



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

ŠABLONOVÝ TISK PÁJECÍ PASTY A OPTIMALIZACE PROCESU PRO ZVÝŠENÍ VÝTĚŽNOSTI

STENCIL PRINTING OF SOLDER PASTE AND PROCESS OPTIMIZATION FOR INCREASING YIELD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Milan Flos

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý,

Ph.D.

BRNO 2024

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Milan Flos

ID: 221251

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Šablonový tisk pájecí pasty a optimalizace procesu pro zvýšení výtěžnosti

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části zpracujte problematiku významu tisku přes šablonu a síto různých materiálů. Popište automatický tiskový stroj, princip funkce a začlenění do výrobní linky SMT včetně SPI. Podrobněji se soustřeďte na šablony – materiál, proces výroby, zásady designu a požadované vlastnosti. Technologicky rozeberte proces tisku pájecí pasty přes šablonu, materiálové a procesní faktory ovlivňující kvalitu tisku pájecí pasty (Ishikawa diagram), včetně mezioperačního čištění šablony. V praktické části vyhodnoťte a porovnejte rozdílnou technologii výroby šablony s dosaženou kvalitou tisku, defekty po tisku (SPI) a po pájení. Diskutujte dosažené FPY.

Technický konzultant Ing. Řezníček Michal, Ph.D. z firmy BEAMS.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 22.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zaměřuje na komplexní analýzu a optimalizaci procesu šablonového tisku pájecí pasty, který je klíčový pro výrobu vysoce kvalitních a spolehlivých elektronických zařízení. Práce zahrnuje přehled historického vývoje tiskových technologií, srovnání různých typů šablon a metod jejich povrchových úprav, jako jsou plasma-coating a electro-polishing. Praktická část analyzuje data z automatické optické inspekce (AOI) a kontroly nanesení pájecí pasty (SPI), přičemž výsledky ukazují, že šablony s plasma-coatingem dosahují vyšší kvality tisku. Zkoumání hydrofobnosti povrchů a mikroskopická analýza šablon poskytují důležité poznatky pro zlepšení výrobních procesů v elektronickém průmyslu.

Klíčová slova

Tisk pájecí pasty, šablonový tisk, pájecí pasta, SPI, AOI, šablona, Nano-coating, Electro-polishing

Abstract

This diploma thesis focuses on the comprehensive analysis and optimization of the solder paste stencil printing process, which is crucial for the production of high quality and reliable electronic devices. The work includes a review of the historical development of printing technologies, a comparison of different types of stencils and their surface treatment methods such as plasma-coating and electro-polishing. The practical part analyses data from automatic optical inspection (AOI) and solder paste inspection (SPI), with results showing that plasma-coated stencils achieve higher print quality. The investigation of surface hydrophobicity and microscopic analysis of the stencils provide important insights for improving manufacturing processes in the electronics industry.

Keywords

Solder Paste Printing, Stencil Printing, Solder Paste, SPI, AOI, stencil, Nano-coating, Electro-polishing

Bibliografická citace

FLOS, Milan. *Šablonový tisk pájecí pasty a optimalizace procesu pro zvýšení výtěžnosti* [online]. Brno, 2024 [cit.2024-05-22]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160346>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Starý.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Milan Flos</i>
VUT ID studenta:	<i>221251</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2023/24</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Šablonový tisk pájecí pasty a optimalizace procesu pro zvýšení výtěžnosti</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 22. května 2024

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Michalovi Řezníčkovi, Ph.D. za velmi užitečné rady a kontakty. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Pavlovi Poppovi za odbornou pomoc při zpracování dat z SPI a AOI. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat Ing. Pavlovi Čudkovi, Ph.D. za jeho odbornou pomoc v oblasti mikroskopie.

V Brně dne: 22. května 2024

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
SEZNAM GRAFŮ	11
ÚVOD	12
1. TISK PÁJECÍ PASTY	13
1.1 IN-LINE TISKOVÉ STROJE	13
1.2 OFF-LINE STROJE.....	13
1.3 OTEVŘENÝ SYSTÉM.....	14
1.4 UZAVŘENÝ SYSTÉM.....	14
1.5 ŠABLONOVÝ TISK	14
1.5.1 <i>Podpěření DPS při tisku</i>	16
1.6 SÍTOTISK	16
2. PÁJECÍ PASTA	18
2.1.1 <i>Pájecí slitina</i>	18
2.1.2 <i>Tavidlo</i>	20
3. ŠABLONY PRO TISK PÁJECÍ PASTY	21
3.1 METODY ZHOTOVENÍ ŠABLONY POMOCÍ LASERU	21
3.1.1 <i>Area ratio</i>	22
3.1.2 <i>Aspect ratio</i>	22
3.1.3 <i>Čištění šablony</i>	23
3.2 ELECTRO FORMING.....	23
3.3 KRITICKÉ FAKTORY PŘI VÝROBĚ ŠABLON.....	24
4. POVRCHOVÉ ÚPRAVY ŠABLON.....	25
4.1 NANO-COATING.....	25
4.2 PLASMA-COATING	28
4.3 ELECTRO-POLISHING	30
5. KONTROLA DEFEKTŮ	31
5.1 SPI – KONTROLA NANESENÍ PASTY	31
5.1.1 <i>Fázová profilometrie</i>	32
5.1.2 <i>Stínění velkými součástkami</i>	33
5.2 AOI – AUTOMATICKÁ OPTICKÁ INSPEKCE.....	33
5.2.1 <i>Inline AOI</i>	34
5.2.2 <i>Offline AOI</i>	34
5.2.3 <i>2D AOI</i>	35
5.2.4 <i>3D AOI</i>	35
5.2.5 <i>Odrazy mezi komponenty</i>	35
5.2.6 <i>Benefity AOI</i>	36
5.3 X-RAY	36
5.3.1 <i>In-line x off-line</i>	37

6. PRAKTICKÁ ČÁST	39
6.1 ZPRACOVÁNÍ DAT Z AOI A SPI	39
6.2 MĚŘENÍ PŘENOSU PÁJECÍ PASTY V ZÁVISLOSTI NA VELIKOSTI APERTUR	48
6.3 MĚŘENÍ HYDROFOBNOTI POVRCHU ŠABLON PRO TISK PÁJECÍ PASTY	56
6.4 ANALÝZA POVRCHU ŠABLON PRO TISK PÁJECÍ PASTY	62
6.5 NÁVRHY PRO DALŠÍ POKRAČOVÁNÍ VE VÝZKUMU	64
7. ZÁVĚR	65
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	67

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 In-line stroj na tisk pájecí pasty Momentum 2 BTB [30]	13
Obrázek 1.2 Off-line stroj pro tisk pájecí pasty FA23 [31]	14
Obrázek 1.3 Tisk pájecí pasty přes šablonu [28]	15
Obrázek 1.4 Ukázka pohybu pájecí pasty při tisku [27]	15
Obrázek 1.5 Podpěry DPS při tisku pájecí pasty [32].....	16
Obrázek 1.6 Princip sítotisku [1]	16
Obrázek 2.1 Pájecí pasta [34][35].....	18
Obrázek 2.2 Velikost zrn pájecí slitiny uvnitř pájecí pasty [33]	19
Obrázek 2.3 Mixér na pájecí pastu [36].....	20
Obrázek 3.1 Výroba šablony pomocí laseru [37].....	21
Obrázek 3.2 Výroba šablony pomocí laseru [38].....	21
Obrázek 3.3 Čistění šablony při tisku pájecí pasty [32].....	23
Obrázek 4.1 Aplikovaný nano povlak [21]	25
Obrázek 4.2 Výsledky po pátém tisku pájecí pasty [21].....	26
Obrázek 4.3 Výsledky po pátém tisku pájecí pasty s šablonou bez povrchové úpravy a s šablonou s nano povlakem [21]	26
Obrázek 4.4 Porovnání tisku pájecí pasty T4 na šablonách s povrchovou úpravou a bez povrchové úpravy (motiv BGA) [21].....	27
Obrázek 4.5 Porovnání tisku pájecí pasty T3 a T4 na šablonách s povrchovou úpravou a bez povrchové úpravy (motiv BGA) [21].....	27
Obrázek 4.6 Povrch pružiny v různých stadiích úpravy povrchu pomocí PeP [22].....	28
Obrázek 4.7 Zařízení pro úpravu povrchu pomocí plasmu [23]	29
Obrázek 4.8 Schematický diagram viskózního filmu, vrstva viskózního filmu přichycena na anodě [24][25]	30
Obrázek 5.1 Ilustrační obrázek funkce SPI [39]	31
Obrázek 5.2 Princip fázové profilometrie [3]	32
Obrázek 5.3 Stínění součástek SPI [3].....	33
Obrázek 5.4 Automatická optická inspekce [4]	34
Obrázek 5.5 Odrazy světla na DPS při skenování [3].....	36
Obrázek 5.6 X-ray Nordson [6]	37
Obrázek 6.1 Ishikawa diagram výrobního procesu	43
Obrázek 6.2 Step up přelom šablony	49
Obrázek 6.3 Barevná mapa naneseného objemu pájecí pasty	51
Obrázek 6.4 Defekt posunutí v ose Y SPI	54
Obrázek 6.5 Příklad měření hydrofobnosti povrchu na šabloně E Y	56
Obrázek 6.6 Měření hydrofobnosti povrchu šablony s povrchovou úpravou nano-coatingem.....	58
Obrázek 6.7 Měření hydrofobnosti povrchu šablony s povrchovou úpravou electro-polishingem.....	58
Obrázek 6.8 Měření hydrofobnosti povrchu šablony s povrchovou úpravou plasma-coatingem	59
Obrázek 6.9 Měření hydrofobnosti povrchu šablony s povrchovou úpravou plasma-coatingem	60
Obrázek 6.10 Spodní strana šablony typu E Y pod AFM mikroskopem	62
Obrázek 6.11 Hrana apertury šablony typu E Y pod elektronovým mikroskopem	63

SEZNAM TABULEK

Tabulka 6.1 Parametry použitých šablon.....	57
Tabulka 6.3 Naměřená data pro šablonu E X	60

