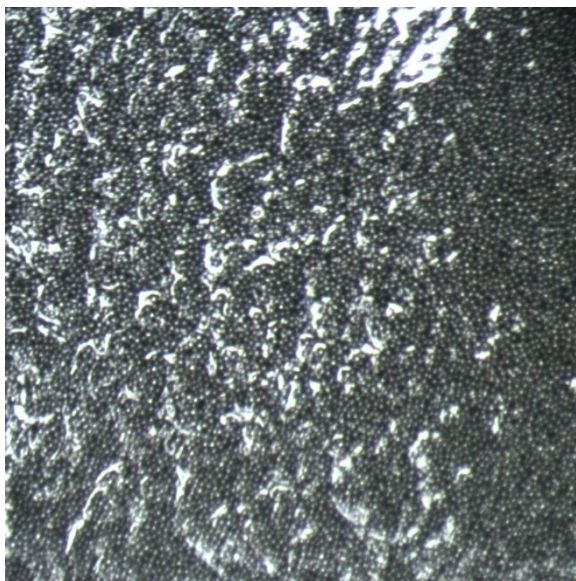
Za nevyhovující lze označit 200 a 400 otáček za minutu. Teplotně se sice obě nastavení dostaly přes nejnižší hranici danou výrobcem (15 °C), ale jejich viskozita byla vysoká a pasta nebyla optimálně promíchána.

Zničení pájecí pasty se povedlo pro tři nastavení otáček. U těchto nastavení došlo jak k tepelnému znehodnocení, tak i k oddělení složek pájecí pasty. Na *Obr. 42* je vidět sedimentace kovové složky pájecí pasty pro nastavení 1200 ot/min po dobu 12,5 minut. S pastou ze dna kelímku nelze nijak pracovat a vykazuje vlastnosti pevné látky. Zbytek pasty má naopak příliš nízkou viskozitu pro použití v šablonovém tisku. S většími otáčkami a delšími dobami otáčení vrstva sedimentů na dně kelímku rostla.

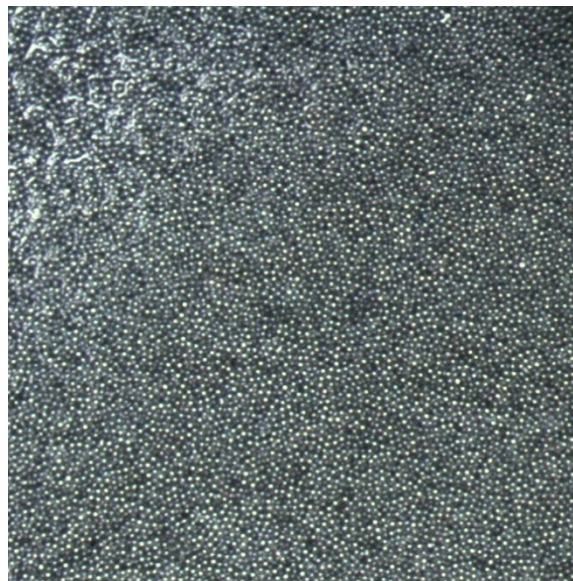


Obr. 42: Usazeniny na dně pasty

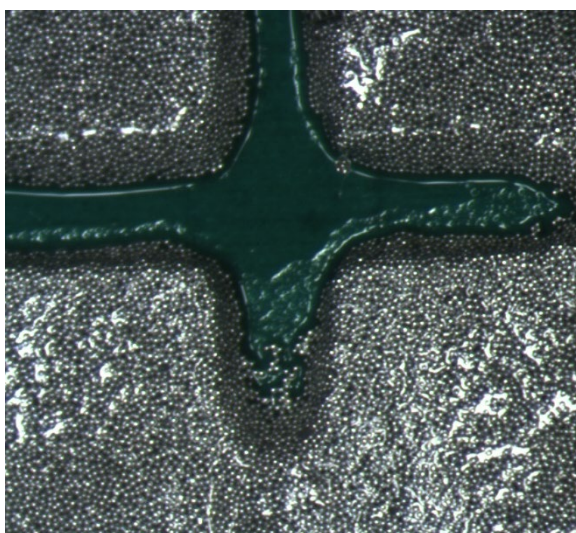
Na *Obr. 43* a *Obr. 44* jsou snímky z mikroskopu pro nastavení 1200 ot/min po dobu 15 minut. Jedná se o natisknutou pastu ze stejného kelímku s tím rozdílem, že levý vzorek byl nabrán z hladiny a pravý vzorek byl nabrán ze dna kelímku. Na levé fotografii je vidět více odlesků od tavidla, zatímco na pravé fotografii se vyskytuje tavidlo podstatně méně. Pro takto zničené pasty je patrný i rozdíl v nanášení. Ten ilustrují *Obr. 45* a *Obr. 46* pro nastavení 800 otáček za minutu po dobu 15 minut. Žádný ze vzorků neodpovídá nárokům šablonového tisku.



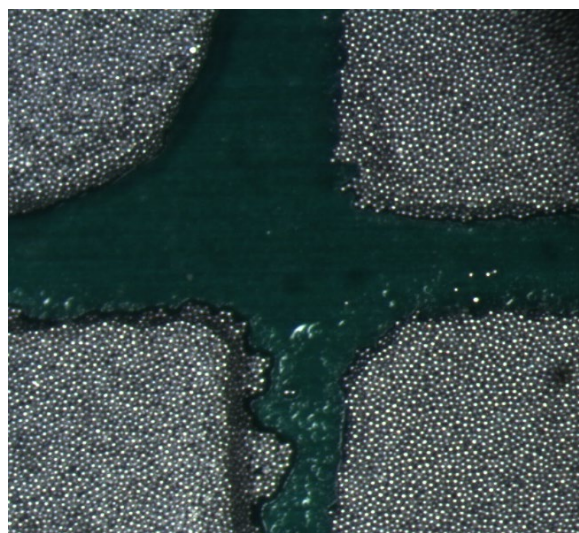
*Obr. 43: Pájecí pasta z hladiny
(1200 rpm/15 min)*



*Obr. 44: Pájecí pasta ze dna
(1200 rpm/15 min)*



*Obr. 45: Natisknutá pájecí pasta z hladiny
(800 rpm/15 min)*



*Obr. 46: Natisknutá pájecí pasta ze dna
(800 rpm/15 min)*

Jedinou pastou, kterou se podařilo zamíchat na správnou viskozitu a teplotu a během celého měření nezničit, byla pasta pro nastavení 600 otáček za minutu.

Výstupem pro druhý experiment byla zvolena dvě nastavení – 600 rpm po dobu 12,5 minut a 800 rpm po dobu 8 minut. Obě pasty jsou v tomto intervalu již zamíchané a jejich teplota odpovídá přibližně teplotě ve výrobní hale (cca 23 °C). Dalším nastavením, které bylo zvoleno do druhého experimentu, je původní nastavení mixéru – 1000 rpm; 5,5 minuty. I když je toto nastavení nevyhovující, ve druhém experimentu bude hrát referenční roli jako původní nastavení k porovnání s novými nastaveními. Posledním nastavením do druhého experimentu byla vybrána samovolná aklimatizace a manuální míchání těrkou, které je doporučeno výrobcem.

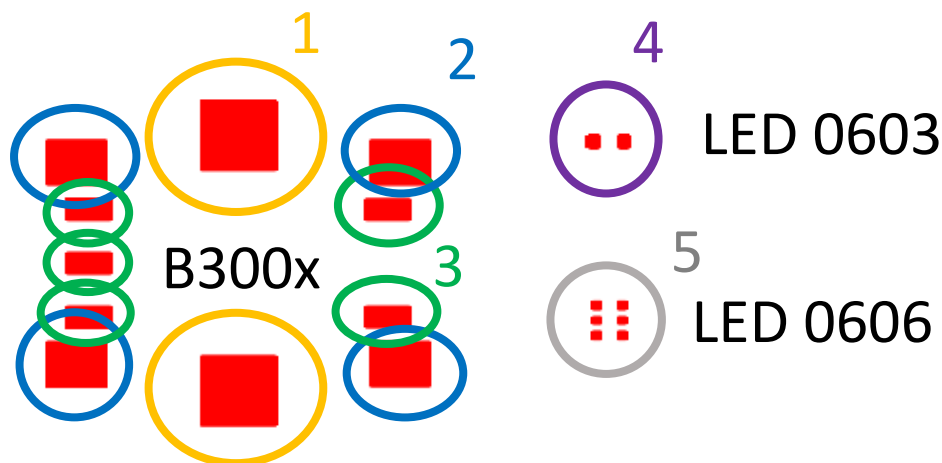
2.3 Druhý experiment

Druhý experiment měl za cíl najít nastavení s nejlepšími parametry natisknuté pájecí pasty. Na testovací desku byla sítotiskovým strojem natisknuta pájecí pasta, která byla vyhodnocována systémem SPI a optickým mikroskopem.

Do druhého experimentu byla na základě prvního experimentu vybrána čtyři nastavení, viz *Tabulka 5*. Každé nastavení bylo testováno a kontrolováno na 16 deskách.

Tabulka 5: Nastavení pro druhý experiment

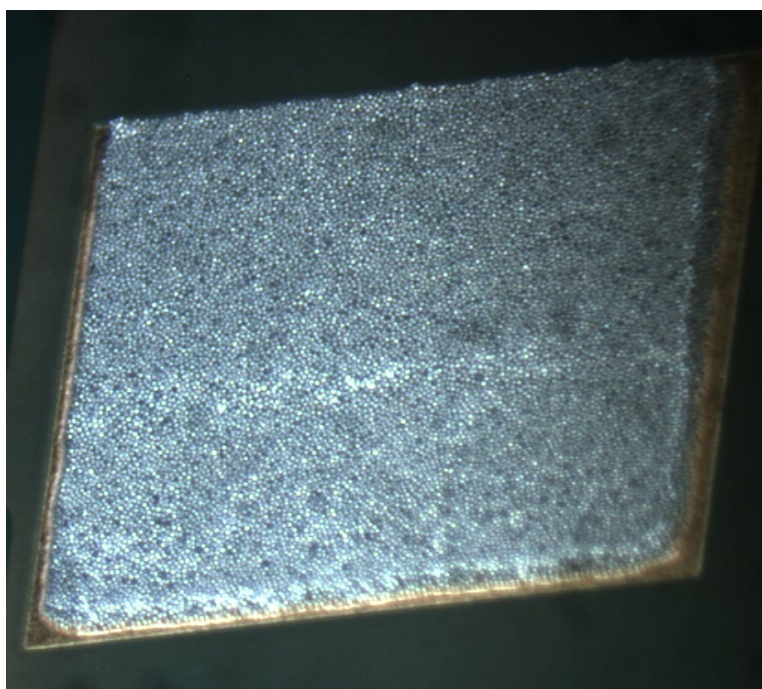
Otáčky [rpm]	Čas [min]
600	12,5
800	8,0
1000	5,5
Manuální míchání	-



Obr. 47: Motiv šablony pro testovací desku

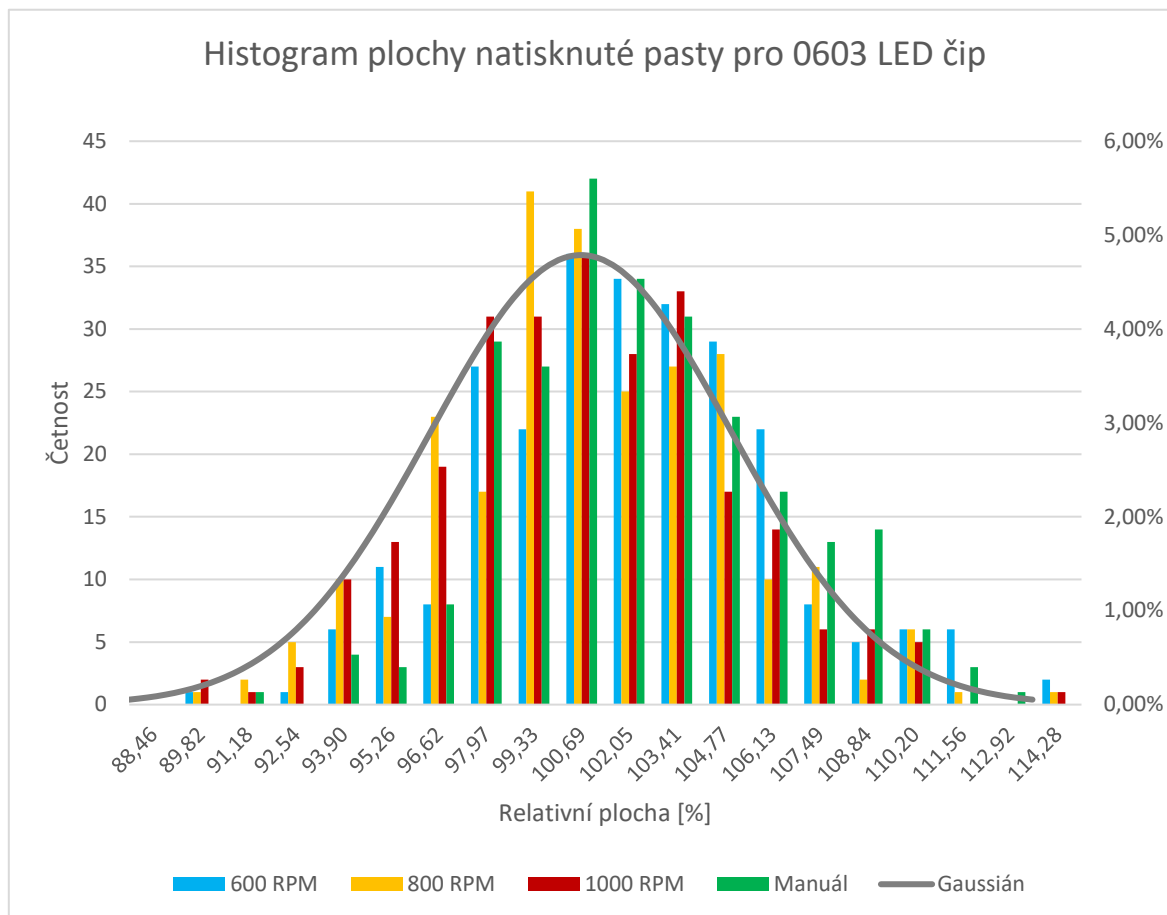
Na *Obr. 47* jsou zobrazeny všechny typy pájecích plošek, které se na testovací desce vyskytují. Nejmenší rozteče jsou pro LED 0606, kdy vertikální rozteč je 0,3 mm a horizontální 0,8 mm. Nejmenší rozteč rotačního enkodéru je mezi ploškami 2 a 3 a je rovna 0,6 mm. Pro komponentu LED 0603 je rozteč plošek 0,7 mm.

V experimentu se vyhodnocovala data z SPI. Z těchto dat musely být odstraněny plošky 1 a 2 komponent B3001 a B3006, protože byly ovlivněny stepem šablony, a zanesly by tak chybu do měření. Vliv stepu šablony je patrný na *Obr. 48*. Jako vyhodnocovací parametry byly určeny výška natisknuté pasty, plocha, kterou pasta zabírá na pájecí plošce a objem pájecí pasty. Data jsou relativní, tj. v procentech. Důvodem je, že číselnou hodnotu SPI vypisuje jen pro výšku, jinak pro všechny tři parametry udává hodnoty v procentech na základě stanovené odchylky od hodnoty v programu. Reprezentace naměřené hodnoty v mikrometrech nebo v procentech fakticky nezpůsobuje z pohledu statistické matematiky a relevantnosti vyhodnocení žádný rozdíl.