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 NG type – SPI.....	40
Graf 2 SPI Judgement.....	41
Graf 3 Operator judgement – SPI.....	42
Graf 4 NG type – AOI.....	44
Graf 5 Soldering NG.....	45
Graf 6 AOI Judgement.....	45
Graf 7 Operator judgement – AOI.....	46
Graf 8 Průměrná doba kontroly DPS na SPI za jeden výrobní den pro šablonu typu P.....	47
Graf 9 Průměrná doba kontroly DPS na SPI za jeden výrobní den pro šablonu typu E.....	48
Graf 10 Průměrná nanesená výška pájecí pasty v závislosti na velikosti apertur.....	49
Graf 11 Průměrný nanesený objem pájecí pasty v závislosti na velikosti apertur.....	50
Graf 12 Průměrná nanesená plocha pájecí pasty v závislosti na velikosti apertur.....	52
Graf 13 Průměrné posunutí pájecí pasty v ose X v závislosti na velikosti apertur.....	53
Graf 14 Průměrné posunutí pájecí pasty v ose Y v závislosti na velikosti apertur.....	53
Graf 15 Analýza kvality procesu tisku v závislosti na velikosti apertur.....	54

ÚVOD

V moderní době je výroba elektroniky stále více závislá na precizních a spolehlivých procesech, které zajišťují vysokou kvalitu a efektivitu. Jedním z klíčových procesů v tomto odvětví je šablonový tisk pájecí pasty. Tento proces hraje zásadní roli při výrobě desek plošných spojů (DPS), kde kvalita a přenos nanosení pájecí pasty přímo ovlivňuje funkčnost a spolehlivost finálních elektronických zařízení.

Šablonový tisk pájecí pasty je proces, který se neustále vyvíjí a optimalizuje, aby splňoval rostoucí požadavky na minimalizaci a komplexitu elektronických zařízení. Nesprávné nanosení pájecí pasty může vést k různým defektům, které mohou mít za následek selhání celého elektronického zařízení. Až 60 % defektů vzniká právě v důsledku nesprávného nanosení pájecí pasty, což podtrhuje důležitost precizního nastavení tohoto procesu.

V úvodních kapitolách práce je popsána historie a vývoj technologií tisku pájecí pasty. Od počátečních metod sítotisku, které byly méně přesné a spolehlivé, se vývoj přesunul k modernějším technikám, jako je šablonový tisk. Tato metoda nabízí vyšší přesnost a spolehlivost, což je klíčové pro výrobu moderních elektronických zařízení. Další část práce se věnuje různým typům šablon a metodám jejich výroby. Jsou zde podrobně popsány technologie jako laserové řezání a chemické leptání, které umožňují vytvářet apertury s vysokou přesností. Neméně důležitou částí procesu tisku pájecí pasty jsou povrchové úpravy šablon. V práci jsou rozebrány různé metody povrchových úprav, jako je nano-coating, plasma-polishing a electro-polishing.

Kontrola kvality je nezbytnou součástí výrobního procesu. Práce podrobně popisuje různé kontrolní metody, které se používají pro ověření kvality tisku pájecí pasty. Patří sem Solder Paste Inspection (SPI), automatická optická inspekce (AOI) a rentgenová kontrola. Tyto metody umožňují detekci chyb v objemu a tvaru nanosené pasty, stejně jako defektů v samotném pájení a umístění komponent.

V praktické části jsou analyzována data získaná pomocí automatické optické inspekce (AOI) a kontroly nanosení pájecí pasty (SPI). Cílem je identifikovat a kvantifikovat defekty, které vznikají během tisku pájecí pasty. Data byla změřena na sérii DPS, kde byly porovnávány různé povrchové úpravy šablon. Data z AOI a SPI jsou klíčová pro pochopení, jak jednotlivé úpravy ovlivňují kvalitu tisku a výslednou spolehlivost pájených spojů. Další kapitola se zaměřuje na měření efektivity přenosu pájecí pasty přes šablonu s různými velikostmi apertur. Byly použity šablony s různými povrchovými úpravami, aby se zjistilo, jak tyto úpravy ovlivňují přenos pasty. V další kapitole je popsán experiment zaměřený na měření hydrofobnosti povrchu šablon s různými povrchovými úpravami. Hydrofobnost je důležitým faktorem, který pomáhá bránit nechtěnému přichytávání pájecí pasty na spodní straně šablony. Poslední kapitola praktické části se zaměřuje na detailní analýzu povrchu šablon pomocí pokročilých mikroskopických technik.

1. TISK PÁJECÍ PASTY

Tento proces se skládá ze čtyř základních elementů: tiskové médium (pájecí pasta), objekt, na který je pasta nanášena (plošný spoj), síto nebo šablona, které definují výsledný vzor a poslední je stěrka. Hlavní podstata tiskového stroje, je zajištění opakovatelnosti procesu s minimální zásahem pracovního personálu. DPS je umístěna pod sítem nebo šablonou, na ně je nanášena pasta a pomocí stěrky je protlačena skrz apertury (zhotovené otvory) na jednotlivé pady (pájecí plošky). Tiskové stroje na pájecí pastu lze rozdělit na in-line a off-line, dále se dají rozdělit na stroje v otevřeném systému a uzavřeném systému. [1][7]

1.1 In-line tiskové stroje

Stroje s označením in-line nebo on-line jsou zařízení integrovány přímo do výrobní linky. DPS se zde pohybuje pomocí dopravníku, po aplikaci pasty opustí zařízení na dalším dopravníku a ten ji dopraví do zařízení SPI, kde proběhne kontrola nanášené pasty. Tyto zařízení disponují vysokou efektivitou, a to díky automatickému přesunu DPS a automatickému nanášení pájecí pasty, vše je řízeno programem v počítači. Obvykle jsou tyto stroje dražší než off-line, a to díky robustnímu provedení a množství automatizace a elektroniky. [1]



Obrázek 1.1 In-line stroj na tisk pájecí pasty Momentum 2 BTB [30]

1.2 Off-line stroje

Off-line zařízení je umístěno mimo výrobní linku, není s ní nijak spojena dopravníky nebo komunikací. Pasta na DPS může být nanášena automaticky nebo ručně, DPS jsou vkládány a vykládány manuálně, mají tedy nižší produkční rychlost a vyžadují obsluhu.

Tyto stroje jsou vhodné pro malé série nebo pro vývoj ve výzkumných centrech, obvykle jsou výrazně levnější.



Obrázek 1.2 Off-line stroj pro tisk pájecí pasty FA23 [31]

1.3 Otevřený systém

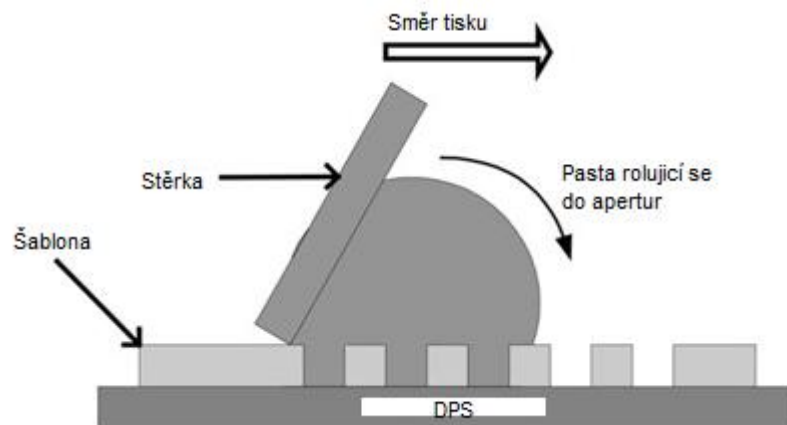
Další možnost, jak rozdělit tiskové zařízení je pomocí jeho kompatibility. Otevřené systémy jsou navrženy tak, aby byly všeobecně kompatibilní s širokou škálou zařízení a softwaru od různých výrobců. To maximalizuje flexibilitu při sestavování výrobních linek. Tato vlastnost tak umožňuje jednoduché nahrazení zařízení při jejich poruše nebo náhradě. Důležité je však ověřit tuto kompatibilitu napříč použitými výrobci.

1.4 Uzavřený systém

Uzavřené systémy obsahují zařízení a software pouze od jedné firmy a jsou optimalizovány pro maximální spolehlivost a výkon. Ovšem tyto systémy disponují menším výběrem zařízení pro případné rozšíření nebo přidání nové technologie. Tito výrobci často disponují kvalitním servisním týmem a poradenstvím v případě potíží.

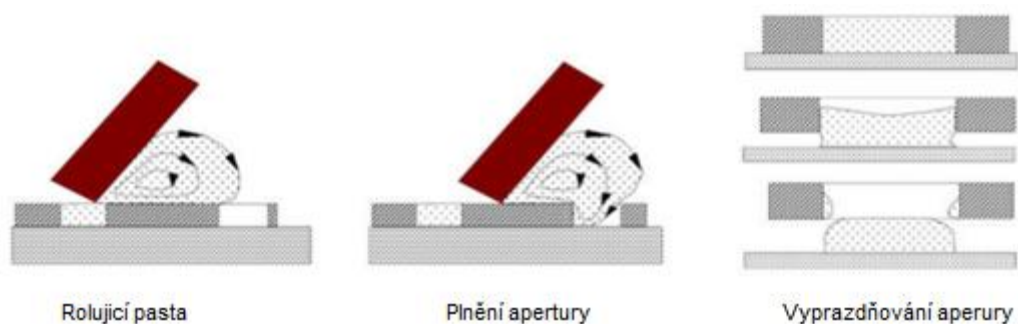
1.5 Šablonový tisk

Šablonový tisk je jedna z mnoha možností, jak dostat pájecí pastu na danou plošku. Šablonový tisk je ale nejspolehlivější, jak z pohledu životnosti šablony, tak i opakovatelnosti procesu. Jedná se o průmyslové řešení pro velké série s vysokou požadovanou kvalitou. [1][29][28][27]



Obrázek 1.3 Tisk pájecí pasty přes šablonu [28]

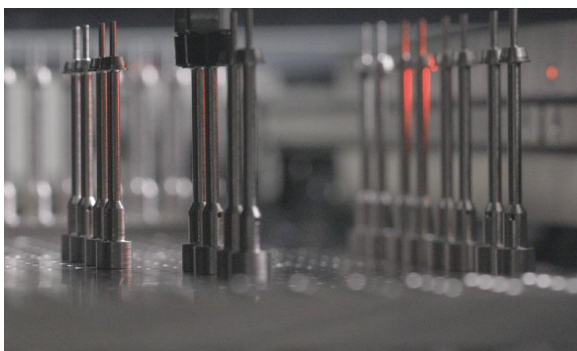
Stroj na šablonový tisk se skládá z ústrojí, kde je přichycena šablona. Šablona může být umístěna v napínacím mechanismu na několik šroubů nebo v pneumatickém rámu. Jedna z dalších možností je napnutí šablony ve speciálním stroji a následně šablonu přilepit epoxidovým lepidlem do rámu. Tento proces je více upřednostňován, protože šablona je rovnoměrně napnutá ve všech směrech. Dále se zde nachází dvě stěrky (squeegee), každá pro jeden směr tisku. Pasta se tak tlačí, roluje před stěrkou a zaplňuje jednotlivé apertury před stěrkou. Stěrka pak zarovná povrch pasty, která je uvnitř apertury. Stěrka během tisku vytváří hydrodynamický tlak na povrch šablony a tím natlačí pájecí pastu do apertur. Obvykle je stěrka kovová a její sklon je nastavený nejčastěji 45-60°. Rychlost stěrky velmi záleží na provedení dané DPS, pokud bude osazena BGA a QFP součástkami s velmi malou roztečí je nutné zvolit i nižší rychlost. Rychlost se tak pohybuje v rozmezí 20-50 mms^{-1} . [1][29][28][27]



Obrázek 1.4 Ukázka pohybu pájecí pasty při tisku [27]

1.5.1 Podepření DPS při tisku

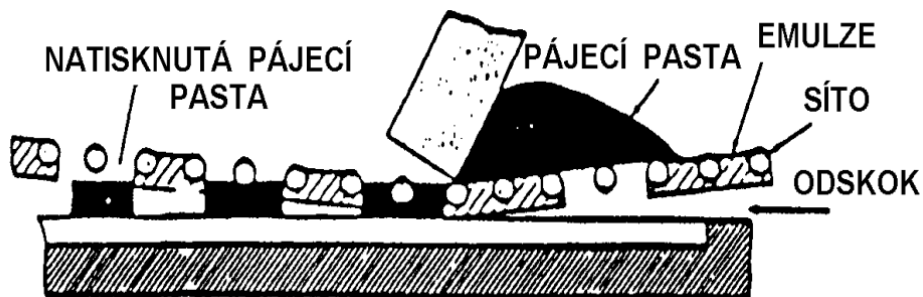
Při šablonovém tisku pájecí pasty je velice důležité pevně a rovnoměrně fixovat danou DPS. Toto podepření zabrání deformaci DPS během tisku, zvyšuje tak přesnost a kvalitu tisku pájecí pasty. DPS je nutné pečlivě podepřít, aby při tisku zůstala rovná. Některé stroje disponují programovatelnými podporami, které se přizpůsobí velikosti a tvaru DPS. Levnější stroje disponují sadou podpěr, kterou technolog rozmístí do pod danou DPS tak, aby došlo k rovnoměrnému rozložení působící váhy. Tento úkol je velmi složitý, pokud se jedná o výrobu sekundární strany DPS a na spodní straně už jsou zapájené součástky. Je tak nutné najít vhodná místa, kde nedojde k jejich poškození. [1][29][28][27]



Obrázek 1.5 Podpěry DPS při tisku pájecí pasty [32]

1.6 Sítotisk

Metoda sítotisku pájecí pasty se hojně užívala před přechodem na šablonový tisk. Sítotisk nemá tak velkou životnost a nemá příliš dobrou kvalitu tisku, pokud jde o komponenty s velmi malými rozteči (BGA, QFP). Sítotisk je vhodný pro DPS s jednoduchým designem, pro malé série. Celkově sítotisk nevyžaduje vysokou investici ve srovnání s šablonovým tiskem. Materiál síta může být polyester nebo kov. [1]



Obrázek 1.6 Princip sítotisku [1]

Výroba začíná napnutím síťoviny do pevného rámu, následně je na síto nanášena fotocitlivá emulze. Následuje přiložení masky s otvory budoucích apertur, po osvětlení emulze vytvrdne a místa které byly zakryty jsou nezpevněny a budou odstraněny. Výška nanášené pájecí pasty je stejná jako tloušťka síta. Díky pružnosti síta nastává takzvaný odskok od povrchu DPS, u síta z polyesteru je větší, než u síta z nerezové oceli. Typ stěrky a rychlost ovlivňuje vnik pasty do apertur. Velmi důležité jsou parametry síťoviny, světlost oka představuje vzdálenost mezi jednotlivými vlákny, průměr vlákna, otevřená plocha síťoviny, tloušťka síťoviny, hustota ok. Platí zde pravidlo, pro úspěšný tisk by měla být dodržena velikost kuliček obsahujících pájecí pastu menší než $1/3$ světlosti oka.

2. PÁJECÍ PASTA

Vynález pájecí pasty nelze přisuzovat pouze jednomu vědci, šlo o postupný vývoj, kde s novými technologiemi přišly také nové možnosti. S příchodem pájecí pasty bylo upraveno její složení přímo pro využití na pájení SMD (Surface Mount Device) součástek. S tímto průlomem se posunuly možnosti jak návrhu, tak i výroby DPS. [1][7]

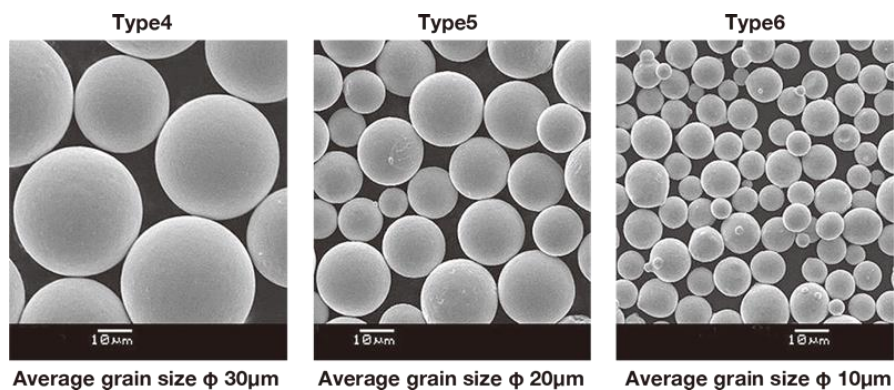


Obrázek 2.1 Pájecí pasta [34][35]

Chování pájecí pasty je definováno reologickými vlastnostmi a ty úzce souvisí se složením pájecí pasty. Pro každý druh aplikační techniky je vhodná jiná viskozita pájecí pasty. Nízká viskozita pájecí pasty je vhodná pro ruční aplikaci pomocí tlakového dávkovače 200-450 Pa.s. Pro aplikaci pájecí pasty pomocí sítotisku je nutné použít pasty s vyšší viskozitou 400-700 Pa.s. Kdyby byla viskozita příliš vysoká, pasta by se při odtrhnutí zachytila na masce sítu a nebylo by dosaženo správného množství pájecí pasty, což by vedlo k dalším defektům. Šablonový tisk vyžaduje viskozitu nejvyšší 600-1000 Pa.s. [1][7]

2.1.1 Pájecí slitina

Pájecí pasta je složena z práškovité pájecí slitiny. Mikroskopické kuličky pájecí slitiny nemají vždy jeden konkrétní rozměr pro danou pastu. Rozměry jednotlivých kuliček se pohybují v rozmezí např. T3, to je označení pro pájecí pastu s částicemi pájecí slitiny v rozmezí 20-45 μm , platí zde Gaussovo rozložení, čím větší je číslo za T tím menší částice pasta obsahuje např. T6 5-15 μm . Pro výběr vhodné velikosti těchto částic se používá pravidlo 5D. Do nejmenší apertury v šabloně se musí vejít na šířku minimálně 5 největších kuliček z daného rozsahu. [1][7]



Obrázek 2.2 Velikost zrn pájecí slitiny uvnitř pájecí pasty [33]

Výběr vhodné pájecí slitiny je velmi klíčový pro výsledné vlastnosti přetavené pájky. Jedny z velmi kritických parametrů jsou například: teploty liquidu a solidu (některé součástky mají nižší maximální teplotu), elektrická a tepelná vodivost, mechanická pevnost, teplotní koeficient délkové roztažnosti (TCE), povrchové napětí slitiny a také kompatibilita s různými povrchovými úpravami. [1][7]

Jedna z důležitých věcí, na které je vhodné myslet, je tvorba oxidů. Oxidy kovů jsou v pájecím procesu velmi nechtěné. Celkově negativně ovlivňují výslednou kvalitu pájeného spoje, protože mají výrazně vyšší teplotu tavení. SnO_2 má teplotu tavení až $1930\text{ }^\circ\text{C}$. Pasty s menší velikostí zrn jsou na tento problém daleko více náchylnější, jelikož obsahují více kuliček, tudíž je zde i celkově větší povrch, který může oxidovat oproti pastám s většími zrny pájecí slitiny. Je tedy nutné tvorbu oxidů minimalizovat. Oxidování je způsobeno kontaktem pájecí slitiny se vzduchem, k tomu dochází jak při skladování, jelikož nádoba, kde je pasta uskladněna není vzduchotěsná, tak i při samotném výrobním procesu. [1][7]