Obr. 48: Step šablony promítnutý na výšce pájecí pasty

Data pro každé nastavení a každou pájecí plošku byla vynesena do histogramů. Počet tříd byl vypočítán pomocí Sturgesova pravidla. Každý histogram byl proložen vypočítaným normálním rozdělením. Normální rozdělení je typickým rozdělením pro rozložení chyb při fyzikálních a technických měřeních. Tento předpoklad se potvrdil i v případě výsledků z SPI, jak je patrné z příkladu v *Grafu 2*, kde jsou data proložena Gaussiánem. Všechny grafy z vyhodnocení druhého experimentu se nachází v *Příloze A*. [55]



Graf 2: Histogram plochy nanesené pasty pro 0603 LED čipy

Jako střední hodnota μ a směrodatná odchylka σ Gaussovy křivky byly určeny průměry všech odpovídajících měření. Medián a průměr se lišily nepatrně (např. pro 600 rpm pro 0603 LED čip byl rozdíl mediánu a průměru 0,09). Minimální a maximální hodnoty na ose x jsou dány kombinací extrémů z naměřených dat a z vypočítaného Gaussova rozdělení. Funkce hustoty normálního rozdělení se vypočítá dle následujícího vzorce:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

kde $x \in \mathbf{R}$ jsou hodnoty naměřených parametrů (výška, plocha, objem). [55]

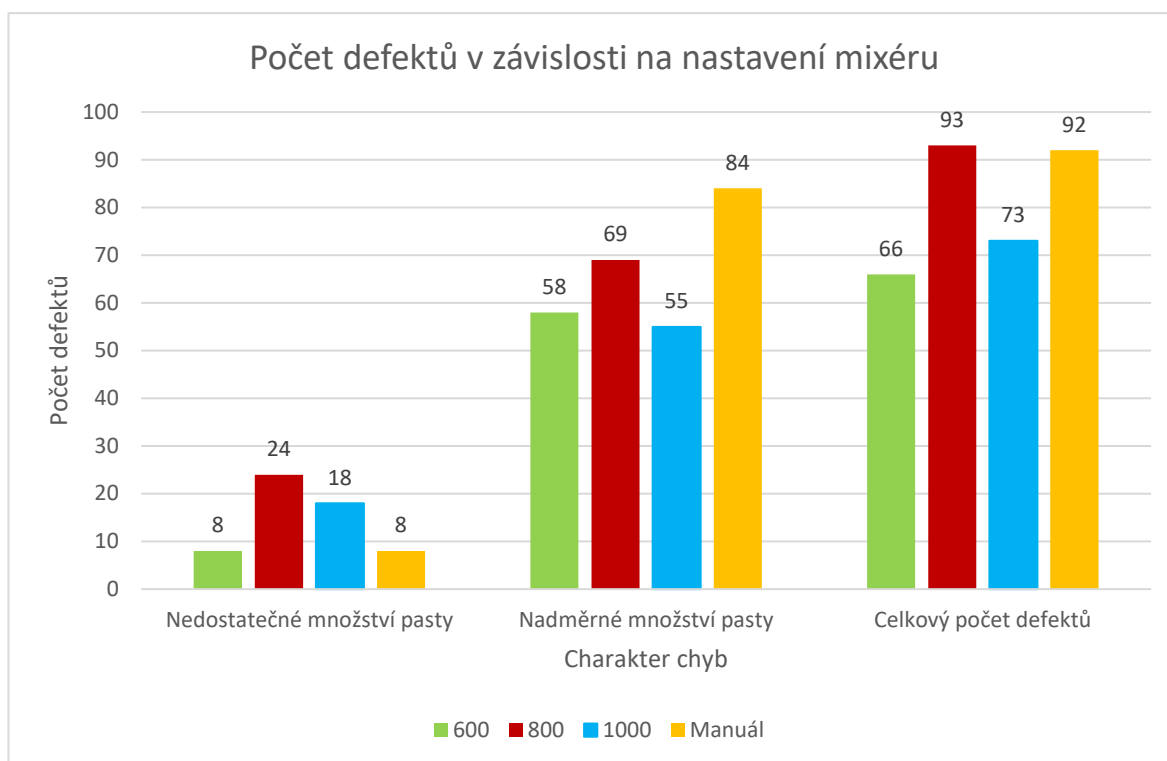
Hodnoty Gaussiánu byly vypočítány podle pravidla 68-95-99.7, které zahrnuje 99,78 % všech hodnot a odpovídá rozsahu šesti sigma. [55]

K vyhodnocení defektu se využily kvantily. Zatímco ve statistice jsou nejběžnější 2,5% kvantily, pro účely tohoto experimentu byly stanoveny přísnější limity, konkrétně 5% kvantily. Výskyty naměřených hodnot pod 5% kvantil a nad 95% kvantil byly označeny jako defekty. Vyhodnocovacích metod existuje více, často užívaným je například index způsobilosti procesu, kterému se konkrétně pro šablonový tisk věnovali na HuaFan University v [56]. Kvantily byly vybrány kvůli tomu, že jsou matematicky nejpřímějším parametrem vyhodnocení a nezanášejí do výpočtů další koeficienty či proměnné. [55]

Z Tabulky 6 vychází Graf 3. Jedná se o absolutní počty chyb a jejich charakter (zdali bylo pasty nanášeno nadměrné nebo nedostatečné množství) pro všechna nastavení a pájecí plošky. Tato tabulka a graf jsou nejdůležitějšími výstupy druhého experimentu. Ukazují, které nastavení bylo nejméně chybové, a které tak jeví nejlepší předpoklady pro to být používaným nastavením. Vybrané zajímavé snímky defektů z mikroskopu se nachází v Příloze B až E.

Tabulka 6: Počet defektů pro jednotlivá nastavení

Množství	Výška	Plocha	Objem	Suma
600 rpm				
Nedostatečné	2	4	2	8
Nadměrné	15	19	24	58
Suma	17	23	26	66
800 rpm				
Nedostatečné	3	17	4	24
Nadměrné	16	24	29	69
Suma	19	41	33	93
1000 rpm				
Nedostatečné	1	11	6	18
Nadměrné	16	7	32	55
Suma	17	18	38	73
Manuální míchání				
Nedostatečné	2	6	0	8
Nadměrné	21	21	42	84
Suma	23	27	42	92



Graf 3: Počet defektů v závislosti na nastavení mixéru

Nejmenší počet defektů byl zaznamenán pro nastavení 600 otáček za minutu po dobu 12,5 minuty. Poměrně překvapivý výsledek nastal pro 1000 otáček za minutu po dobu 5,5 minut, které ačkoliv bylo z vyhodnocení vyřazeno již na počátku (kvůli teplotě), skončilo v pořadí druhé. Naopak nejhorším nastavením se ukázalo 800 rpm za 8 minut. Pouze o jeden defekt lepší bylo manuální míchání pasty.

Dalším faktorem, který hraje ve prospěch nastavení 600/12,5 oproti předchozímu nastavení, je ten, že se již nemusí před mícháním pasty vyndat plastová krytka z kelímku. Vlivem rotace a revoluce totiž docházelo k tomu, že při vysokých otáčkách se plastová krytka ponořila do pájecí pasty, a to vedlo ke značné ztrátě materiálu a nevhodné manipulaci s pastou (vylovení krytky). V některých případech dokonce nebylo vůbec možné dostat plastovou krytku ven. Nastavení 600/12,5 tímto neduhem netrpí. Může se tím tak zlepšit kvalita procesu, protože vyndáním krytky před mícháním, jak tomuto jevu předcházelo, proniká do pájecí pasty vlhkost atmosféry.

Z Grafu 3 lze také vyčíst, že většina defektů byla způsobena nadměrným množstvím pájecí pasty. Tato skutečnost může posloužit jako podnět k optimalizaci objemu natisknuté pasty, jak bylo rozebráno v teoretické části v kapitole 1.7.5.

V *Tabulce 7* se nachází hlubší rozbor defektů pro jednotlivé pájecí plošky. Byly použity tři běžně používané ukazatele. První ukazatel DPU značí „Defects per Unit“ (počet defektů na jednotku). Dalším ukazatelem byl DPMO, což je zkratka pro „Defects per Million Opportunities“ (počet defektů na milion příležitostí). Posledním použitým ukazatelem, který se standardně užívá, je PPM (často označováno malými písmeny jako jednotka; počet vadných kusů na milion příležitostí). Vzorce ukazatelů byly následující: [57]

$$DPU = \frac{\text{Počet defektů}}{\text{Počet pájecích plošek}} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

$$DPMO = \frac{\text{Počet defektů}}{\text{Počet pájecích plošek} \cdot \text{počet parametrů}} \cdot 1\,000\,000 [-] \quad (3)$$

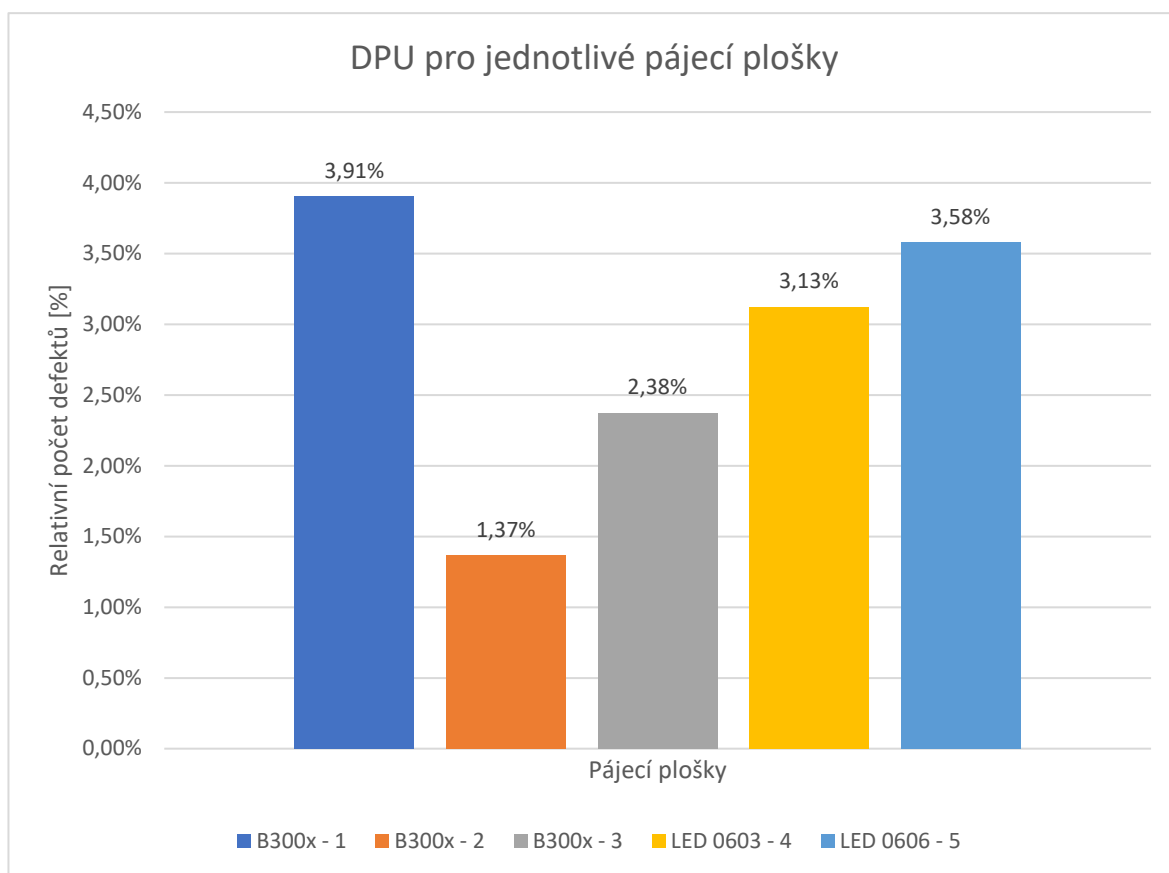
$$PPM = \frac{\text{Počet unikátních defektů}}{\text{Počet pájecích plošek}} \cdot 1\,000\,000 [-] \quad (4)$$

Tabulka 7: Analýza defektů pro jednotlivé pájecí plošky

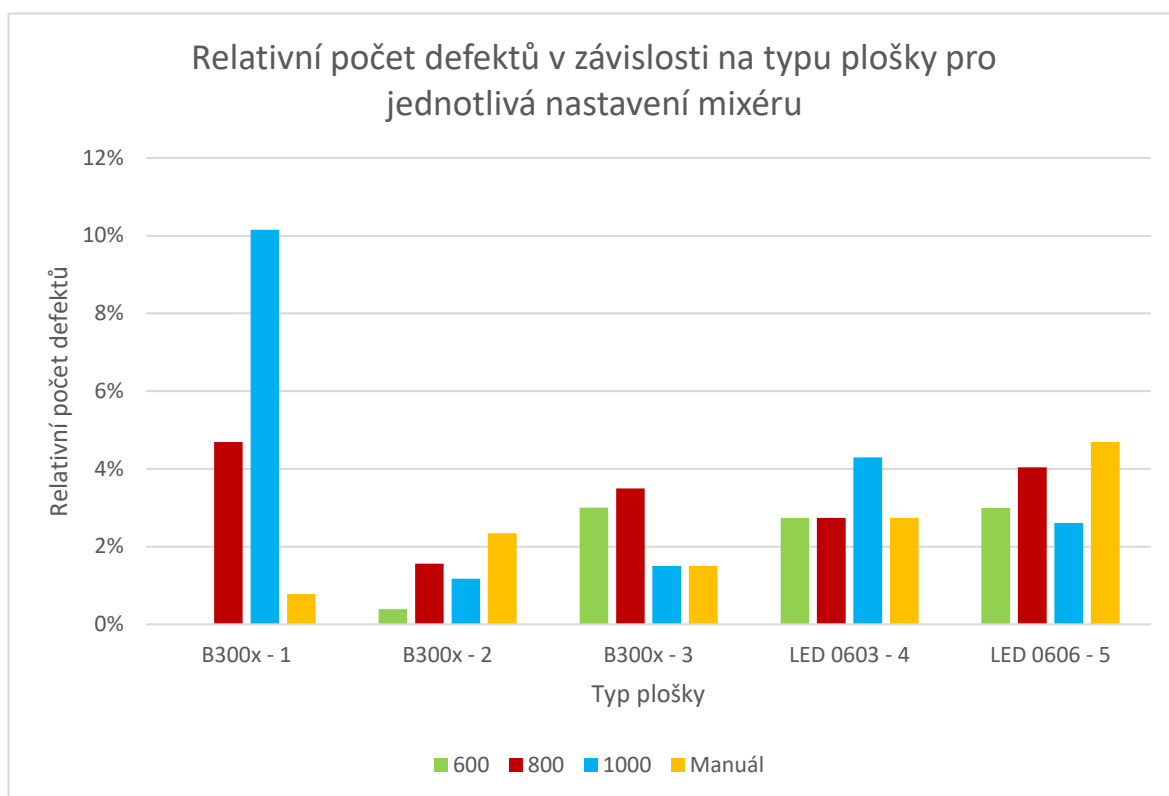
Pájecí plošky	B300x - 1	B300x - 2	B300x - 3	LED 0603 - 4	LED 0606 - 5
Počet defektů	20	14	38	32	220
Počet unikátních defektů	15	12	29	29	158
Počet pájecích plošek	512	1024	1600	1024	6144
DPU	3,91 %	1,37 %	2,38 %	3,13 %	3,58 %
DPMO	13020,8	4557,3	7916,7	10416,7	11935,8
PPM	29296,9	11718,8	18125,0	28320,3	25716,1

Graf 4 zobrazuje DPU pro každý typ pájecí plošky. Největší chybovost se vyskytovala u největší plošky na desce. Veliký problém to byl především pro nastavení 1000 ot/min po dobu 5,5 minut, jak je patrné z *Grafu 5*. Naopak veliké plošky nedělaly žádný problém pro nastavení 600 ot/min. Problematické byly také malé apertury LED čipů.

Pozoruhodným úkazem byla komponenta P4001, viz *Obr. 38*. Z celkového počtu 158 unikátních defektů 0606 LED čipu jich součástka P4001 zapříčinila 102, tj. bezmála 65 %. Přímo příčinu se najít nepodařilo, a je tak otevřeným problémem. Tyto LED čipy jsou také demonstrací Paretova pravidla (3 součástky z 16 (18,75 %) zapříčinily 81 % defektů). Žádné jiné komponenty výrazně nepřevyšovaly svým počtem defektů ostatní.