Pro co největší snížení oxidace je nutné dodržovat jistá pravidla. Hlavní je dodržovat postupy a doporučení výrobce dané pasty. V prostorách výroby je nutné kontrolovat vlhkost a teplotu vzduchu. Pro management skladu je vhodné používat systém FIFO (First in first out), docílí se tak toho, že pasty budou vždy relativně čerstvé. Před použitím je nutné pastu temperovat, a na speciálním stroji důkladně promíchat, až poté je možné pastu otevřít a nanést na šablonu. Pokud by byla pasta otevřena ihned po vyndání z lednice, začala by na ní kondenzovat voda díky rozdílným teplotám, to by vedlo k nežádoucí oxidaci. Promíchání je také nutné kvůli sedimentaci pasty. Výrobce je dále například definován čas, po který může být pasta ponechána ve stroji, který netiskne (přibližně 1 h). [1][7]



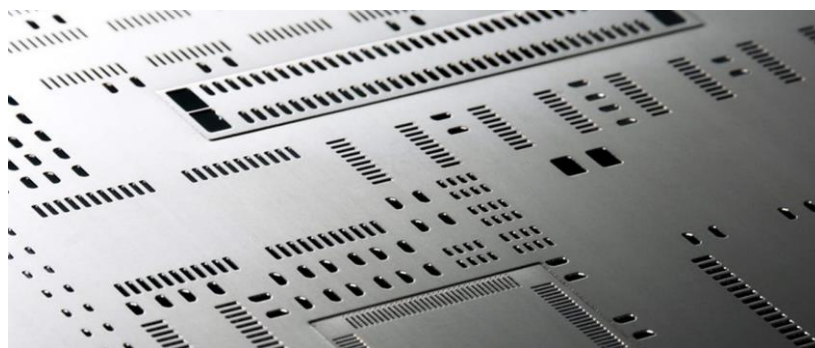
Obrázek 2.3 Mixér na pájecí pastu [36]

2.1.2 Tavidlo

Tavidlo neboli flux má v procesu pájení stěžejní roli, jedna z jeho hlavních funkcí je rozpouštění oxidů na povrchu pájených materiálů. Oxidy na povrchu pájené plošky/vývodu by snižovaly adhezi pájky a oslabily by tak výsledný pájený spoj. Tavidlo obecně čistí pájený povrch od mastnoty a organických nečistot, tím pádem se pájka může lépe roztéct. Tavidlo se aktivuje teplotou, ta závisí na konkrétním typu pájecí pasty. Jedná se o takzvanou soaking zone (například 150-180 °C), tedy oblast, kde tavidlo očistí pájený spoj, odstraní oxidy, zvýší povrchové napětí a tím zlepší smáčivost. Tavidlo také chrání již očištěný spoj při následném procesu přetavení. [1][7]

3. ŠABLONY PRO TISK PÁJECÍ PASTY

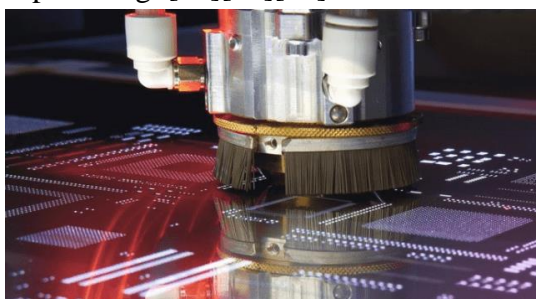
Šablony jsou nejčastěji zhotoveny z mosazi, niklu nebo nerezové oceli o tloušťce 0,15 mm. Otvory (apertury), kterými se pasta protlačí na DPS, se zhotoví pomocí laseru nebo chemicky leptáním. Jedny z hlavních parametrů šablony jsou její rozměry, způsob uchycení, tloušťka šablony a povrchová úprava. Kvalita dané šablony je nejvíce ovlivněna přesností tvarů daných apertur, jejich offsetu, sbíhavostí stěn apertur. Je nutné zkontrolovat kvalitu daného zařízení, na kterém bude šablona vyráběna. Jedná se o kontrolu kvality celého výrobního procesu, kvalitu použitého materiálu pro výrobu šablony, kontrolu teploty v různých částech procesu, kontrolu pnutí v materiálu během procesu. [1] [40][41][42]



Obrázek 3.1 Výroba šablony pomocí laseru [37]

3.1 Metody zhotovení šablony pomocí laseru

Nejběžnější metoda pro zhotovení apertur je pomocí laseru. Tato metoda je velice přesná – řádově μm . Největší nevýhoda této metody je hrubý povrch stěn apertur, na kterých se zachytává pájecí pasta, ta následně bude chybět na plošce, a to může zapříčinit následný defekt. Tuto nevýhodu však lze eliminovat dodatečnou povrchovou úpravou, například metodou electro-polishing. [50][41][42]



Obrázek 3.2 Výroba šablony pomocí laseru [38]

Stroj, který se používá k řezání šablon, se skládá ze dvou částí, samotného laseru a pohyblivého mechanismu. Je velmi klíčové, aby byl paprsek co nejmenší a zároveň velmi stabilní. Na velikosti paprsku záleží, jak velké apertury je možné zhotovit. Čím menší průměr má daný paprsek, tím přesnější dokáže být. Pokud paprsek není stabilní v jeho velikosti a výkon je proměnlivý, apertury nebudou mít danou velikost nebo budou posunuté. Kulaté apertury budou oválné a jejich povrch hran bude velmi hrubý. Většina těchto laserů potřebuje proud vysoce výkonných pulzů k proříznutí daného kovu. Jedny z prvních zařízení používaly lasery s nízkou frekvencí paprsků. To vedlo k tomu, že řez byl vroubkovaný, pokud se kov pohyboval příliš rychle. V současnosti mají lasery daleko vyšší frekvenci i rychlost (5-10 apertur za sekundu). Výsledný produkt je také nutné kontrolovat. Pomocí mikroskopu se provádí kontrola vnitřních hran apertur. Většina těchto systémů dosahuje přesnosti 5-10 μm . Nejvíce je tato hodnota ovlivněna pohybovým mechanismem, který musí být maximálně přesný a vyvážený. Celý stroj musí být upraven tak, aby nevytvářel žádné vibrace a eliminoval ty, které přicházejí z externího prostředí. [40][41][42]

Pro technologii řezání laserem se nejvíce používá nerezová ocel typ 302 a 304. Výsledné plechy téměř stejnou tloušťku po celé ploše, odchylka bývá $\pm 10 \mu\text{m}$. Ve snaze zefektivnit uvolnění protlačené pasty se zhotovené šablony leští technologií chem-polishing nebo electro-polishing. [40][41][42]

3.1.1 Area ratio

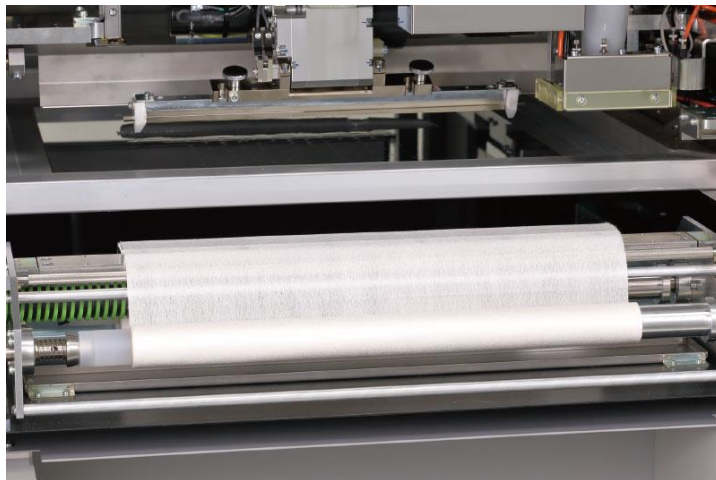
Area ratio neboli poměr plochy, je definován jako poměr otevřené plochy apertury v šabloně k ploše stěn této apertury. Tento poměr je velmi důležitý, jelikož ovlivňuje to, jak snadno lze pájecí pastu prostřednictvím apertury nanést. Z toho vyplývá, že pokud bude poměr plochy vyšší, tak pastu bude jednoduše protlačit. Toto je velmi důležité pro malé apertury. Obecné pravidlo bývá, že poměr plochy by měl být větší než 0,66 pro spolehlivé a bezproblémové nanesení pájecí pasty. Tato hodnota vychází z normy IPC 7525. [1][29][28][27]

3.1.2 Aspect ratio

Aspect ratio je definován jako poměr šířky apertury k tloušťce šablony. Tento poměr je důležitý pro určení, jak lehce se pasta z apertury odpojí/vyjme. Vyšší poměr rozměrů tak znamená, že pasta se lehce dostane z apertury a nebude se trhat. Pro kvalitní a spolehlivý tisk se používá poměr rozměrů 1,5. Tato hodnota vychází z normy IPC 7525. V praxi je nutné vyvážit oba tyto zmíněné poměry k dosažení optimální aplikace pájecí pasty na DPS. Pokud jsou tyto poměry příliš malé, nepřenese se dostatečné množství pasty a součástka nebude kvalitně zapájena. [1][29][28][27]

3.1.3 Čištění šablony

Čistá šablona je základ pro kvalitní a bezproblémový tisk pájecí pasty. Mělo by se tak čištění provádět pravidelně. Frekvence čištění závisí na intenzitě používání šablon, typu použití pájecí pasty a také na požadavcích zákazníka. Manuálnímu čištění šablon se velké firmy snaží vyhýbat. Vznikají zde rizika poškození šablony nebo zde také působí lidský faktor, takže se nelze spolehnout, že by vždy byla šablona perfektně vyčištěna. Proto se nejčastěji používají ultrazvukové čističky nebo speciální myčky, jaké se používají i na oplach a finální čištění DPS, ovšem s jinou čistící kapalinou, protože u DPS je nutné odstranit tavidlové zbytky. Důležité je vybrání vhodné čistící kapaliny, aby nedošlo například k poškození povrchové úpravy šablony. Vhodné je řídit se doporučením výrobce. Velmi důležitá je také následná kontrola apertur pod mikroskopem, aby došlo k ujištění, že se zde nenachází zbytky pájecí pasty nebo jestli nejsou apertury poškozené. Poslední část procesu je samotné uskladnění. Šablony by měly být uskladněny ve speciálních obalech, aby nedocházelo k jejich znečištění. [1][29][28][27]