Graf 4: DPU pro jednotlivé pájecí plošky



Graf 5: Defekty v závislosti na typu plošky pro jednotlivá nastavení mixéru

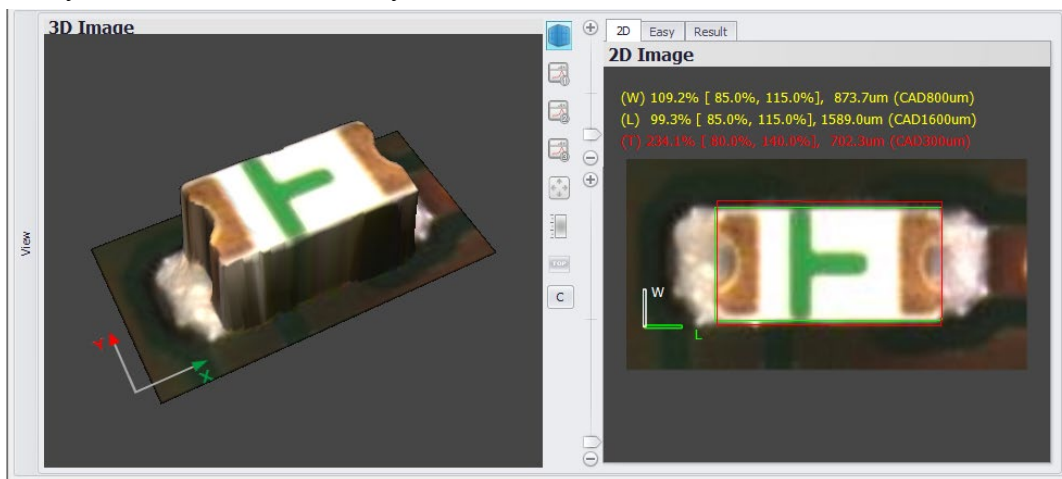
2.4 Třetí experiment

Cílem třetího experimentu bylo ověření, zdali automatické míchání pájecí pasty má skutečně znatelný vliv i po přetavení a zdali výsledky potvrzují druhý experiment. Vyhodnocení probíhalo na 3D AOI (automatická optická inspekce) Zenith od společnosti Koh Young. Dále byly vybrané pozice přezkoumány rentgenem Nordson DAGE XD 7600NT.

Měření probíhalo na reálné produkci. Zakázka byla stejná elektronická sestava jako v případě druhého experimentu a byla rozdělena do dvou částí. Každá část zakázky se skládala ze 30 formátů, přičemž na každém formátu byly dvě desky. První část byla natisknuta s pastou aklimatizovanou a zamíchanou dle doporučení výrobce, druhá část byla natisknuta s nastavením 600 rpm a 12,5 minut.

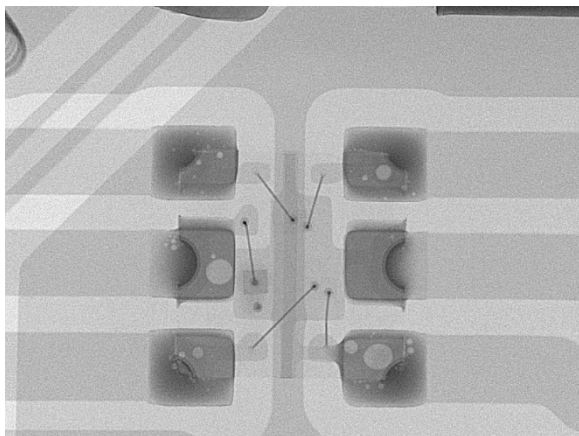
V tomto experimentu se jedná o vyhodnocení především LED čipů. Rotační enkodéry totiž potřebují větší množství pájecí pasty, než kterého je možné dosáhnout se současnými šablonami pro tento produkt. Protože nákup nových šablon by byl finančně náročný (neexistuje jen jedna varianta tohoto produktu), přistoupilo se k automatickému dispensingu. Pozice se klasicky natisknou šablonovým tiskem a na dalším stanovišti přidá dávkovač požadované množství pájecí pasty, aby výsledný objem vyhověl požadavkům.

Obě části zakázky se povedlo z TOP strany vyrobit bez defektů. Na 60 formátech (120 deskách) byla za přetavovací pecí nalezena pouze jediná chyba, viz *Obr. 49*. Jedná se o facedown neboli otočení komponenty. Tato chyba je způsobena chybným osazením součástky a nesouvisí se šablonovým tiskem.

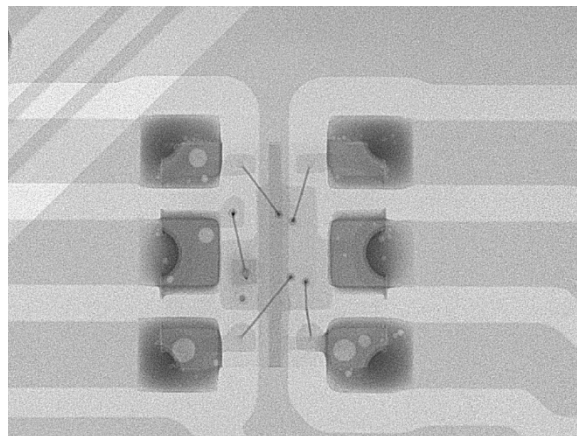


Obr. 49: Otočený 0603 LED čip

Ani na stanovišti rentgenu nebyl nalezen žádný defekt. Dutiny se sice v zapájených kontaktech vyskytovaly, ale jejich procentuální výskyt z celkového objemu byl posouzen jako nepřesahující kritické meze. Z fotografií je vidět, že voidy vznikají především pod vývody komponent, kde není umožněn dostatečný únik výparů. Všechny vývody byly zapájené a beze zkratů.



Obr. 50: Dutiny pro pastu zamíchanou manuálně



Obr. 51: Dutiny pro pastu zamíchanou mixérem

Výsledkem třetího experimentu je tak zjištění, že automatické míchání pasty nezhoršuje výslednou kvalitu produktu. Po přetavení kvalitativně odpovídá manuálnímu míchání, které výrobci doporučují.

2.5 Závěrečné vyhodnocení experimentů

Shrnutím poznatků ze tří experimentů jsme dospěli k závěru, že existuje vhodné nastavení automatického míchání pájecí pasty, které nedegraduje kvalitu celkového produktu.

V prvním experimentu byla vyvrácena vhodnost používání původního nastavení (1000/5,5) a byla nalezena dvě nová nastavení, pro která pájecí pasty vykazovaly optimální vlastnosti z pohledu teploty a viskozity. Ve druhém experimentu byla mezi sebou srovnávána původní a nová nastavení a postup doporučený výrobcem past. Zde se osvědčilo nastavení 600 rpm po dobu 12,5 minuty, které tak postoupilo do posledního experimentu. Třetí experiment probíhal na reálné produkci a měl zjistit reálný rozdíl mezi automatickým a manuálním mícháním. Experiment sice dopadl z pohledu typů míchání nerozhodně, ovšem výsledkem je pozitivní fakt, že automatické míchání nezhoršuje kvalitu výroby elektroniky. Automatický mixér tak může být užíván.

2.6 Ekonomické hledisko

V experimentální části bylo potvrzeno, že míchání pasty automatickým mixérem nemá negativní dopad na kvalitu šablonového tisku a zhoršení kvality nebylo zaznamenáno ani po přetavení. Lze tedy využívat vlastností automatického míchání, které přináší pozitiva nejen z hlediska technologického, ale také z hlediska ekonomického.

Vzhledem k nerozhodnému výsledku ve třetím experimentu, který je experimentem s nejvyšší váhou, nelze objektivně vypočítat konkrétní částky, které by automatické míchání ušetřilo na minimalizaci defektů (přes DPMO, PPM a jiné ukazatele), případně jak by náklady naopak zvýšilo, kdyby dopadl experiment ve prospěch manuálního míchání pájecí pasty.

Hlavním ekonomickým přínosem míchání pájecí pasty mixérem je automatizace procesu, která má značný vliv na stabilitu řešení. Díky zautomatizování procesu je zaručeno zamíchání pasty pokaždé stejným způsobem. Úroveň homogenizace materiálu by tak neměla kolísat.

Automatizace procesu znamená snížení vlivu lidského faktoru, který je velmi těžko předvídatelný. Zmenšuje se tím počet nestandardních odchylek od požadovaného stavu. To má za následek posílení ukazatelů kvality výrobního procesu a vyšší spolehlivost.

Jedním z potenciálních problémů, které odpadají při automatickém míchání pájecí pasty, je to, že se zapomene vyndat pájecí pasta z lednice. To může mít za následek, že se výrobní proces naprosto zbytečně zastaví, protože aklimatizování pájecí pasty postupem výrobce pasty trvá hodiny. Zastavení výrobního procesu přináší značné finanční ztráty. Obecně také dochází k fluktuaci zaměstnanců, kdy noví operátoři jsou často nezkušení. Automatizace procesů tak pomáhá minimalizovat kvalitativní odchylky i v takovýchto případech.

Automatické míchání pájecí je tedy z ekonomického pohledu výhodnější než manuální míchání a mělo by být preferováno, je-li nutné zajistit kvalitní tisk a zároveň dosáhnout stabilních výsledků při výrobě elektronických zařízení.

Závěr

V teoretické části byly rozebrány jednotlivé aditivní technologie. Tato část byla zaměřena především na šablonový tisk, který je významnou složkou ve výrobním procesu moderní elektroniky. Byl nastíněn jeho princip a zároveň rozepsány jeho jednotlivé součásti, materiály a parametry, které mají vliv na kvalitu šablonového tisku. Dále se teoretická část zabývala defekty, které vznikají při nanášení i přetavení pájecí pasty a byly popsány metody, jak lze většinu defektů předcházet optimalizací šablon.

Experimentální část byla zaměřena na chování pájecích past při procesu homogenizace. Tato část byla rozdělena do tří jednotlivých experimentů. První experiment se soustředil na automatické míchání pájecí pasty a nalezení vhodného nastavení mixéru, aby pasta vykazovala optimální parametry pro šablonový tisk. V druhém experimentu byla pasta zamíchána dle zjištěných parametrů, natisknuta na substrát a naměřená data byla statisticky vyhodnocena za účelem zjištění nejlepšího nastavení. Třetí experiment se věnoval porovnání automatického a manuálního míchání pájecí pasty, které doporučují výrobci pájecích past. Měření probíhalo na reálné produkci a bylo zjištěno, že automatické míchání nezhoršuje kvalitu z hlediska šablonového tisku, stejně tak ani z pohledu celého výrobního procesu.

Výsledky experimentální části byly vyhodnoceny z ekonomického hlediska, u kterého byl zkoumán vliv na stabilitu nového řešení a jejími pozitivními dopady na výrobní proces, které dokáží přinést finanční a časové úspory a předchází četným negativním vlivům.

Cíle bakalářské práce se podařilo naplnit a poznatky získané především v experimentální části byly úspěšně implementovány do praxe, kde se nyní používá zjištěné optimální nastavení míchání pájecí pasty, čímž se zlepšila spolehlivost a stabilita výroby.

Výsledky této bakalářské práce mohou posloužit jako podklad pro další výzkum v oblasti automatického míchání substancí relevantních pro elektronický průmysl. Další výzvou je provést experimenty i pro další typy pájecích past, které se díky svým vlastnostem mohou chovat odlišně. Takovým případem mohou být perspektivní nanopasty, kde správná homogenizace materiálu je ještě důležitější než u běžných past.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] STARÝ, Jiří a Petr KAHLE. *Plošné spoje a povrchová montáž*. 1. vyd. Brno: PC DIR - REAL, 1999.
- [2] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice, pozdření aktivních součástek, plošné spoje*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [3] SKOČIL, Vlastimil. *Technologie elektroniky*. Přednáška. Plzeň: ZČU, 2017.
- [4] KURODA ELECTRIC. *Ultra fine pattern screen printing, fine line screen printing* [online]. 2019 [vid. 2019-03-24]. Dostupné z: <http://www.kuroda-electric.eu/ultra-fine-pattern-screen-printing>
- [5] SOUKUP, Radek. *Inovativní technologie v elektrotechnice I*. Přednáška. Plzeň: ZČU, 2018.
- [6] NEOTECH AMT. *3d printed electronics applications* [online]. 2019 [vid. 2019-03-24]. Dostupné z: <http://www.neotech-amt.com/3d-printed-electronics-applications/>
- [7] CHRISTIAN KOENEN. *Process and Layout Training*. Ottobrunn: Interní dokument, 2018.
- [8] BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS a BMEETT. *Stencil Design Guidelines for Electronics Assembly Technologies* [online]. 2013 [vid. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://smtnet.com/library/files/upload/Stencil-Design-Guidelines.pdf>
- [9] MANGIN, Christ Hollend. Where quality is lost on SMT boards. *Circuit Assembly no. 2*. 1991, 63–64.
- [10] STENCILS UNLIMITED. *Framed Electroformed Stencils* [online]. 2019 [vid. 2019-03-23]. Dostupné z: <http://www.stencilsunlimited.com/framed-electroformed-stencils-p-360.html>
- [11] KOLB CLEANING TECHNOLOGY. *Thorough cleaning of stencils* [online]. 2019 [vid. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://www.kolb-ct.com/cleaning-tasks/tools-cleaning/stencil-cleaning/>
- [12] HOBBY, Alan. *PRINTING THICK FILM HYBRIDS* [online]. Pontypool: Gwent Group. 1997 [vid. 2019-03-08]. Dostupné z: http://www.gwent.org/gem_thick_film.html
- [13] INDIUM CORPORATION. *Viscosity And The Printable Nature of Solder Paste* [online]. 2014 [vid. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.indium.com/blog/viscosity-and-the-printable-nature-of-solder-paste.php>
- [14] KRAMMER, Olivér, László Milán MOLNÁR, László JAKAB a Christian KLEIN. Stencil deformation during stencil printing. *SIITME 2009 - 15th International Symposium for Design and Technology of Electronics Packages* [online]. 2009, 179–

184. Dostupné z: doi:10.1109/SIITME.2009.5407378
- [15] YU, Wang, Michael OLORUNYOMI, Martin DAHLBERG, Zoran DJUROVIC, Johan ANDERSON a Liu JOHAN. Process and pad design optimization for 01005 passive component surface mount assembly. *Soldering and Surface Mount Technology* [online]. 2007, **19**(1), 34–44. ISSN 09540911. Dostupné z: doi:10.1108/09540910710748212
- [16] NAUSS, Ed a Mike BUTLER. *Conquering The Miniature Component Challenge* [online]. [vid. 2019-04-10]. Dostupné z: https://www.smta.org/chapters/files/Final_Conquering_The_Miniature_Component_Challenge_ITW_EAE_Feb_21_2019_MB_ECN.pdf
- [17] LIU, Johan, Cristina ANDERSSON, Yulai GAO a Qijie ZHAI. Recent development of nano-solder paste for electronics interconnect applications. *10th Electronics Packaging Technology Conference, EPTC 2008* [online]. 2008, 84–93. Dostupné z: doi:10.1109/EPTC.2008.4763416
- [18] LIU, Johan, Cristina ANDERSSON, Yulai GAO, Qijie ZHAI, Ping LIU, Xiaolong GU, Haifeng FU, Yang LIU, F. CHE ANI, A. JALAR, R. ISMAIL, Z. MUSTAFA, A.A. SAAD, C.Y. KHOR, N. K. OTHMAN, M.Y. Tura ALI, M.A. FATAH, M. MUKHTAR a A. ABAS. The effects of Cu nanoparticles addition in Sn-3.0Ag-0.5Cu solder paste on the microstructure and shear strength of the solder joints. *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)* [online]. 2008, **12**(1(2)), 413–424. ISSN 1985-3157. Dostupné z: doi:10.1109/ICEPT.2016.7583264
- [19] CHE ANI, F., A. JALAR, R. ISMAIL, Z. MUSTAFA, A.A. SAAD, C.Y. KHOR, N. K. OTHMAN, M.Y. Tura ALI, M.A. FATAH, M. MUKHTAR a A. ABAS. TiO₂ Nanoparticles Reinforced Lead-Free 96.5Sn–3.0Ag–0.5Cu Solder Paste for Ultra-Fine Package Assembly in Reflow Soldering Process. *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)* [online]. 2018, **12**(1(2)), 413–424. ISSN 1985-3157. Dostupné z: <http://journal.utem.edu.my/index.php/jamt/article/view/4296>
- [20] LENTZ, Tony. *Can Nano-Coatings Really Improve Stencil Performance?* [online]. [vid. 2019-03-15]. Dostupné z: http://bluering.wpengine.com/wp-content/uploads/2017/06/can-nano-coatings-really-improve-stencil-performance_paper.pdf
- [21] LENTZ, Tony. *Nano Coatings: Changing the Rules of Stencil Design Outline / Agenda* [online]. 2013 [vid. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://fct solder.com/wp-content/uploads/2017/08/Performance-Enhancing-Nano-Coatings-Presentation.pdf>
- [22] SMITH, Greg a Tony LENTZ. an Investigation Into the Durability of Stencil Coating Technologies. In: [online]. B.m.: 2017 IPC Apex Expo Technical Conference, 2017 [vid. 2019-03-14]. Dostupné z: http://bluering.wpengine.com/wp-content/uploads/2017/06/durability-stencil-coatings_paper.pdf
- [23] BATH, Jasbir, Tony LENTZ a Greg SMITH. *An Investigation into the Use of Nano-Coated Stencils to Improve Solder Paste Printing with Small Stencil Aperture Area Ratios* [online]. 2016 [vid. 2019-03-16]. Dostupné z: http://blueringstencils.com/wp-content/uploads/2017/06/nano-coated-stencils-printing-small-sars_paper.pdf