Obrázek 3.3 Čištění šablony při tisku pájecí pasty [32]

3.2 Electro forming

Šablony vyrobené technologií elektroformování (EF) obsahují čistý nikl. Proces výroby šablon začíná nanesením vrstvy fotorezistu na nosný substrát. Fotorezist je velmi citlivý na teplo a také vlhkost, tu je nutné v procesu kontrolovat. Po vytvrzení fotorezistu v místech budoucí apertury, je možné ponořit nosný substrát do lázně, kde budou postupně růst jednotlivé vrstvy budoucí šablony. Jednotná tloušťka šablony vyžaduje, aby elektrochemický proces probíhal ve všech místech šablony stejně. Jedině tak bude docíleno stejné tloušťky po celé ploše šablony. Toho je velice těžké docílit, obzvlášť

pokud se hustota apertur na celé šabloně liší. Růst niklu v okolí apertur je rychlejší, což má za následek vznik nepatrných hrází kolem apertur. Tyto hráze jsou dále využity jako těsnění mezi ploškou a šablonou. Pokud ovšem nejsou tyto hráze dobře zarovnané nebo dojde k jejich poškození, dochází pak k úniku pasty. To může vést k defektu solder balling. Celkově musí být proces dobře kontrolován, aby ho bylo možné zastavit ve chvíli, kdy šablona doroste požadované tloušťky. Poté musí být odejmuta ze substrátu, aniž by došlo k jejímu poškození. [40][41][42]

3.3 Kritické faktory při výrobě šablon

Při technologii řezání pomocí laseru jsou šablony napínány v jednom směru a už při řezání jsou upevněny v držáku, proto zde nevzniká dodatečně žádná odchylka. Pokud je šablona z nerezové oceli o tloušťce 125 μm vyrobena bez jakéhokoliv napětí, a poté je umístěna do držáku, začne na šablonu působit napětí o síle okolo 35 N/cm, a tak se deformuje v ose tohoto napětí o 0,0131 %. Pro velké šablony (0,5 m) to pak znamená chybu až 65 μm . [40][41][42]

Jeden z dalších faktorů, co ovlivňují výrobu šablon je teplota. Většina výrobců se snaží mít stabilní teplotu v prostorech výroby okolo 20 °C, ale často tato teplota kolísá až o 5 °C a je vhodné s těmito změnami počítat. Součinitel tepelné roztažnosti oceli je okolo 17 ppm/°C a u niklu 13 ppm/°C. To znamená, že se např. ocel roztáhne nebo smrští o 17 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ na jeden délkový metr materiálu. Pokud je tedy šablona o rozměru 0,5 m a rozdíl mezi teplotou, při které byla šablona vyráběna, a teplotou v prostředí, kde se používá je 5 °C, tak celkový rozdíl v rozměru šablony může být až 42 μm . Zatím co u niklové šablony by to bylo pouze 32 μm . Při technologii výroby šablony pomocí laseru vzniká v okolí řezu lokální zvýšení teploty, v lepším případě se pouze dostaví změna barvy, v horším dochází k deformaci materiálu v důsledku lokální expanze. Tomuto defektu lze předejít vhodným chlazením kovu, proudícím vzduchem nebo kapalinou. [40][41][42]

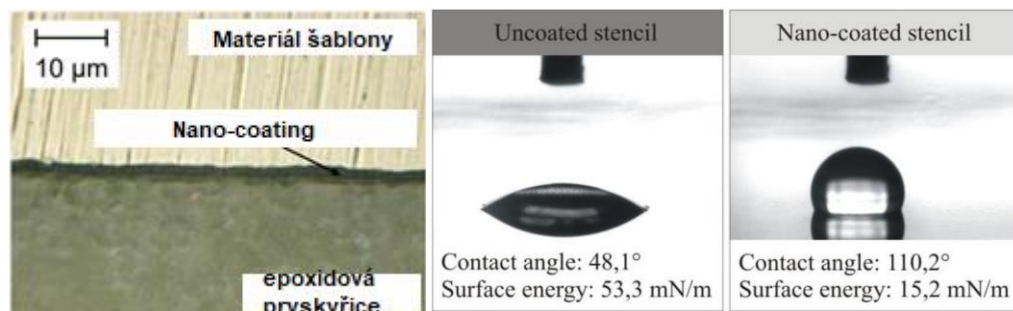
4. POVRCHOVÉ ÚPRAVY ŠABLON

Pro zdokonalení povrchů zhotovených šablon je nutné zvolit jednu z povrchových úprav. Šablony bez povrchové úpravy by způsobovaly řadu defektů a negativně by tak ovlivnily celý výrobní proces. U menších apertur by šablona nedokázala přenést téměř žádnou pastu. Následující kapitoly se budou věnovat povrchové úpravě pomocí Elektro-polishingu, Plasma-polishingu a Nano-coatingu.

4.1 Nano-coating

Nový typ povrchové úpravy šablon pro tisk pájecí pasty byl vynalezen zejména kvůli potřebě eliminace zachytávající se pasty v aperturách a na spodní straně šablony. Díky nano povlaku, který se aplikuje ze spodní strany a na hrany apertur šablony, je možné minimalizovat zbytky pasty, které by následně negativně ovlivňovaly kvalitu výroby. Díky snížení povrchového napětí šablony se výrazně snižuje adheze mezi pájecí patou a šablonou. Cílem této úpravy je maximalizování kvality tisku pájecí pasty. [21]

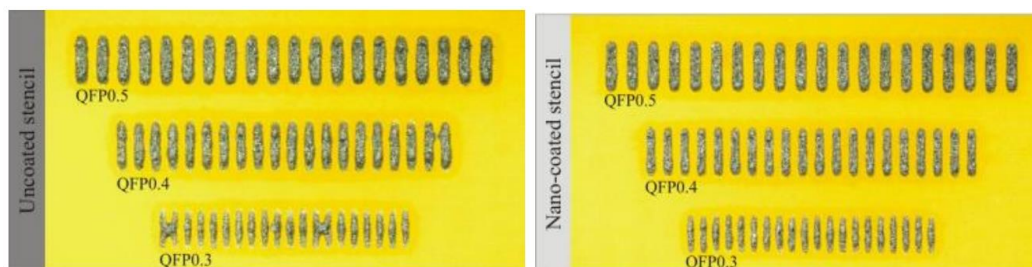
Výroba šablony s nano povrchem začíná důkladným čišťením vyhotovené šablony pomocí vody a alkoholu. Dále je programem na speciálním zařízení aplikován nástrík gelovitěho nano povlaku. Aplikovaná vrstva musí být homogenní. Celý proces musí být precizně kontrolován, aby výsledná vrstva byla perfektní. V dalším kroku se kontrolovaně odpařují rozpouštědla a probíhá vytvrzení vrstvy. Výsledný nano povlak má hydrofobní vlastnosti a celková tloušťka se pohybuje 1-2 μm . [21]



Obrázek 4.1 Aplikovaný nano povlak [21]

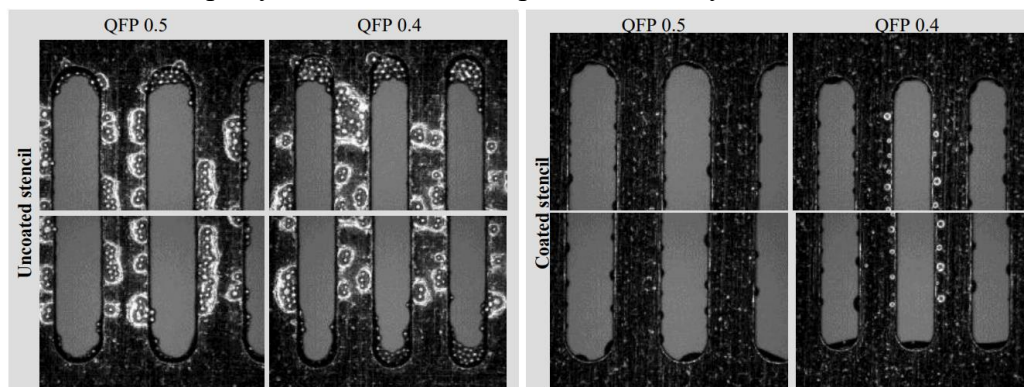
Na Obrázek 4.1 vlevo je možné vidět aplikovaný nano povlak, vzorek je zalitý v epoxidu a obrázek byl vytvořen pomocí SEM mikroskopu. Na zbývajících dvou obrázcích je vidět výsledek měření kontaktního úhlu mezi šablonou a kapkou vody. Z měření vyplývá, že povrch s nano povlakem má výrazně nižší povrchovou energii. Proto platí, že čím nižší energie povrchu je, tím snadněji projde pasta apertury. Teoreticky se toto měření může provádět přímo v dané firmě a lze tak kontrolovat kvalitu nano

povlaku. Nutné je ale vzít v potaz, že kritické jsou právě místa okolo apertur. Tam se toto měření provádět nedá nebo je to velmi obtížné a těžko replikovatelné. [21]



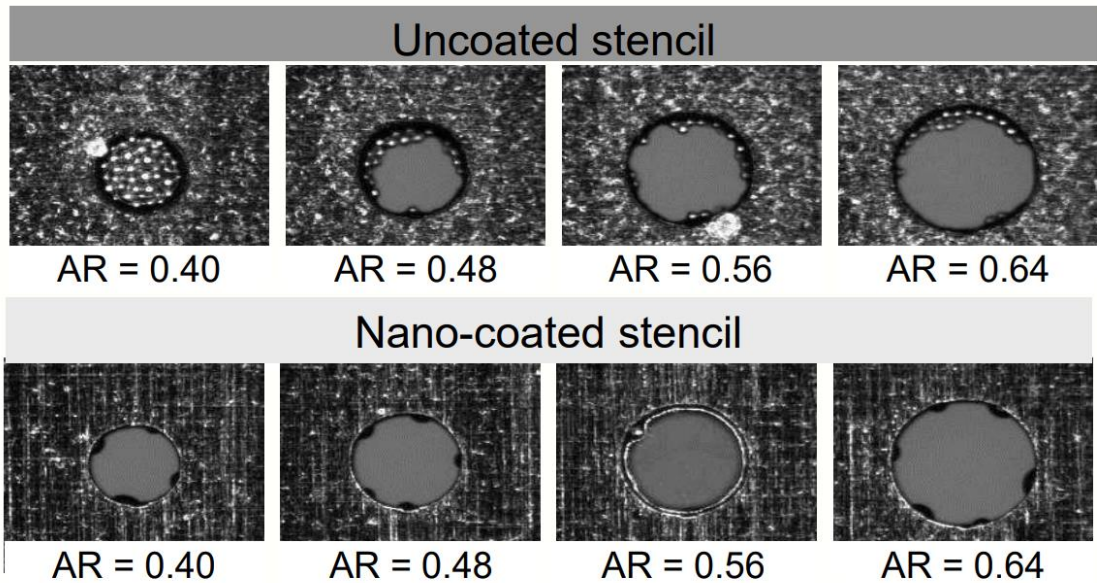
Obrázek 4.2 Výsledky po pátem tisku pájecí pasty [21]

Pokud projdeme analýzu, kterou provedla firma LaserJob, je možné vidět poměrně velké rozdíly v tisku pasty na povrch s úpravou a bez - viz. Obrázek 4.2. Na obrázku je možné vidět zkušební test pro různé rozměry roztečí mezi součástky QFP 0,3 - 0,5 a jedná se o 5. tisk bez čištění šablony. Na obrázku jsou vidět bridge, neboli zkratky mezi ploškami s nejmenší roztečí. Důvodem pro tento defekt je takzvané podmazávání šablony, kde při oddělení dojde k zachycení pasty na spodní straně šablony. Tento nános pak brání správnému nanesení pasty na další DPS, a to pak následně vytvoří zkrat. [21]



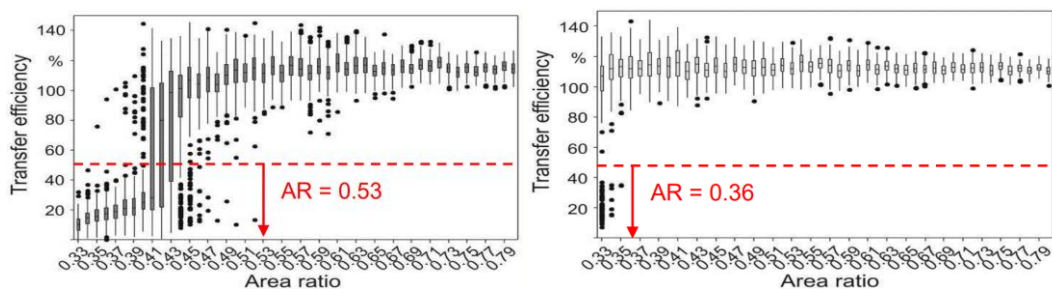
Obrázek 4.3 Výsledky po pátem tisku pájecí pasty s šablonou bez povrchové úpravy a s šablonou s nano povlakem [21]

Na Obrázek 4.3 je možné vidět, že šablona bez povrchové úpravy je velmi zanesena kuličkami pájecí pasty. Je zde možné vidět větší zanesení právě u užší apertury, kde dochází k vysoké adhezi a pasta má větší tendenci ucpat okraje této apertury, kde je adheze největší. Pastu je také možné vidět ze spodní strany šablony. To bylo také zvoleno za příčinu vzniku zkratů na Obrázek 4.2. Na šabloně s povrchovou úpravou není vidět žádná zachycená kulička pájky, reprezentuje tak ideální stav. Tento problém lze samozřejmě částečně eliminovat čištěním šablony po každém tisku, ale to drasticky prodlouží čas výroby, nehledě na to, že kuličky pájecí slitiny uvnitř apertur nebudou odstraněny. [21]



Obrázek 4.4 Porovnání tisku pájecí pasty T4 na šablonách s povrchovou úpravou a bez povrchové úpravy (motiv BGA) [21]

Na Obrázek 4.4 je možné vidět výsledek testu tisku pájecí pasty T4 na šabloně s nano povlakem a bez nano povlaku, a to pro různou velikost apertur. Na Obrázek 4.4 je opět vidět záchyt kuliček pájecí slitiny na okrajích šablony bez povrchové úpravy, kde pro AR 0,4 dochází ke kompletnímu ucpání a na ploškách už nebude dostatek pájecí pasty pro kvalitní zapájení tak komplexní a drahé součástky jako jsou BGA pouzdra. Na šabloně s nano povlakem nezůstávají žádné kuličky pájecí slitiny. Je tak přenesen přesně potřebný objem pasty na danou pájecí plošku, a to i v případě AR (area ratio) 0,4. Z toho tedy vychází že šablona bez povrchové úpravy s kruhovými apertury menším poměrem než AR 0,5 není vhodná pro bezproblémový kvalitní tisk. [21]



Obrázek 4.5 Porovnání tisku pájecí pasty T3 a T4 na šablonách s povrchovou úpravou a bez povrchové úpravy (motiv BGA) [21]

Na Obrázek 4.5 jsou dva grafy, které vyobrazují závislost efektivity přenosu pájecí pasty na velikosti apertur. Vlevo je graf pro šablonu bez povrchové úpravy a vpravo graf pro šablonu s nano povlakem. Na grafu s šablonou bez povrchové úpravy je vidět, že od

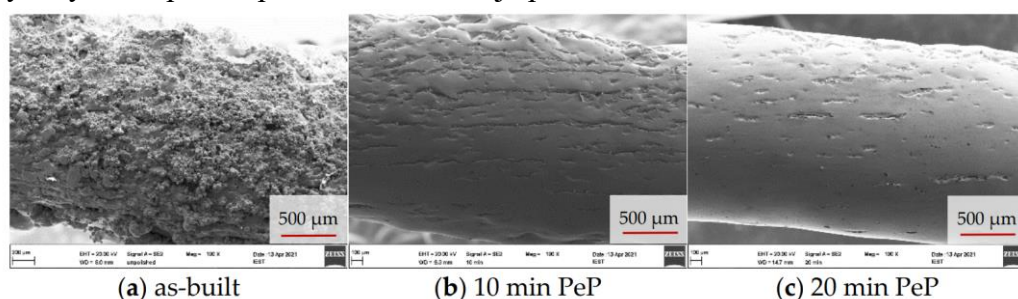
poměru AR 0,53 již nedochází k dostatečnému přenosu pájecí pasty (pod 50 %). Naopak pro graf šablony s nano povlakem je vidět, že přenos pájecí pasty není problém v podstatě až do poměru AR 0,36. [21]

Povrchová úprava nano povlakem se v současné době široce používá při výrobě šablon pro tisk pájecích past. Její hydrofobní povrch dokáže velice účinně snížit přilnavost pasty ke spodní straně šablony a jednotlivým stranám apertur. Nedochází tak ke znečištění šablony a na pájecí plošku je aplikován přesně požadovaný objem pájecí pasty. Dále není nutné provádět tak časté čištění šablony a to celkově zrychlí celý výrobní proces. Redukce defektů při malých aperturách. Jedna z nevýhod je samotná cena, jelikož v porovnání s ostatními technologiemi povrchových úprav je tato nejdražší. Dále je nutné brát v potaz, že tento nano povlak má nižší životnost než jiné povrchové úpravy, ta se odvíjí od samotného nastavení tisku a taky přípravky užívané pro mytí šablon. Z toho vyplývá, že je tato povrchová úprava vhodná zejména pro hustě osazené DPS součástky s malými roztečemi jako jsou BGA pouzdra. [21]

4.2 Plasma-coating

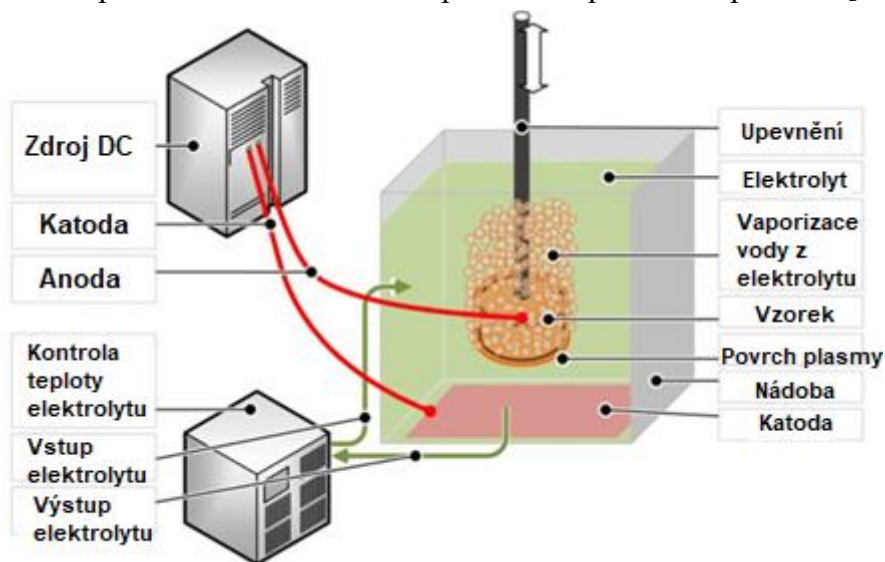
Úprava povrchů pomocí plasmu je velmi inovativní technologie. Díky této úpravě je výsledný povrch hladký a lesklý a má také anti korozivní schopnost. Tento proces kombinuje aspekty klasické elektrolýzy a plasmové elektrolýzy. U klasické elektrolýzy se procesy dělí na anodické a katodické. Anodické procesy zahrnují oxidaci a rozpuštění, zatímco katodické procesy redukci. Při tomto procesu probíhá několik procesů zároveň a další související jevy s plazmatem jako je kataforéza, neboli pohyb nabitých částic v kapalině pod vlivem elektrického pole, plazmochemické reakce a difúze. [23]