- [24] STUDNITZKY, Thomas, Martin DRESSLER, Marie JURISCH, Kai REUTER a Sebastian RIECKER. *3D Screen and Stencil Printing : Real Mass Production for Metals , Ceramics and their Combinations* [online]. 2017 [vid. 2019-03-12]. Dostupné z: [https://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/en/documents/dd/WorldPM2016/Studnitzky_3D screen and stencil printing_real mass production for metals, ceramics and their combinations.pdf](https://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/en/documents/dd/WorldPM2016/Studnitzky_3D_screen_and_stencil_printing_real_mass_production_for_metals_ceramics_and_their_combinations.pdf)
- [25] HE, Xi, Ziyu LIU, Jian CAI, Yu CHEN, Lin TAN a Qian WANG. Characterization of stencil printing parameters for fine pitch wafer bumping. *Proceedings of the Electronic Packaging Technology Conference, EPTC* [online]. 2014, 80–85. Dostupné z: doi:10.1109/ICEPT.2014.6922601
- [26] STEEN, H.A.H., E. DE GOURCUFF, G.J. JACKSON, M.P.Y. DESMULLIEZ, P.P. CONWAY, CHANGQING LIU a R.W. KAY. Stencil Printing Technology for Wafer Level Bumping at sub-100-Micron Pitch Using Pb-Free Alloys [online]. 2005, (May 2014), 848–854. Dostupné z: doi:10.1109/ectc.2005.1441371
- [27] JOHNSON, Alden, Krista FABIAN a Bob BOYES. *Equipment, Material and Process Considerations* [online]. 2003 [vid. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://alphaassembly.com/-/media/Files/CooksonElectronics/TP-Stencil-Printing-Basics-AJohnson-WWE-SM000--05-06-29.pdf>
- [28] LASERJOB. *Wafer bumping-stencil Laser cut stainless steel wafer bumping stencil* [online]. 2017 [vid. 2019-03-18]. Dostupné z: https://www.laserjob.com/fileadmin/images/PDF_Downloads_ENG/LJ_1_6_Wafer_bumping_e.pdf
- [29] KIRCHNER UND MÜLLER LASERTECHNIK. *PRECISION STENCILS FOR WAFER BUMPING* [online]. 2018 [vid. 2019-03-17]. Dostupné z: https://www.kmlt.de/index.php/wafer_bumping-125.html
- [30] ASM ASSEMBLY SYSTEMS. *DEK PumpPrint™/Adhesive stencils* [online]. 2018 [vid. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.asm-psp.com/en/stencil-technologies/dek-stencil-portfolio/dek-pumpprint-adhesive-stencils/>
- [31] WASSINK, R. J. Klein. *Soldering in Electronics*. 1. vyd. Isle of Man: Electrochemical Publications L, 1984. ISBN 0901150142.
- [32] AUTODESK. *What is PCB Tombstoning?* [online]. 2016 [vid. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/what-is-pcb-tombstoning/>
- [33] BAO, David. *Tombstoning Explained* [online]. [vid. 2019-03-18]. Dostupné z: <https://metallicresources.com/wp-content/uploads/2017/02/n3.pdf>
- [34] KESTER. *Solder Beads - What to do about them* [online]. [vid. 2019-03-20]. Dostupné z: http://www.techni-tool.com/site/ARTICLE_LIBRARY/Kester - Solder Beads - What to do about them.pdf
- [35] FRASER-KRUCK, Adam. Cheap USB Hub Teardown. *Tinkering of an Engineer* [online]. [vid. 2019-03-20]. Dostupné z: <http://blog.olkie.com/2014/01/16/cheap->

usb-hub-teardown/

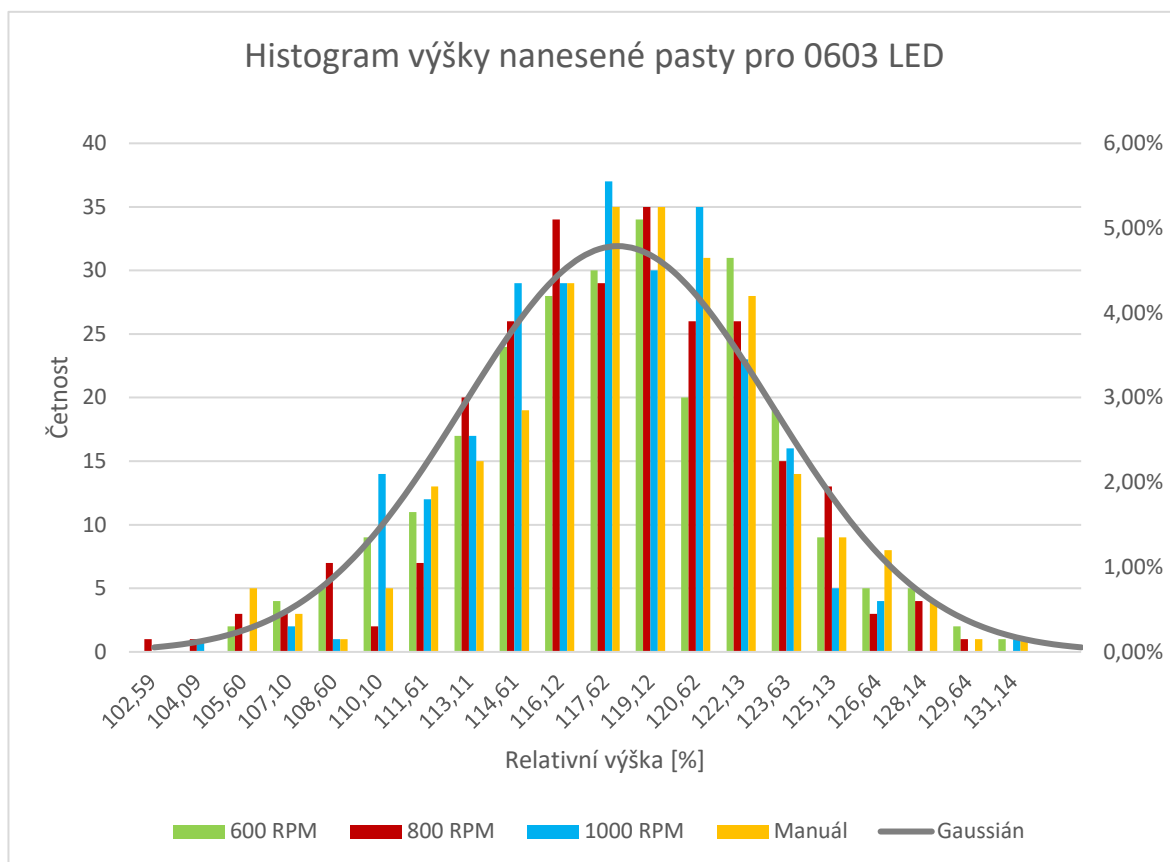
- [36] SHEA, Chrys. *Troubleshooting the Stencil Printing Process* [online]. [vid. 2019-03-20]. Dostupné z: https://www.smta.org/chapters/files/Houston_Troubleshooting_The_Stencil_Printing_Process_-_Chrys_Shea.pdf
- [37] INDUSTRIES, Association Connecting Electronics. *Standard IPC-7525A - Stencil Design Guidelines* [online]. 2007. Dostupné z: <http://shop.ipc.org/IPC-7525B-English-D>
- [38] UNIVERSITY OF BOLTON. *Characteristics of Solder Paste* [online]. [vid. 2019-03-03]. Dostupné z: http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/Characteristics_of_Solder_Paste.pdf
- [39] RAJEWSKI, K. SMT process recommendations. Defect minimization methods for a no-clean SMT process [online]. 2002, 354–362. Dostupné z: [doi:10.1109/northc.1995.485096](https://doi.org/10.1109/northc.1995.485096)
- [40] SURFACE MOUNT PROCESS. *Solder Paste Printing Process* [online]. 2019 [vid. 2019-03-28]. Dostupné z: <http://www.surfacemountprocess.com/solder-paste-printing-process.html>
- [41] JENSEN, Tim. The Graping Phenomenon : Improving Pb-Free Solder Coalescence through Process and Material Optimization. *Flux* [online]. [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: http://www.circuitnet.com/news/uploads/2/the_graping_phenomenon_98674_r0_1.pdf
- [42] BUMILLER, Elissa a Craigh HILLMAN. *A Review of Models for Time-to-Failure Due to Metallic Migration Mechanisms* [online]. [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: https://www.dfrsolutions.com/hubfs/DfR_Solutions_Website/Resources-Archived/White-Papers/Reliability/Review-of-Models-for-Time-to-Failure-Due-to-Metallic-Migration-Mechanisms.pdf
- [43] ZHONG, Xiankang, Longjun CHEN, Bálint MEDGYES, Zhi ZHANG, Shujun GAO a László JAKAB. Electrochemical migration of Sn and Sn solder alloys: A review. *RSC Advances* [online]. 2017, 7(45), 28186–28206. ISSN 20462069. Dostupné z: [doi:10.1039/c7ra04368f](https://doi.org/10.1039/c7ra04368f)
- [44] PAVEL ŽÁK. *Tvorba whiskerů při měkkém pájení v elektronice* [online]. 2008 [vid. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/zak.pdf>
- [45] BOGDAN, Gabriela. *Field Failures Due to Tin Whiskers Breaking Loose from Matte Tin-Plated RF Enclosure Lids* [online]. 2003 [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: https://nipp.nasa.gov/whisker/anecdote/2003rf_enclosure/index.html
- [46] EVROPSKÁ UNIE. *Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council* [online]. 2003 [vid. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:037:0019:0023:EN:PDF>

- [47] INTERFLUX ELECTRONICS. *Solder Paste DP 5505*. 2015.
- [48] ALPS ELECTRIC. *EC11J15246 Data Sheet*. 2008.
- [49] LUCKYLIGHT. *LL-S197FRGBC Data Sheet*. 2000.
- [50] LUCKYLIGHT. *LL-S192WC-W2-1C Data Sheet*. 2006.
- [51] THINKY. *An Introduction to Planetary Centrifugal Mixers* [online]. 2011 [vid. 2019-03-17]. Dostupné z: https://t5e8c7x9.stackpathcdn.com/wp-content/uploads/2017/04/getting_to_know_thinky_mixers.pdf
- [52] PETRÁSEK, Tomáš. *Krajní meze člověka* [online]. [vid. 2019-03-10]. Dostupné z: <http://www.distantworlds.wz.cz/DisWorlds1-2/Zivot/Meze.htm>
- [53] PFI. *DEK Horizon 03iX 2014 Automatic screen printer* [online]. 2019 [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://pfipcb.com/products/dek-horizon-03ix-2014-automatic-screen-printer-blue-cleaner-308830?variant=12399303884902>
- [54] AB ELECTRONIC DEVICES. *PARMI HS-70 En linea* [online]. [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://www.ab-electronic.com/en/p415/productos-parmi-hs-70-series-in-line-paste-inspection-system-3d-spi>
- [55] REIF, Jiří. *Metody matematické statistiky*. 1. vyd. Plzeň: FAV ZČU, 2004. ISBN 80-7043-302-7.
- [56] HUANG, CY, CT LIN a HL TSAI. Study of Process Capability for the Stencil Printing in Printed Circuit Board Assembly. *Proceedings of the Fifth Asia Pacific Industrial Engineering and Management System Conference*. 2004, 10.8.1-10.8.8.
- [57] SIX SIGMA DAILY. *Six Sigma Tools: DPU, DPMO, PPM and RTY* [online]. 2014 [vid. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.sixsigmadaily.com/dpu-dpmo-ppm-and-rty/>

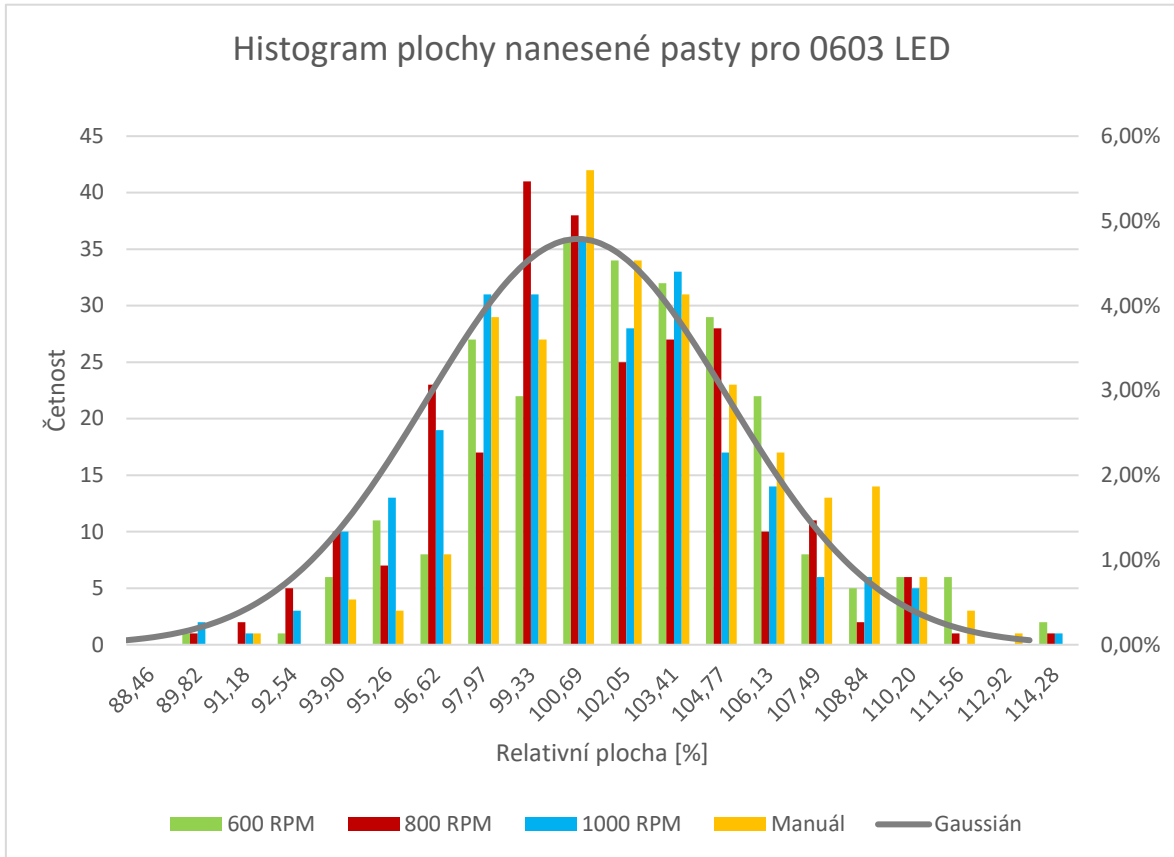
Přílohy

PŘÍLOHA A: HISTOGRAMY PARAMETRŮ Z DRUHÉHO EXPERIMENTU 1
 PŘÍLOHA B: VYBRANÉ SNÍMKY Z MIKROSKOPU S DEFEKTY PRO NASTAVENÍ 600/12,5 9
 PŘÍLOHA C: VYBRANÉ SNÍMKY Z MIKROSKOPU S DEFEKTY PRO NASTAVENÍ 800/8 10
 PŘÍLOHA D: VYBRANÉ SNÍMKY Z MIKROSKOPU S DEFEKTY PRO NASTAVENÍ 1000/5,5 11
 PŘÍLOHA E: VYBRANÉ SNÍMKY Z MIKROSKOPU S DEFEKTY PRO MANUÁLNÍ MÍCHÁNÍ 12
 PŘÍLOHA F: SEZNAM OBRÁZKŮ 13
 PŘÍLOHA G: SEZNAM GRAFŮ 14
 PŘÍLOHA H: SEZNAM TABULEK 15