PeP (Plasma Electrolytic Polishing) v podstatě jde primárně o rozpouštění anody za účelem leptání nebo leštění. V našem případě je možné si představit šablonu, která byla vyřezána laserem, byla očištěna a vložena do tohoto zařízení, kde v obvodu představuje anodu, u které proběhne leštění, respektive leptání. Tento proces je vhodný pro opracování jakéhokoliv dílu s různými tvary. Hlavní podmínka je, že předmět musí být vodivý, aby mohl proces proběhnout. Proto je proces velmi univerzální a efektivní. [23]



Obrázek 4.6 Povrch pružiny v různých stadiích úpravy povrchu pomocí PeP [22]

Velmi kladným aspektem je použití elektrolytů na bázi vody, které jsou velmi šetrné k životnímu prostředí. Účinnost této úpravy vede k vytvoření velmi hladkých povrchů a dosahuje hodnot drsnosti $R_a < 0,02 \mu\text{m}$. Tato hodnota je pro úpravu povrchu šablon pro tisk pájecí pasty dostačující. Jedna z dalších výhod je kontrolovatelnost tohoto procesu, je možné ho velmi přesně nastavit na základě požadavků pro finální produkt. [23]



Obrázek 4.7 Zařízení pro úpravu povrchu pomocí plasmy [23]

Elektrolyt má nízkou viskozitu a je specifický pro daný materiál, jeho vodivost je upravována pomocí přidání různých typů solí. Procesní okno se upravuje pomocí proudové hustoty a napětí. Kolem upravovaného předmětu se vytvoří pára a na povrchu se vytvoří plasma, tím začne proces leptání povrchu, rozpouštění oxidů, tvoří se zde také vodík. Plasma reaguje a vytváří ionizaci páry okolo vzorku a dochází k hydrotermální reakci, rozpouštění kovů, tím se odstraní všechny nerovnosti na povrchu vzorku. Velká výhoda je nízká teplota této páry okolo vzorku, která nepřekročí teplotu varu elektrolytu, a proto dosáhne vzorek maximální teploty okolo $120 \text{ }^\circ\text{C}$. V závěru procesu je nutné vzorek očistit a osušit. [23]

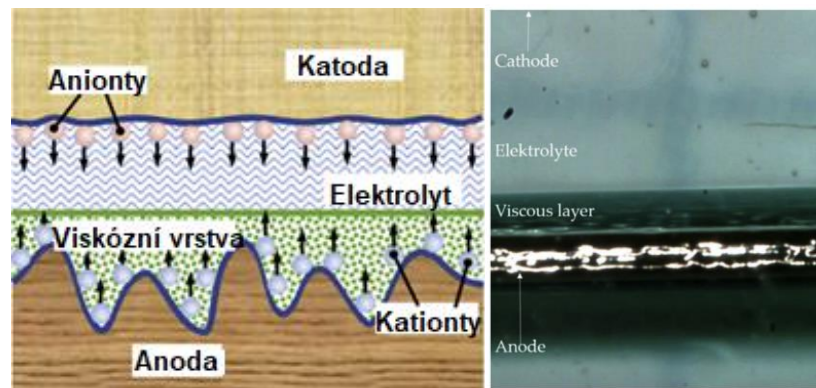
Tento proces lze aplikovat pouze na vodivé vzorky. Tato metoda je vhodná pouze na finální vyhlazování povrchu. Pokud by byl povrch příliš drsný nebo obsahoval ořepy v povrchu (například od vrtání), není tato metoda vhodná, jelikož by nedošlo k odstranění těchto nerovností, ale došlo by k jejich zaoblení a následně ke ztrátě přesnosti. [23]

Jedna z výhod této úpravy spočívá v tom, že není nutné vzorek čistit nebo dalším způsobem chemicky upravovat. Všechny nežádoucí nečistoty jsou odstraněny během procesu. Proces je poměrně rychlý v závislosti na požadované drsnosti povrchu vzorku.[23]

4.3 Electro-polishing

Electro-polishing (EP) – elektrické leštění, známé i jako Electro-chemical polishing (elektrochemické leštění) je jedna z dalších možností povrchových úprav šablon pro tisk pájecí pasty. Tento proces odstraňuje materiál z kovu nebo slitiny na základě anodického rozpouštění – iont po iontu. Tento princip byl objeven již v roce 1833 Michaelem Faradayem, kdy byly stanoveny zákony elektrolýzy, ze kterých se staly základy pro metody jako je elektro depozice a leptání. Tato metoda je unikátní tím, že je bezkontaktní.

Celý proces začíná ponořením vzorku do lázně s elektrolytem s řízenou teplotou. Vzorek je zapojen na kladný pól a slouží jako anoda. Záporný pól je připojen k elektrodě (katodě). Proud prochází z anody, kde se povrch vzorku rozpouští v elektrolytu a putuje ke katodě, kde dochází k redukci a ta produkuje vodík. Každá vyloučená molekula přijme z katody (odevzdá anodě) několik elektronů. Elektrolyt je nejčastěji kyselé medium s vysokou viskozitou, jako například kyselina fosforečná a kyselina sírová. Elektrolyt mezi jednotlivými elektrodami neustále proudí, pomáhá tak odstranit rozpuštěný materiál a také snižuje Jouleho teplo způsobené rezistivitou elektrolytu. Tato technologie je velice vhodná pro vzorky s velmi nepravidelným a komplexním povrchem, jako jsou například šablony pro tisk, kde je nemožné apertury leštit mechanickým způsobem. Množství odleptaného materiálu závisí na materiálu vzorku, složení elektrolytu, trvání procesu, teplotě elektrolytu a napětí zdroje. [26][43]



Obrázek 4.8 Schematický diagram viskózního filmu, vrstva viskózního filmu přichycena na anodě [24][25]

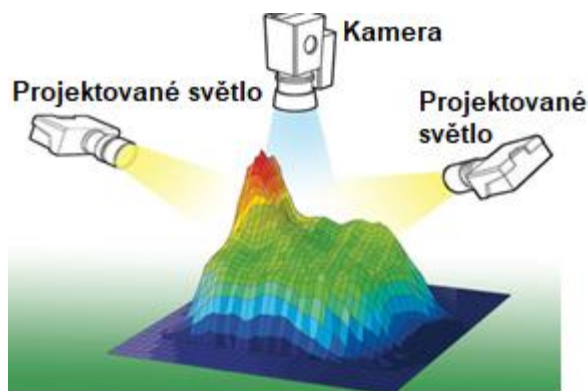
Jedna z teorií, která popisuje tento leptací mechanismus je teorie viskózního filmu od pana Jacqueta. V této teorii je popsáno, že při procesu EP se na povrchu vzorku tvoří tenký film. Tento film má vysoký elektrický odpor, který snižuje proudovou hustotu, a tím pádem i rychlost leptání materiálu. Díky tomu, že vzorek má nerovný povrch, je tohoto filmu více v pomyslných prohlubních, což znamená, že je zde i větší rezistivita a materiál se leptá pomaleji. Ovšem na vrcholcích těchto nerovností je film tenký, a tak se materiál leptá rychleji. To má ve výsledku daný efekt leštění.[24] [43]

5. KONTROLA DEFEKTŮ

Výrobní proces je nutný kontrolovat a proto nestačí pouze jedno zařízení na konci výrobní linky. Pro zmenšení škod je zařízení hned několik. Každé zařízení má svůj speciální úkol a snaží se odhalit co nejvíce defektů v průběhu celé výroby. Z naměřených dat je možné provést optimalizaci a změnu nastavení jednotlivých zařízení nebo technologií. Tyto zařízení šetří finance firmě a také chrání její dobré jméno, jelikož zaručují, že se k zákazníkovi nedostanou nekvalitní nebo nefunkční kusy. Jedná se o kontrolu nanesení pájecí pasty, optickou inspekci zapájených součástek a rentgen pro BGA. Těmto zařízením se bude věnovat tato kapitola. [1][7]

5.1 SPI – Kontrola nanesení pasty

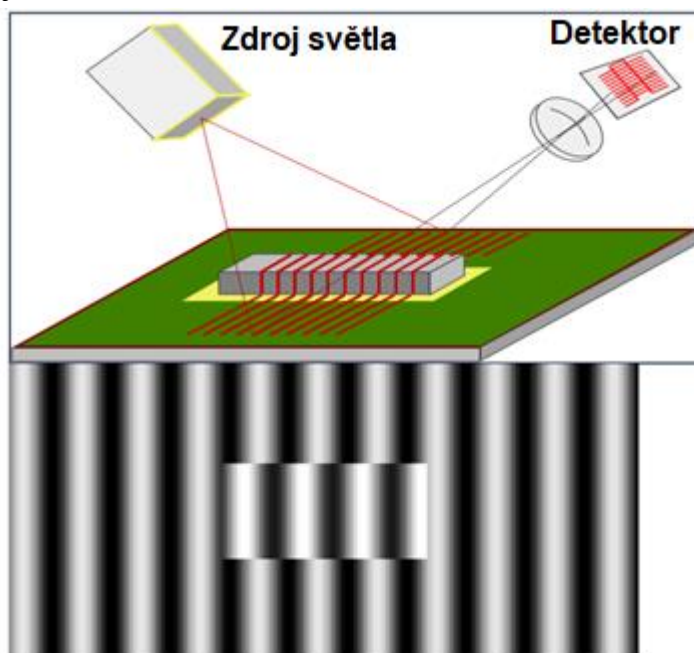
Šablonový tisk je první velmi kritický element v procesu výroby. Podle různých statistik až 60 % defektů vzniká právě nesprávným nanášením pájecí pasty. Z toho důvodu je vhodné tyto potencionální chyby odhalit a minimalizovat tak ztráty. Proto se používá Solder paste inspection (SPI), neboli kontrola nanesení pájecí pasty. Tato metoda, respektive stroj, nerozpozná pouze chybu v objemu pasty, ale také tvarovou deformaci. Jako první se rekonstruuje 3D model objektu pasty pomocí profilometrie s fázovým posuvem. Výsledný zrekonstruovaný 3D objekt je rozdělen do několika oblastí pomocí geometrické segmentace, výsledek zahrnuje hrany a horní povrch. Je vybráno několik poznávacích rysů pro každou oblast a ty jsou analyzovány. Jednotlivé výsledky jsou pak sloučeny do modelu k porovnání s referenčním výsledkem. Kontrola pájecí pasty obecně vyžaduje 3D rekonstrukci bloků pájecí pasty. Detekce defektů je pak založena na měření několika parametrů, které mají za cíl klasifikaci cílů bez vad a s vadami. Tyto parametry jsou obvykle plocha, objem, centroid a výškové odchylky. [1] [7] [8] [9] [10]