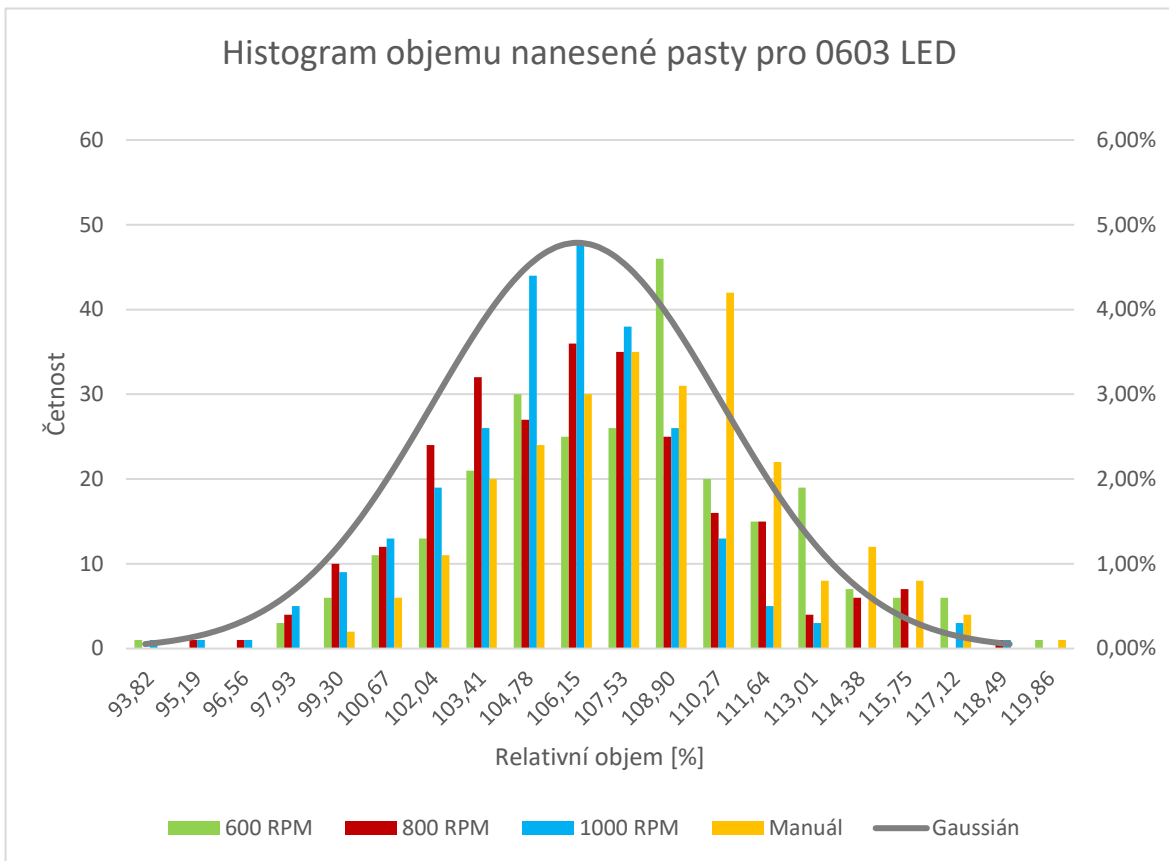
Příloha A: Histogramy parametrů z druhého experimentu



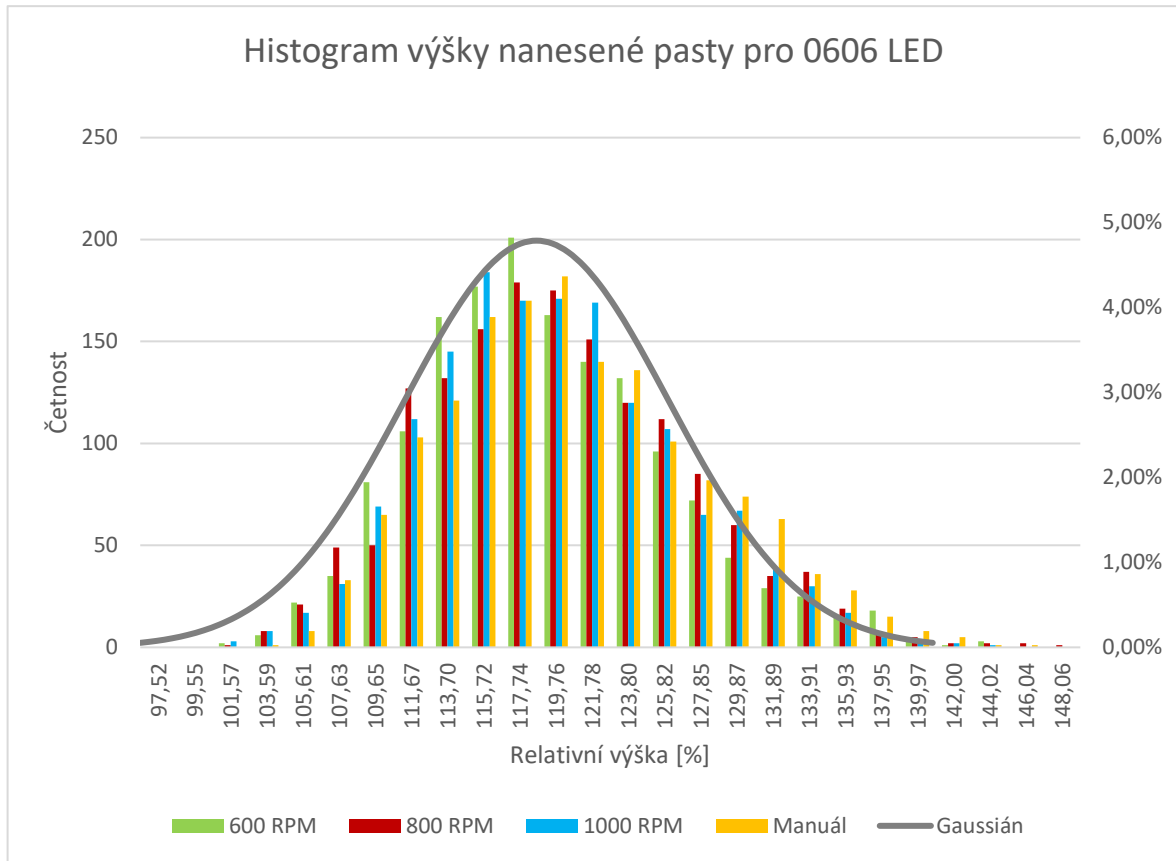
Graf 6: Histogram výšky nanesené pasty pro 0603 LED



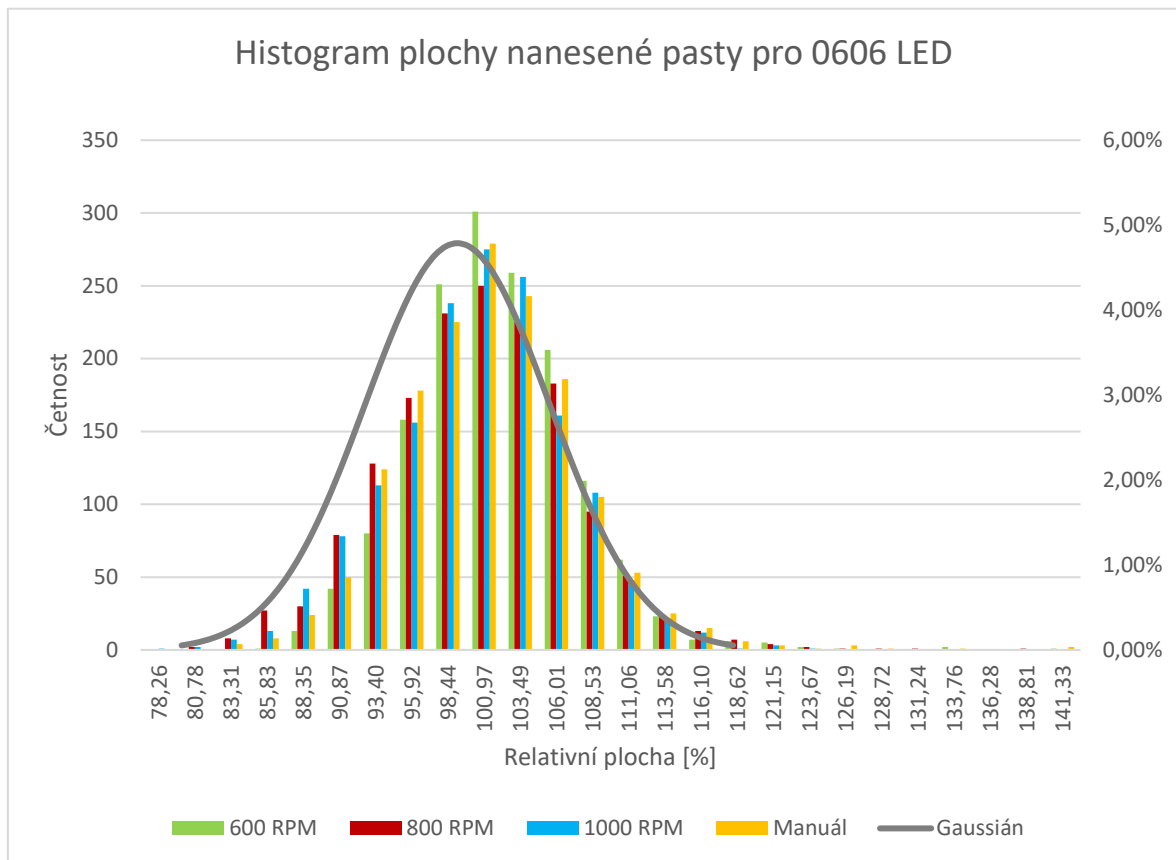
Graf 7: Histogram plochy nanesené pasty pro 0603 LED



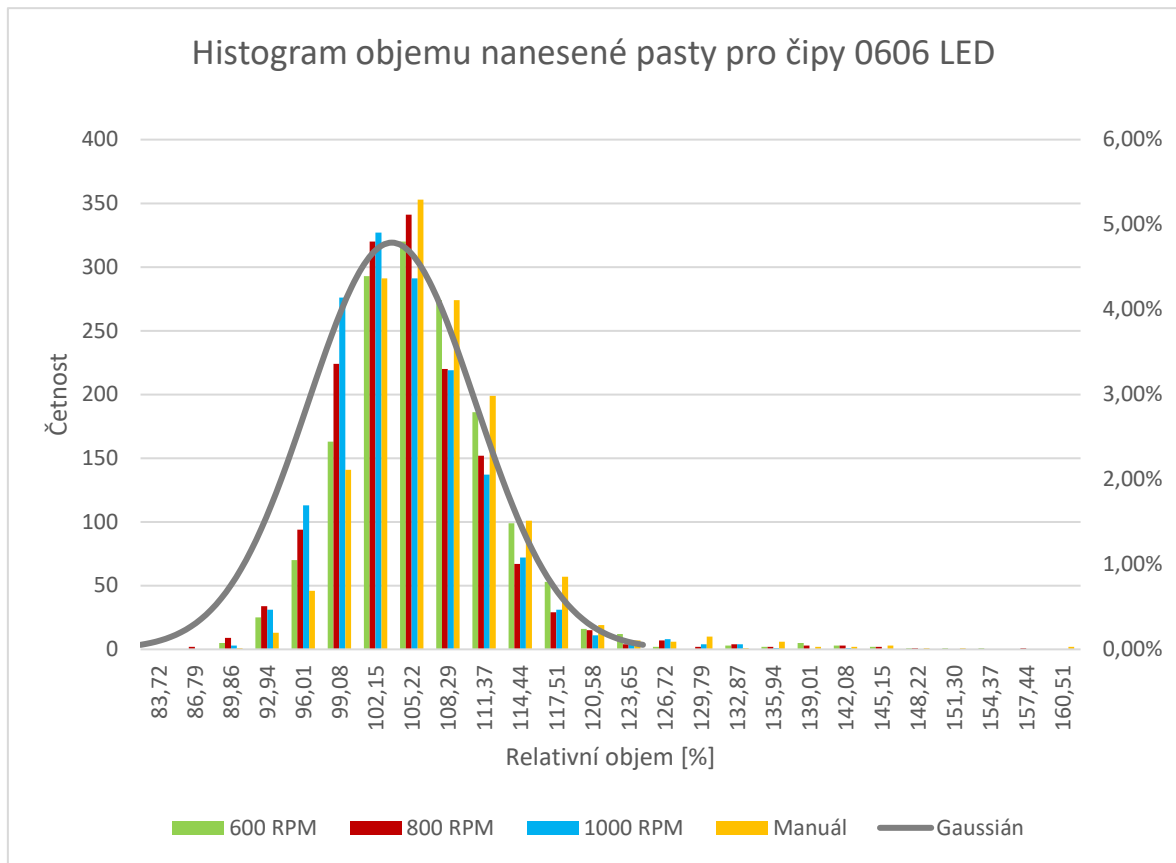
Graf 8: Histogram objemu nanesené pasty pro 0603 LED



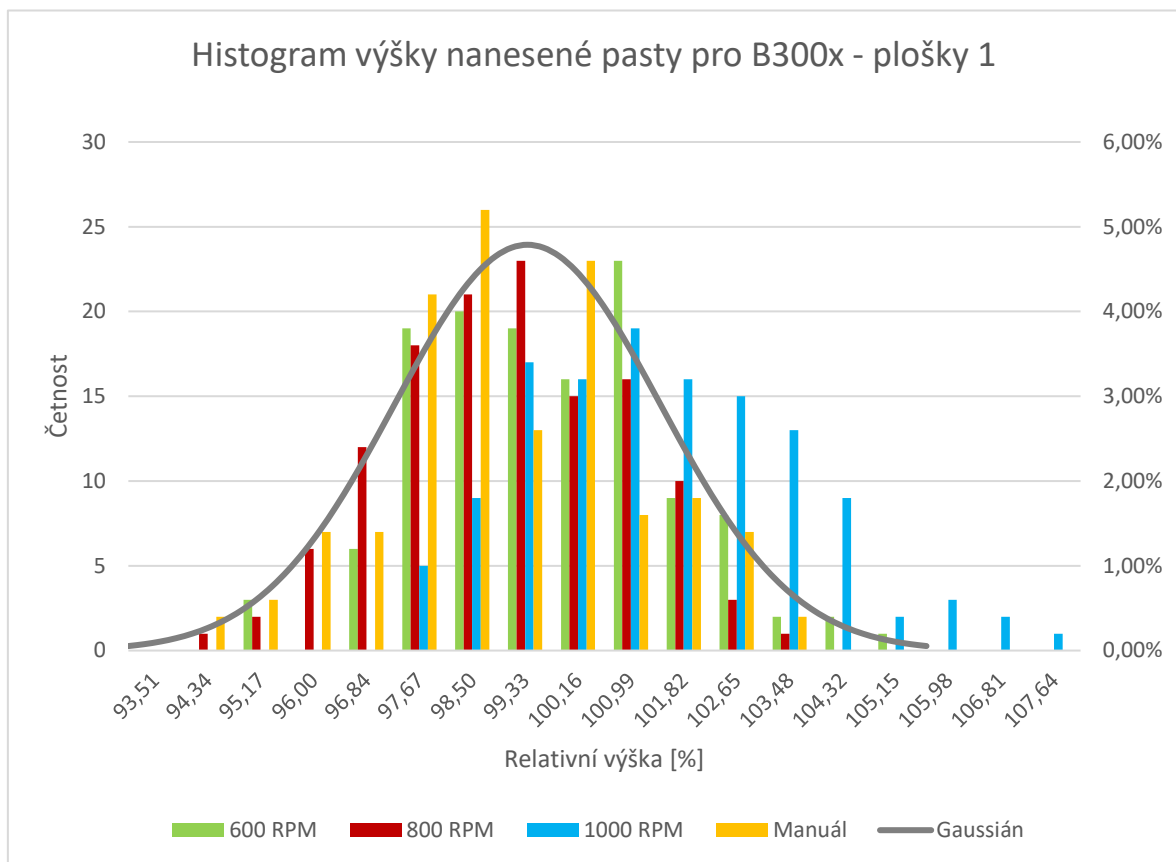
Graf 9: Histogram výšky nanesené pasty pro 0606 LED



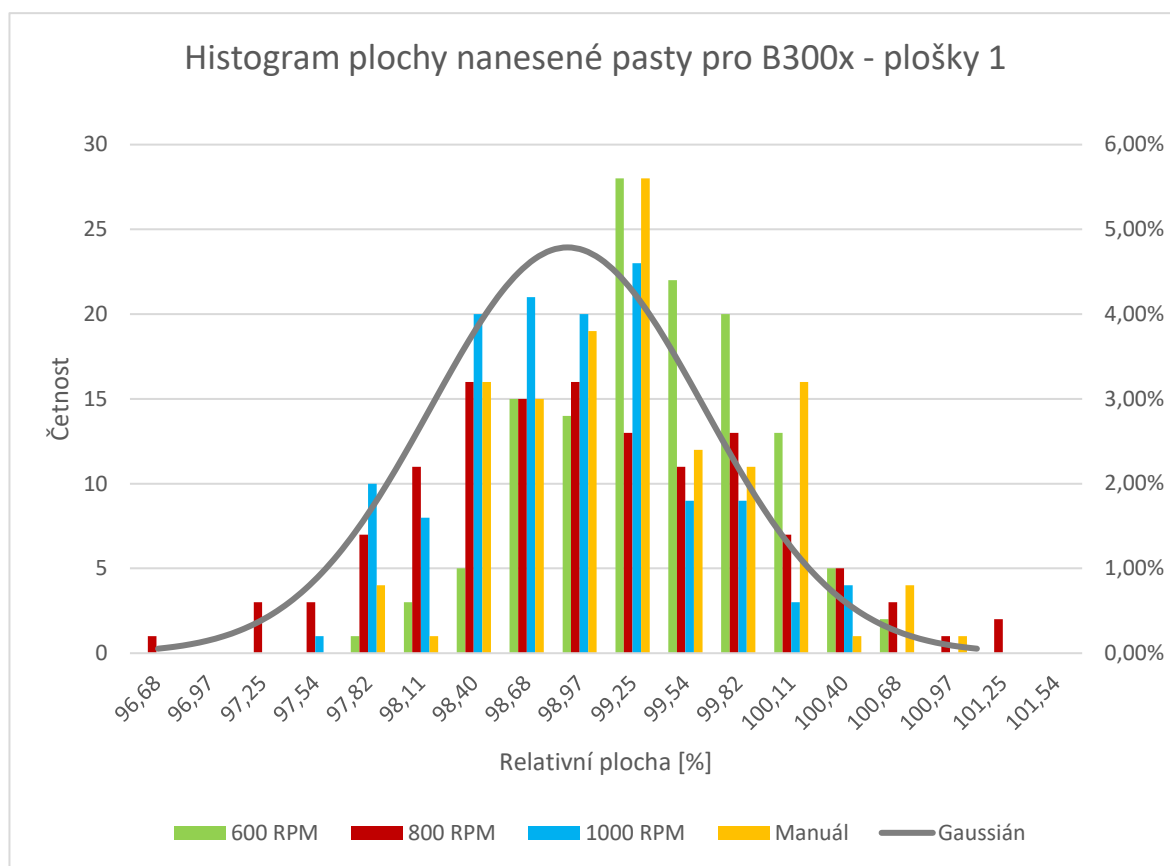
Graf 10: Histogram plochy nanesené pasty pro 0606 LED



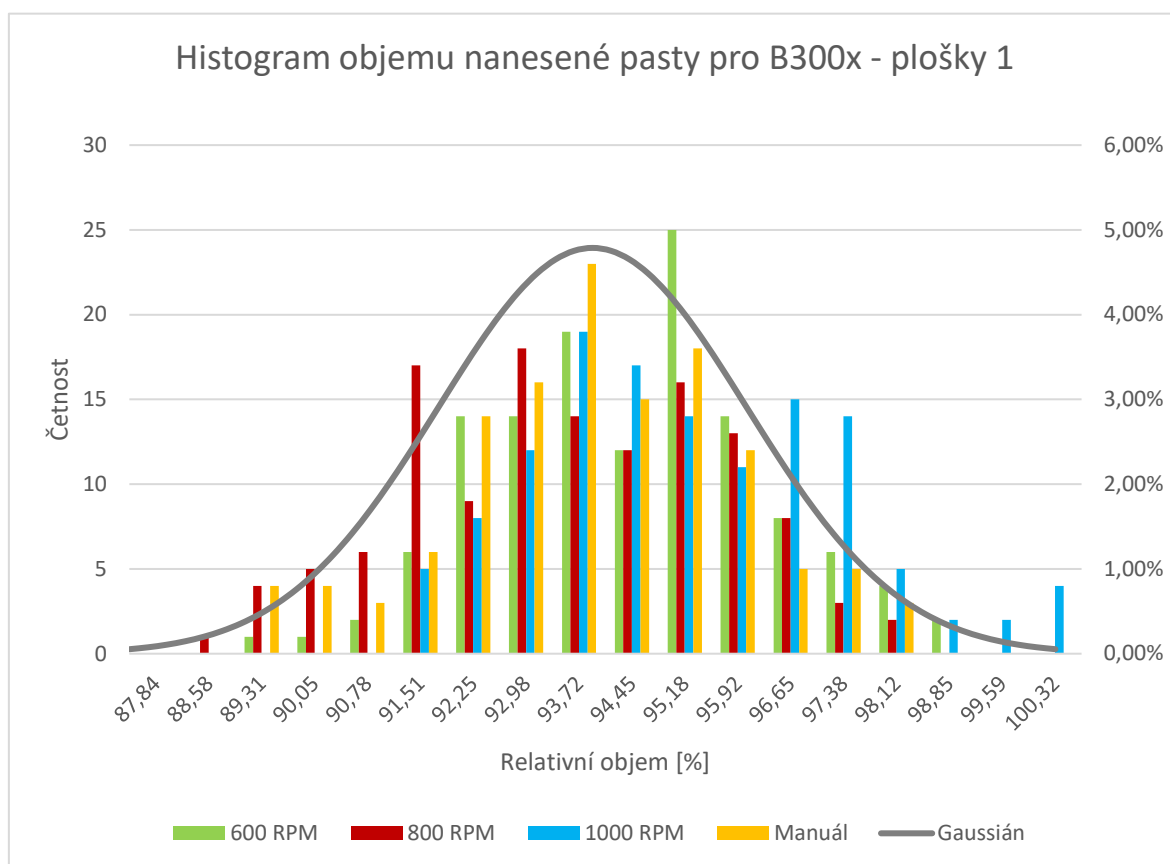
Graf 11: Histogram objemu nanesené pasty pro 0606 LED



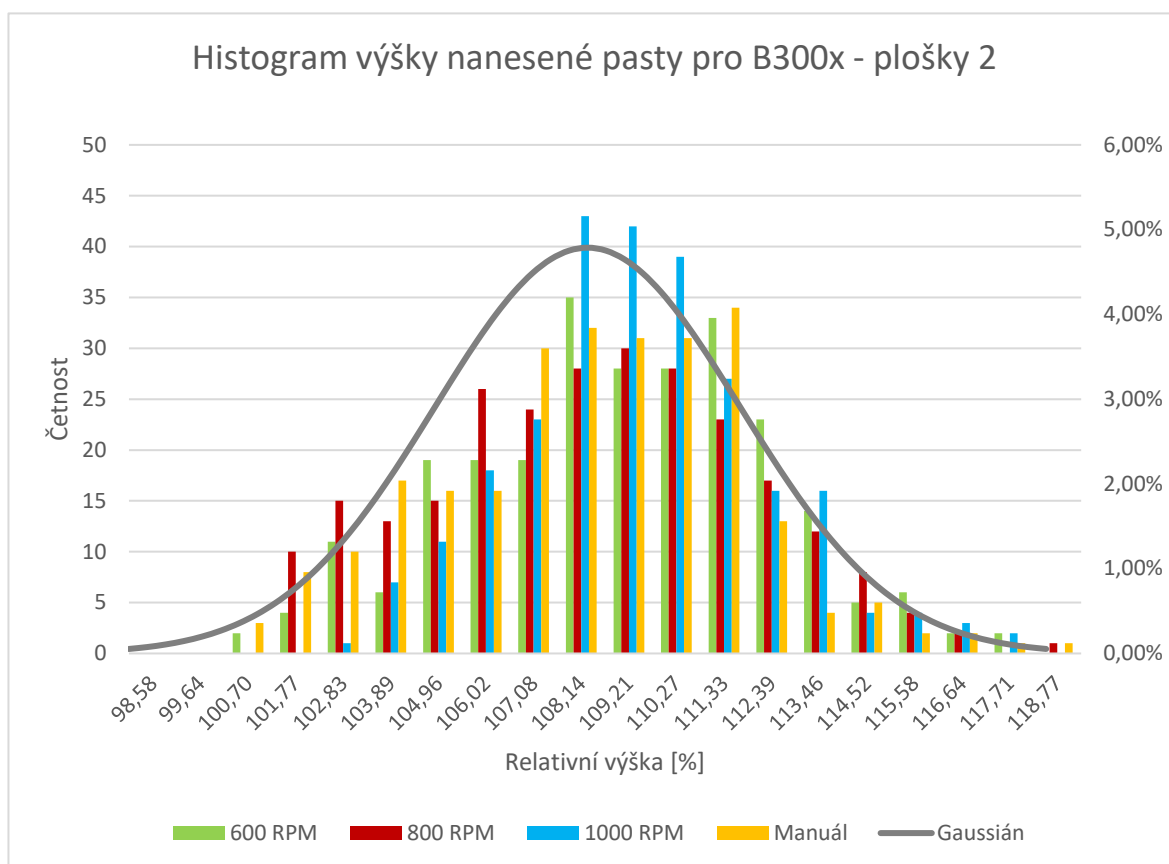
Graf 12: Histogram výšky nanesené pasty pro B300x – plošky 1



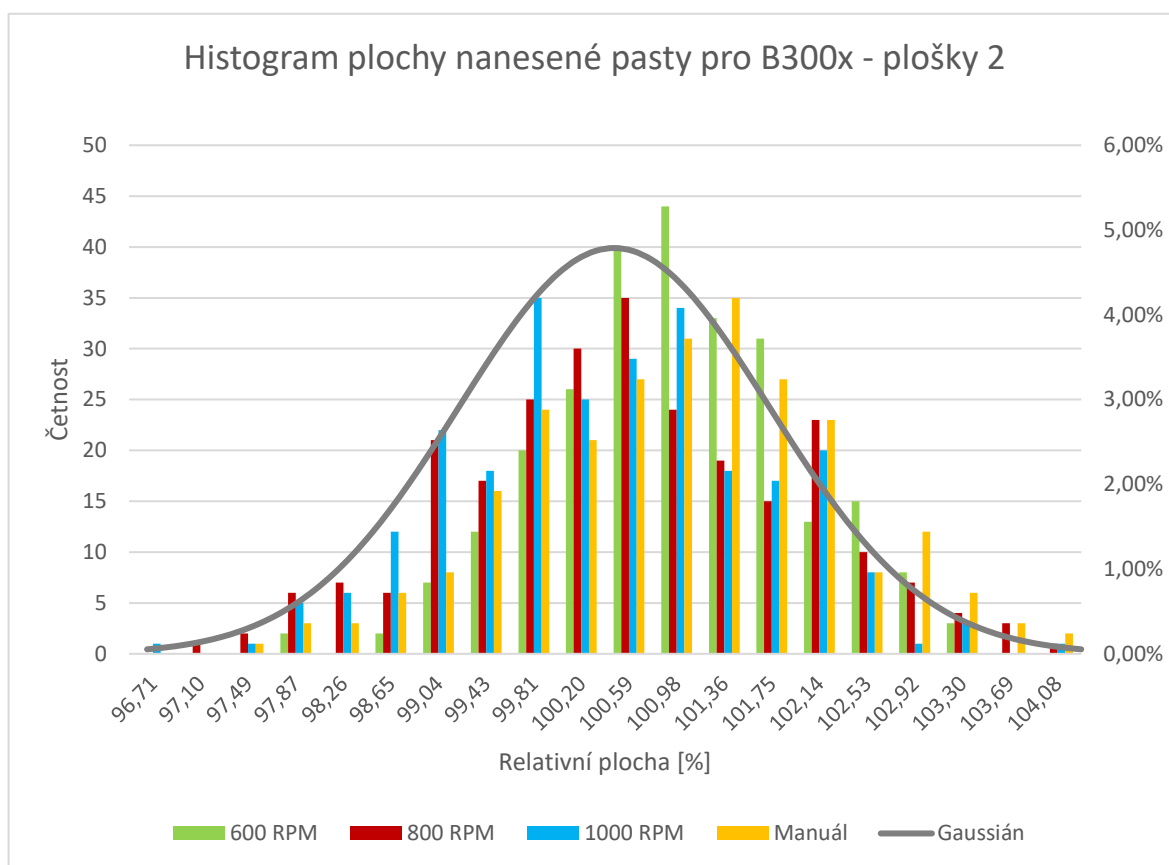
Graf 13: Histogram plochy nanesené pasty pro B300x – plošky 1



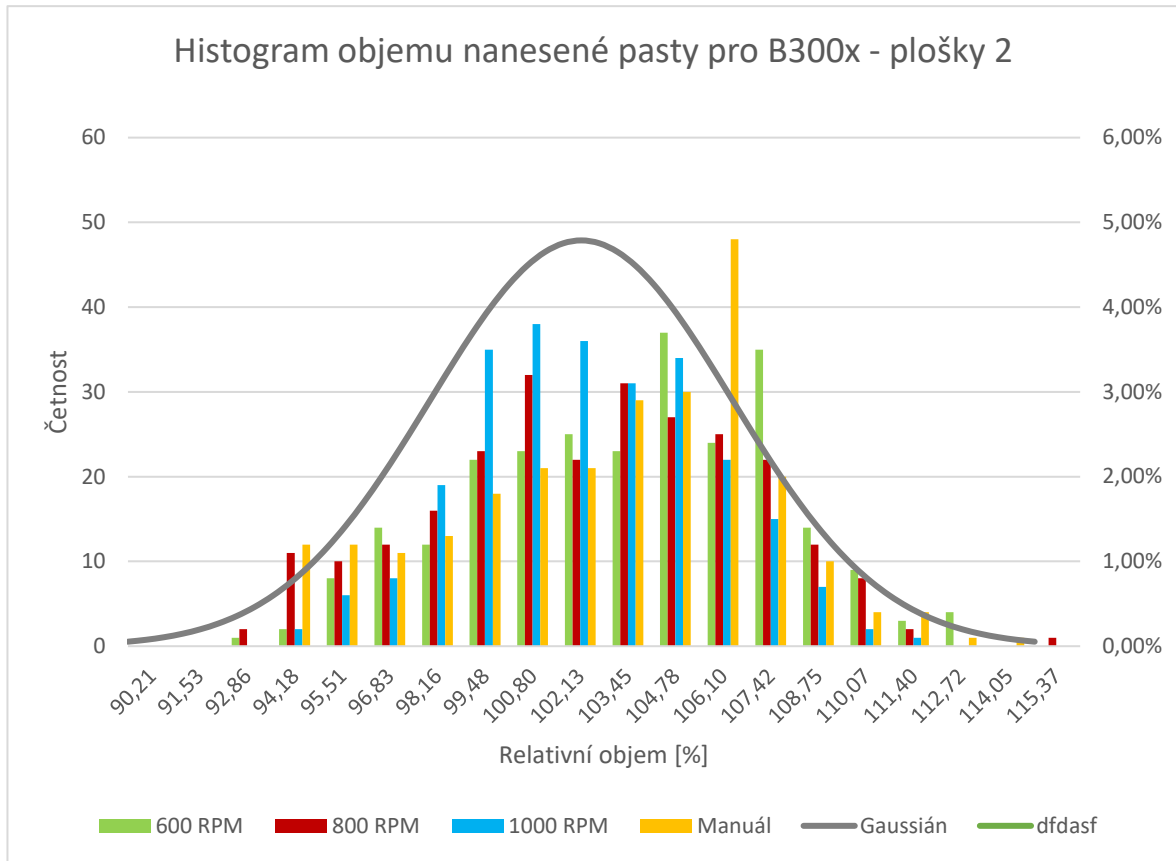
Graf 14: Histogram objemu nanesené pasty pro B300x – plošky 1



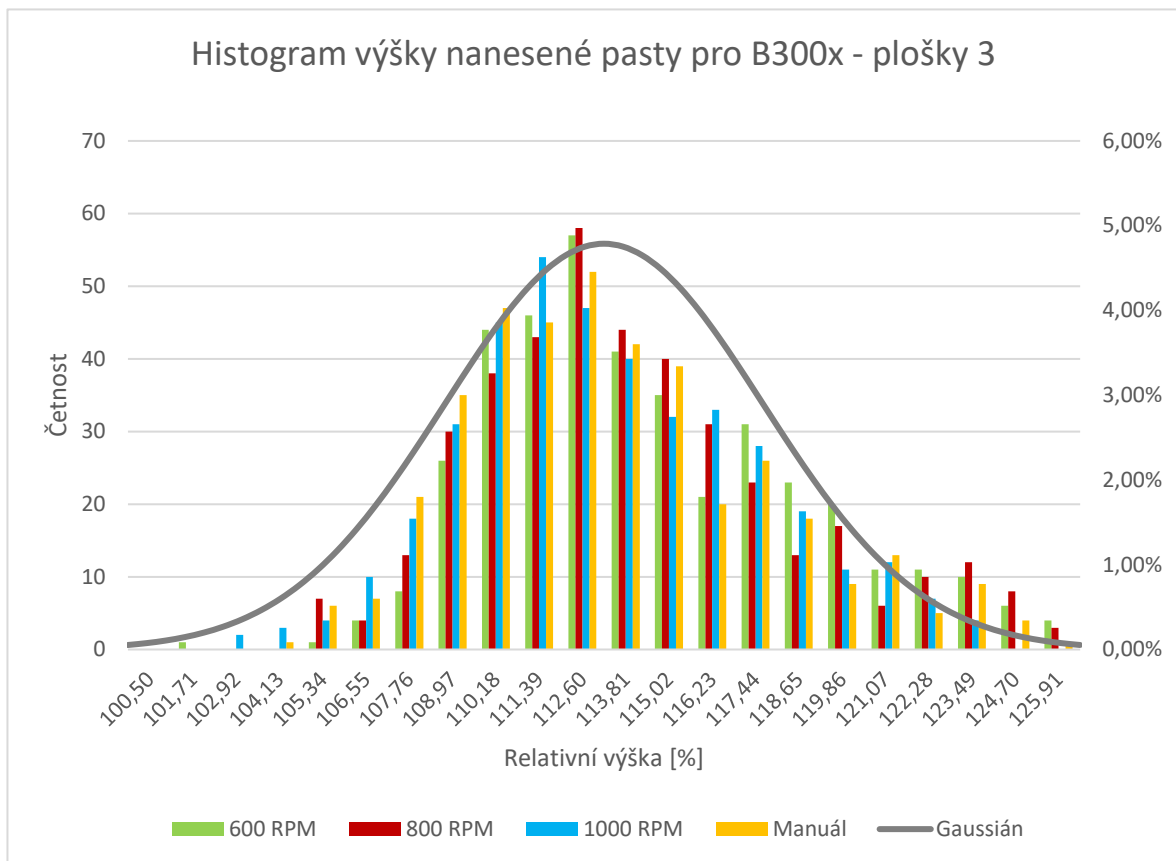
Graf 15: Histogram výšky nanesené pasty pro B300x – plošky 2



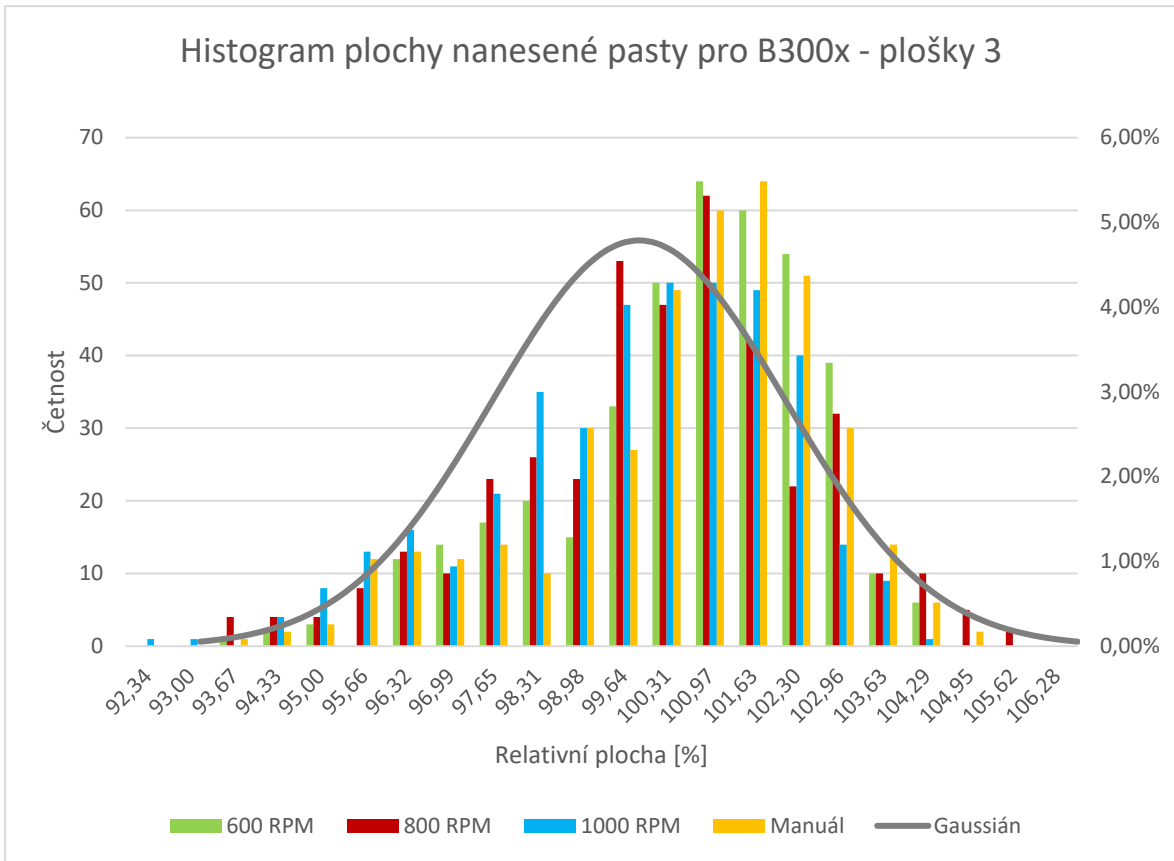
Graf 16: Histogram plochy nanesené pasty pro B300x – plošky 2



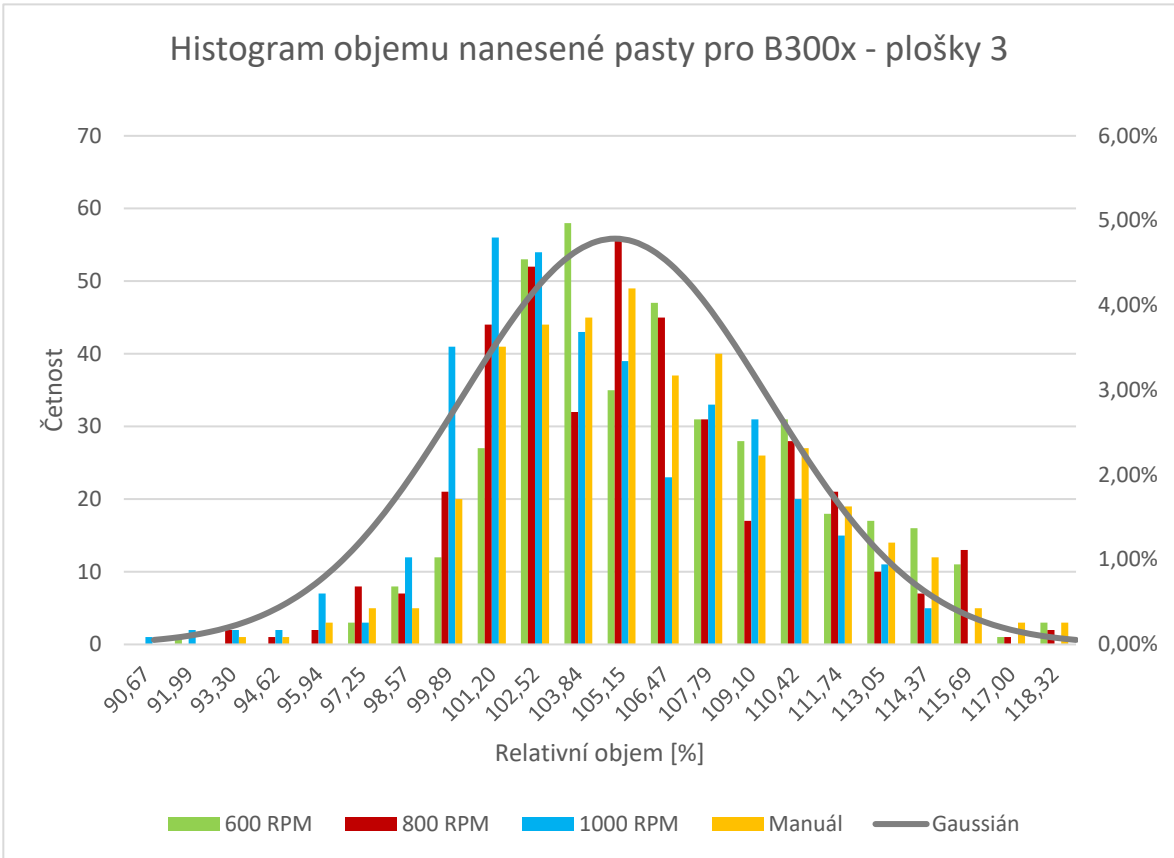
Graf 17: Histogram objemu nanesené pasty pro B300x – plošky 2



Graf 18: Histogram výšky nanesené pasty pro B300x – plošky 3

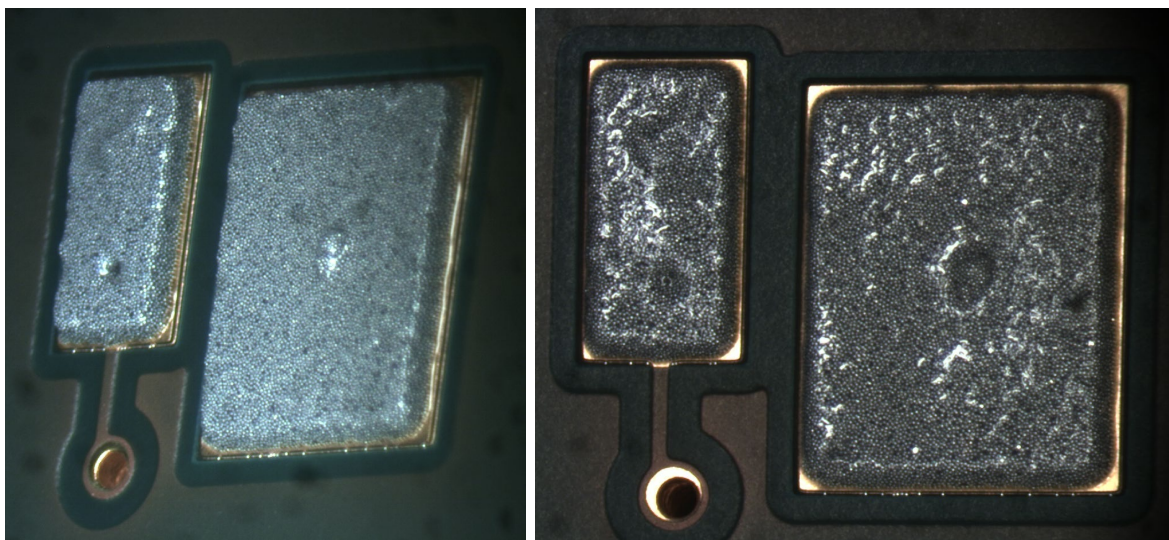


Graf 19: Histogram plochy nanesené pasty pro B300x – plošky 3



Graf 20: Histogram objemu nanesené pasty pro B300x – plošky 3

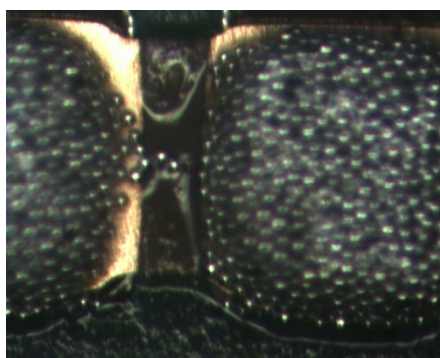
Příloha B: Vybrané snímky z mikroskopu s defekty pro nastavení 600/12,5



Obr. 52: Špatný tvar natisknuté pasty



Obr. 53: Důlek v natisknuté pastě

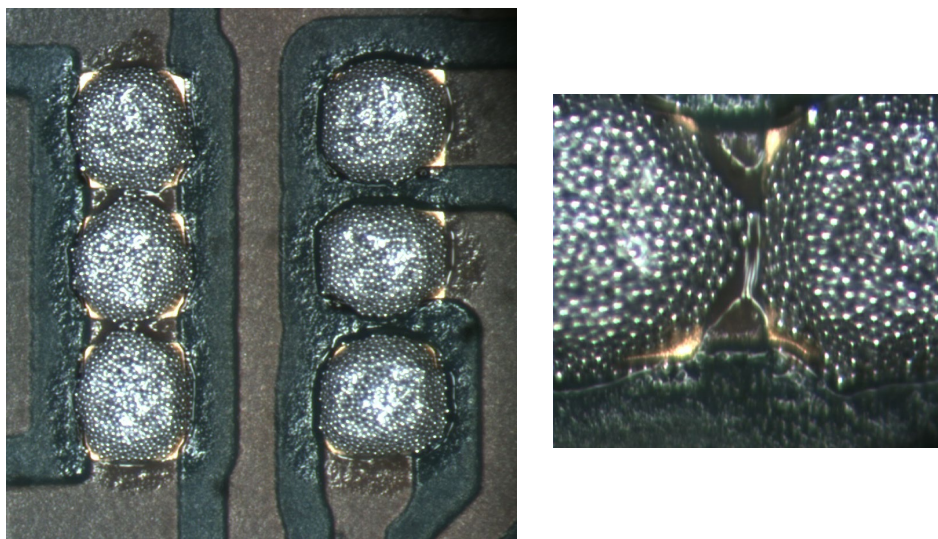


Obr. 54: Odnesení kuliček tavidlem

Příloha C: Vybrané snímky z mikroskopu s defekty pro nastavení 800/8



Obr. 55: Vyvýšenina v nanesené pastě

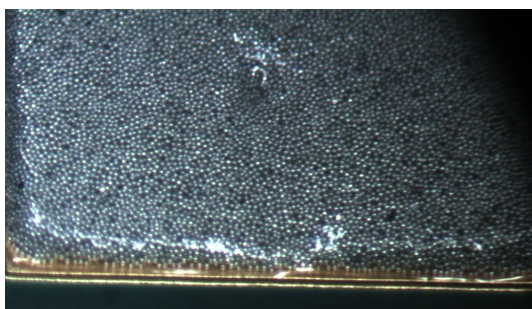


Obr. 56: Nadmíra natisknuté pasty vedoucí ke zvýšené hrozbě vzniku můstků

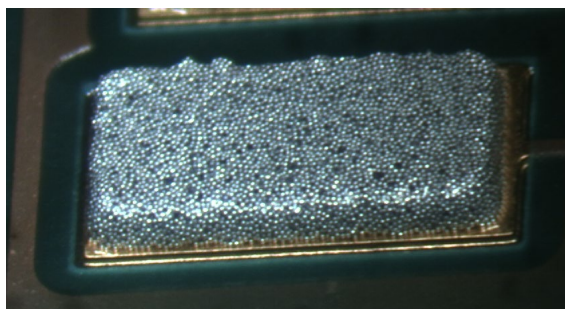


Obr. 57: Špatný tvar natisknuté pasty

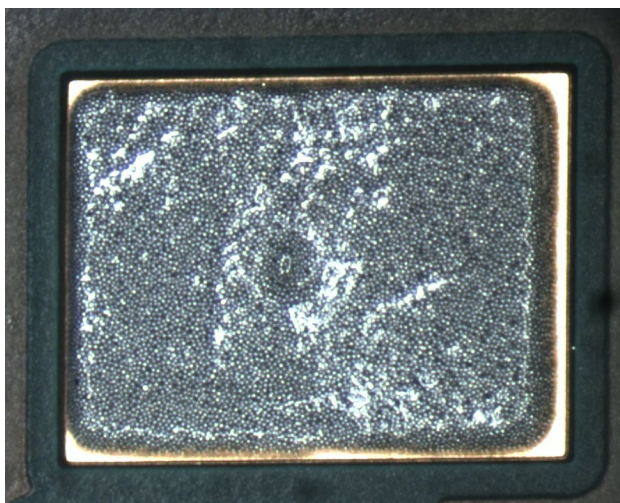
Příloha D: Vybrané snímky z mikroskopu s defekty pro nastavení 1000/5,5



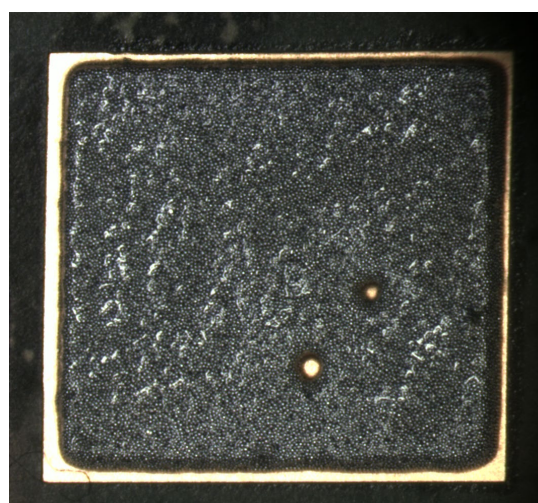
Obr. 58: Prohloubenina



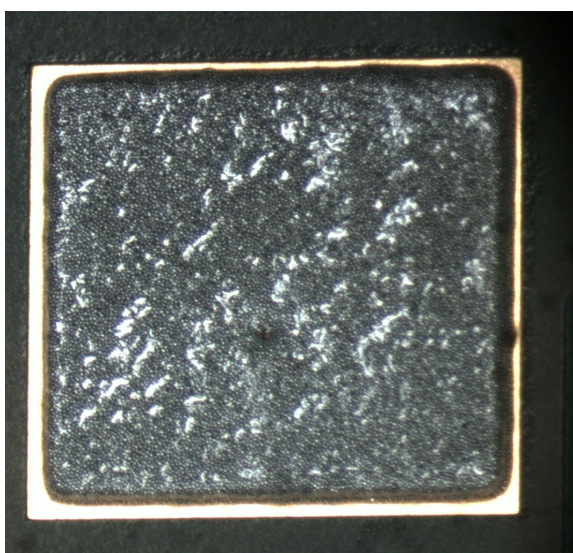
Obr. 59: Špatné oddělení šablony



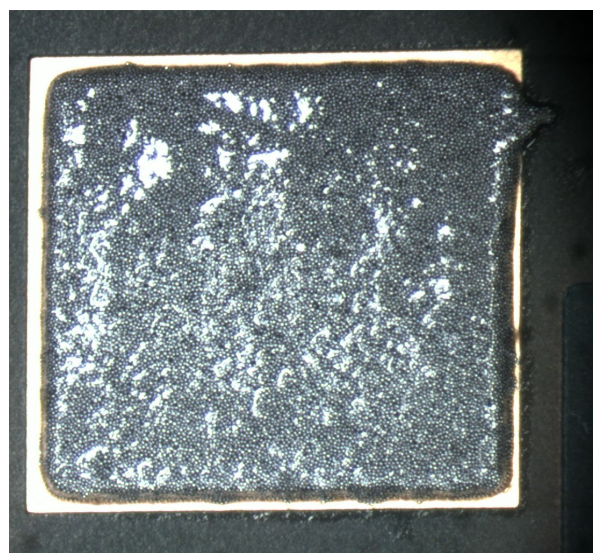
Obr. 60: Vyvýšenina v natisknuté pastě



Obr. 61: Důlky v natisknuté pastě

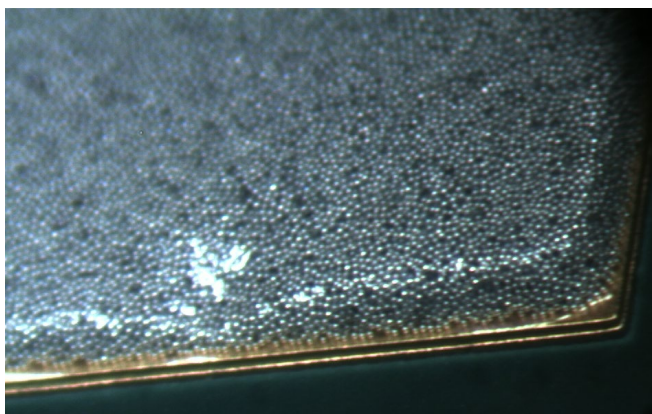


Obr. 62: Důlek v natisknuté pastě

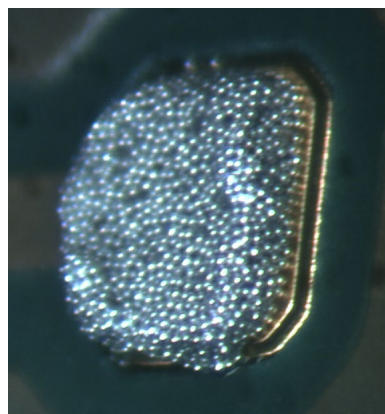


Obr. 63: Špatné oddělení šablony

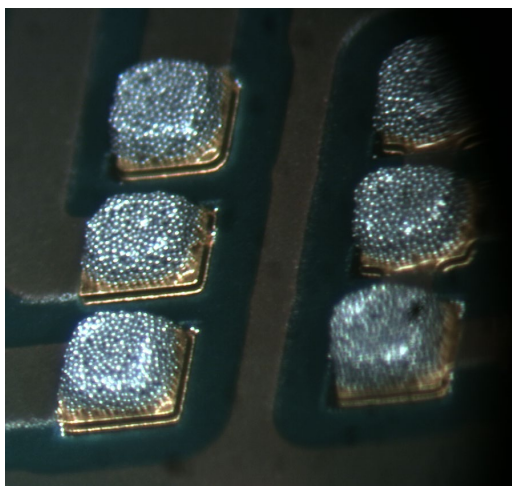
Příloha E: Vybrané snímky z mikroskopu s defekty pro manuální míchání



Obr. 64: Prohloubenina na okraji pasty



Obr. 65: Špatný tvar pasty



Obr. 66: Dog Ears



Obr. 67: Nadměrný objem pasty

Příloha F: Seznam obrázků

OBR. 1: MIKROSKOPICKÉ SNÍMKY ULTRAJEMNÝCH VLÁKEN – PŘEVZATO Z [4].....	13
OBR. 2: 3D SUBSTRÁT – PŘEVZATO Z [6]	14
OBR. 3: ANTÉNNÍ SYSTÉM MOBILNÍHO TELEFONU – PŘEVZATO Z [6]	14
OBR. 4: ZNÁZORNĚNÍ PŮSOBENÍ TĚRKY NA PASTU – PŘEVZATO Z [8]	15
OBR. 5: DIAGRAM PŘÍČIN A NÁSLEDKŮ KVALITY ŠABLONOVÉHO TISKU – PŘEVZATO Z [7]...	16
OBR. 6: DRUHY CHYB PŘI CHEMICKÉM LEPTÁNÍ – PŘEVZATO Z [7].....	17
OBR. 7: APERTURA VYROBENÁ LASEREM – PŘEVZATO Z [10].....	17
OBR. 8: APERTURA VYROBENÁ GALVANOPLASTIKOU – PŘEVZATO Z [10]	17
OBR. 9: ZBYTKY PÁJECÍ PASTY NA SPODNÍ STRANĚ ŠABLONY – PŘEVZATO Z [7]	18
OBR. 10: FYZIKÁLNÍ PŮSOBENÍ TĚRKY – PŘEVZATO Z [7]	18
OBR. 11: DRUHY TĚREK – PŘEVZATO Z [12]	19
OBR. 12: KOVOVÁ ŠABLONA PŘI NANÁŠENÍ – PŘEVZATO Z [13]	19
OBR. 13: SROVNÁNÍ VELIKOSTÍ KOMPONENT – PŘEVZATO Z [16]	20
OBR. 14: PROCES THR – PŘEVZATO Z [8].....	22
OBR. 15: BEZPEČNÉ VZDÁLENOSTI APERTUR OD STEPŮ ŠABLONY – PŘEVZATO Z [7].....	23
OBR. 16: ŘEZ 50 μM STEPĚM ŠABLONY – PŘEVZATO Z [7].....	23
OBR. 17: 3D ŠABLONA – PŘEVZATO Z [7]	23
OBR. 18: ZAPÁJENÁ PÁJECÍ PASTA S ROZTEČÍ 100 μM – PŘEVZATO Z [26]	24
OBR. 19: ŠABLONA PRO WAFER BUMPING – PŘEVZATO Z [29].....	24
OBR. 20: PUMPPRINT™ ŠABLONA – PŘEVZATO Z [30].....	25
OBR. 21: UKÁZKA NADZVEDNUTÉ KOMPONENTY	27
OBR. 22: DEFEKTY SOLDER BEADING A SOLDER GRAPING – PŘEVZATO Z [35].....	27
OBR. 23: MŮSTEK MEZI DVĚMA PLOŠKAMI – PŘEVZATO Z [36]	28
OBR. 24: VLIV ROZDĚLENÍ VELKÝCH APERTUR – PŘEVZATO Z [7]	29
OBR. 25: SPECIÁLNÍ DESIGN ŠABLON PODLE IPC-7525A – PŘEVZATO Z [37]	30
OBR. 26: ADHEZE KULIČKY PÁJKY KE STĚNÁM APERTUR – PŘEVZATO Z [7]	30
OBR. 27: UKÁZKA DEFektu "DOG EARS" – PŘEVZATO Z [40]	31
OBR. 28: ŠPATNÁ POZICE PASTY V DŮSLEDKU CHYBNÉHO ZAMĚŘENÍ ŠABLON.....	31
OBR. 29: VÝBRUS ODHALUJÍCÍ DUTINY	32
OBR. 30: RENTGENOVÝ SNÍMEK KOMPONENTY S DUTINAMI.....	32
OBR. 31: UKÁZKA DENDRITU NA DPS – PŘEVZATO Z [43].....	33
OBR. 32: UKÁZKA WHISKERU – PŘEVZATO Z [45].....	33
OBR. 33: ROTAČNÍ ENKODÉR.....	36
OBR. 34: 0606 LED ČIP	36
OBR. 35: 0603 LED ČIP	36
OBR. 36: ROTACE A REVOLUCE KELÍMKU – PŘEVZATO Z [51].....	37
OBR. 37: AUTOMATICKÝ MIXÉR	37
OBR. 38: ŠABLONA TESTOVACÍ DESKY SE ZVÝRAZNĚNOU POZICÍ P4001 (VIZ KAPITOLA 2.3)	38
OBR. 39: DEK HORIZON 03iX – PŘEVZATO Z [53].....	38
OBR. 40: SPI HS70 – PŘEVZATO Z [54]	39
OBR. 41: VYHODNOCENÍ MŮSTKU PROGRAMEM SPI	39
OBR. 42: USAZENINY NA DNĚ PASTY	42
OBR. 43: PÁJECÍ PASTA Z HLADINY (1200 RPM/15 MIN).....	43
OBR. 44: PÁJECÍ PASTA ZE DNA (1200 RPM/15 MIN)	43
OBR. 45: NATISKNUTÁ PÁJECÍ PASTA Z HLADINY (800 RPM/15 MIN)	43
OBR. 46: NATISKNUTÁ PÁJECÍ PASTA ZE DNA (800 RPM/15 MIN)	43
OBR. 47: MOTIV ŠABLONY PRO TESTOVACÍ DESKU.....	44
OBR. 48: STEP ŠABLONY PROMÍTNUTÝ NA VÝŠCE PÁJECÍ PASTY.....	45

OBR. 49: OTOČENÝ 0603 LED ČIP.....	51
OBR. 50: DUTINY PRO PASTU ZAMÍCHANOU MANUÁLNĚ.....	52
OBR. 51: DUTINY PRO PASTU ZAMÍCHANOU MIXÉREM.....	52
OBR. 52: ŠPATNÝ TVAR NATISKNUITÉ PASTY	9
OBR. 53: DŮLEK V NATISKNUITÉ PASTĚ	9
OBR. 54: ODNESENÍ KULIČEK TAVIDLEM.....	9
OBR. 55: VYVÝŠENINA V NANESENÉ PASTĚ.....	10
OBR. 56: NADMÍRA NATISKNUITÉ PASTY VEDOUĆÍ KE ZVÝŠENÉ HROZBĚ VZNIKU MŮSTKŮ ...	10
OBR. 57: ŠPATNÝ TVAR NATISKNUITÉ PASTY	10
OBR. 58: PROHLOUBENINA	11
OBR. 59: ŠPATNÉ ODDĚLENÍ ŠABLONY	11
OBR. 60: VYVÝŠENINA V NATISKNUITÉ PASTĚ	11
OBR. 61: DŮLKY V NATISKNUITÉ PASTĚ	11
OBR. 62: DŮLEK V NATISKNUITÉ PASTĚ	11
OBR. 63: ŠPATNÉ ODDĚLENÍ ŠABLONY	11
OBR. 64: PROHLOUBENINA NA OKRAJI PASTY.....	12
OBR. 65: ŠPATNÝ TVAR PASTY	12
OBR. 66: DOG EARS	12
OBR. 67: NADMĚRNÝ OBJEM PASTY	12

Příloha G: Seznam grafů

GRAF 1: ZÁVISLOST TEPLoty PÁJECÍ PASTY NA ČASE PRO DANÉ NASTAVENÍ OTÁČEK	41
GRAF 2: HISTOGRAM PLOCHY NANESENÉ PASTY PRO 0603 LED ČIPY	46
GRAF 3: POČET DEFEKTŮ V ZÁVISLOSTI NA NASTAVENÍ MIXÉRU	48
GRAF 4: DPŮ PRO JEDNOTLIVÉ PÁJECÍ PLOŠKY	50
GRAF 5: DEFEKTY V ZÁVISLOSTI NA TYPU PLOŠKY PRO JEDNOTLIVÁ NASTAVENÍ MIXÉRU ...	50
GRAF 6: HISTOGRAM VÝŠKY NANESENÉ PASTY PRO 0603 LED.....	1
GRAF 7: HISTOGRAM PLOCHY NANESENÉ PASTY PRO 0603 LED.....	2
GRAF 8: HISTOGRAM OBJEMU NANESENÉ PASTY PRO 0603 LED	2
GRAF 9: HISTOGRAM VÝŠKY NANESENÉ PASTY PRO 0606 LED.....	3
GRAF 10: HISTOGRAM PLOCHY NANESENÉ PASTY PRO 0606 LED.....	3
GRAF 11: HISTOGRAM OBJEMU NANESENÉ PASTY PRO 0606 LED.....	4
GRAF 12: HISTOGRAM VÝŠKY NANESENÉ PASTY PRO B300X – PLOŠKY 1.....	4
GRAF 13: HISTOGRAM PLOCHY NANESENÉ PASTY PRO B300X – PLOŠKY 1	5
GRAF 14: HISTOGRAM OBJEMU NANESENÉ PASTY PRO B300X – PLOŠKY 1.....	5
GRAF 15: HISTOGRAM VÝŠKY NANESENÉ PASTY PRO B300X – PLOŠKY 2.....	6
GRAF 16: HISTOGRAM PLOCHY NANESENÉ PASTY PRO B300X – PLOŠKY 2.....	6
GRAF 17: HISTOGRAM OBJEMU NANESENÉ PASTY PRO B300X – PLOŠKY 2.....	7
GRAF 18: HISTOGRAM VÝŠKY NANESENÉ PASTY PRO B300X – PLOŠKY 3.....	7
GRAF 19: HISTOGRAM PLOCHY NANESENÉ PASTY PRO B300X – PLOŠKY 3	8
GRAF 20: HISTOGRAM OBJEMU NANESENÉ PASTY PRO B300X – PLOŠKY 3.....	8

Příloha H: Seznam tabulek

TABULKA 1: BEZPEČNÉ VZDÁLENOSTI APERTUR OD STEPŮ ŠABLONY (V MM).....	23
TABULKA 2: NASTAVENÍ PARAMETRŮ ŠABLONOVÉHO TISKU	38
TABULKA 3: NAMĚŘENÉ TEPLoty PÁJECÍ PASTY [°C] PRO JEDNOTLIVÁ NASTAVENÍ.....	41
TABULKA 4: DŮLEŽITÉ ČASOVÉ OKAMŽIKY MĚŘENÍ TEPLoty PÁJECÍ PASTY.....	42
TABULKA 5: NASTAVENÍ PRO DRUHÝ EXPERIMENT	44
TABULKA 6: POČET DEFECTŮ PRO JEDNOTLIVÁ NASTAVENÍ.....	47
TABULKA 7: ANALÝZA DEFECTŮ PRO JEDNOTLIVÉ PÁJECÍ PLOŠKY.....	49