Obrázek 5.1 Ilustrační obrázek funkce SPI [39]

5.1.1 Fázová profilometrie

Fázová profilometrie (PSP) je technika Moiré projekce pro měření 3D tvarů. Při fázové profilometrii se na objekt (pájecí pastu) promítá periodický vzor a sleduje se kamerou pod známým úhlem. Projektor promítá vzor pruhů na objekt. Když je promítaný vzor pozorován z určitého úhlu, rozdíly ve výšce povrchu způsobují posuny v pruhovém vzoru. Intenzita se sinusoidálně mění, což umožňuje charakterizaci těchto posunů jako fázové posuny. Velikost posunů je přímou geometrickou funkcí rozdílu ve výšce povrchu a úhlu mezi projekčním zařízením a detektorem (kamerou). Sofistikované techniky zpracování obrazu mohou velmi přesně měřit posuny k vytvoření přesného 3D modelu téměř jakéhokoli objektu. [1] [7] [8] [9] [10]



Obrázek 5.2 Princip fázové profilometrie [3]

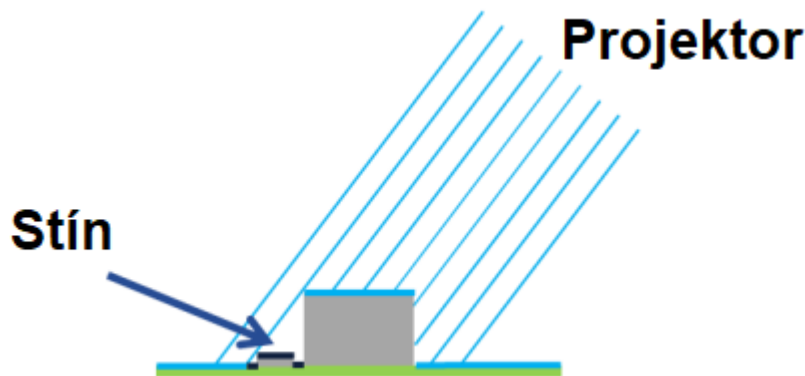
Všechny systémy SPI mají svá specifická omezení. Některé z těchto omezení jsou dané samotnou povahou měřicí techniky, zatímco jiné se týkají především měření DPS. Patří sem například potřeba zabezpečit kvalitní měření nízkých komponent hned vedle těch vysokých, eliminace chyb měření způsobených odrazy mezi součástmi a samozřejmě nechybí požadavky na vysokou rychlost měření, aby výrobní linka nebyla brzděna.

Nejzásadnější u této metody je stanovení absolutní referenční hodnoty pro nespojitě čáry a praktickým kompromisem mezi rozsahem a citlivostí. Všechny generované čáry jsou identické. Nespojitě čáry, které jsou na objektu na Obrázek 5.2, mohou být posunuty odhadem o $1/3$, ale také mohou být posunuty o jednu celou čáru a $1/3$ tedy 1 a $1/3$. Prakticky lze tento problém řešit omezením maximální výšky kontrolovaných objektů, tak aby byl vždy posun čar menší než jedna celá čára. V případě DPS (nebo jakéhokoli objektu na kontrolované ploše) je povrch desky snadno rozpoznatelnou referenční

rovinou a lze tedy předpokládat, že všechny součásti vystupují nad tuto plochu. Všechny pozorované posuny lze předpokládat jako frakční a měří se vzhledem k nejbližší čáře ve směru povrchu desky. Omezení rozsahu měření na méně než jeden cyklus je velmi omezující. Rozsah lze zvýšit snížením frekvence čárového vzoru, ale tím se pak sníží citlivost měření, jelikož by byly špatně rozpoznatelné malé objekty. Řešení je takové, že většina SPI používají několik frekvencí ke generování těchto čar. Nízké frekvence slouží ke stanovení absolutní výšky a vyšší frekvence slouží k detailnímu a přesnějšímu měření. [1] [7] [8] [9] [10]

5.1.2 Stínění velkými součástkami

Problematika stínění je zde vyřešena přidáním počtu projektorů, kde každý osvětluje DPS z jiného úhlu – zpravidla po 90°. Každý z těchto projektorů používá různou frekvenci. Z výsledných snímků, kterých může být až 20, se udělá vyhodnocení. Je tak docíleno získání kvalitních dat, ovšem na úkor rychlosti. [3]



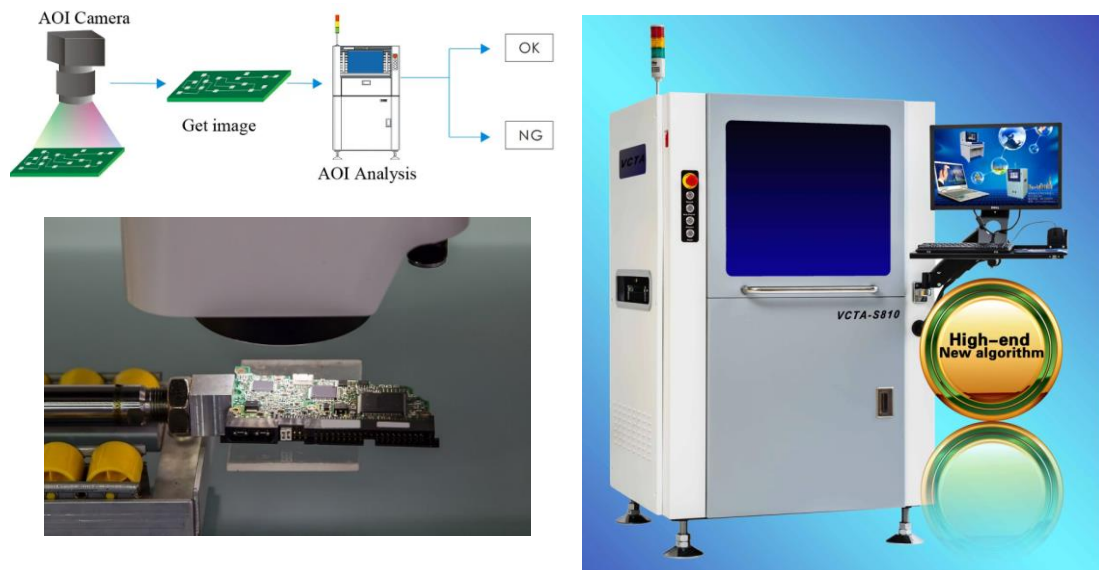
Obrázek 5.3 Stínění součástek SPI [3]

5.2 AOI – Automatická optická inspekce

Automatická optická kontrola, neboli AOI (Automated optical inspection), vznikla kvůli tomu, aby zvýšila kvalitu a zrychlila proces kontroly DPS. Tento pokrok byl umožněn díky příchodu vysoce kontrastní optiky a relativně levnými výkonnými počítači. AOI se zatím nemůže rovnat svou inteligencí se zkušeným pozorovatelem, ale za to je extrémně výkonné, dokáže zkontrolovat celou DPS za několik sekund. Kontroluje každou plošku, každou součástku, její polaritu a hodnotu. Všechny tyto výsledky jsou uloženy na server, kde je možné s daty dále pracovat. Další nesmírná výhoda je kontinuita provozu. Stroj zaručí stále stejné kvalitní výsledky po celou dobu provozu. Stroj také nezapomíná, vždy je daná pozice defektu uložena i v případě, že jich je mnoho. Na rozdíl od pracovníka, který se může lehce unavit nebo rozptýlit. Nevýhodou ruční kontroly je také subjektivní způsob hledání defektů. Jedno z prvních AOI bylo použito ve vojenském průmyslu okolo

roku 1890. [1] [11] [12] [13] [14]

Na počátku 70. let 20. století byly vyvinuty snímače CCD (Charge coupled device) a CMOS (Complementary metal oxide semiconductor), součástky pro snímání obrazové informace, tím se otevřela možnost zachycení snímků digitální cestou, které se pak mohou dále zpracovávat a vyhodnocovat počítačem. Zrodilo se tak takzvané strojové vidění. S těmito technologiemi přišlo i AOI, to využívá dvě metody pro snímání obrazu FOI (Field of interest) založená na maticových kamerách. Tato metoda zaznamenává několik obrazů na optimalizované trase a je vhodná pro úkoly, ve kterých je důležitá inspekce komponent a menisku pájky. Line scan kamery, tato metoda skenuje celý povrch tištěné desky spojů (PWB) kontinuální linií. Je rychlejší, ale je náročné dosáhnout správného osvětlení, zejména když poloha komponent ovlivňuje kvalitu osvětlení. [1] [11] [12] [13] [14]



Obrázek 5.4 Automatická optická inspekce [4]

5.2.1 Inline AOI

Inline AOI je zařízení umístěné přímo na výrobní lince a je s ostatními částmi propojeno pomocí dopravníku. Zpravidla bývá předposlední, jelikož poslední je vždy buffer (zařízení pro uskladnění DPS pomocí dopravníku), ve kterém jsou zásobníky, do kterých se třídí DPS podle verdiktu AOI (OK, NG). [1] [11] [12] [13] [14]

5.2.2 Offline AOI

Největší rozdíl spočívá v samotné integraci zařízení, AOI funguje mimo výrobní linku. Často bývá umístěno poblíž oddělení oprav, kde mohou jednotlivé týmy lépe komunikovat, aby byly například vyladěny programy pro detekci. Také je zde menší hluk, což operátoři vždy ocení.

5.2.3 2D AOI

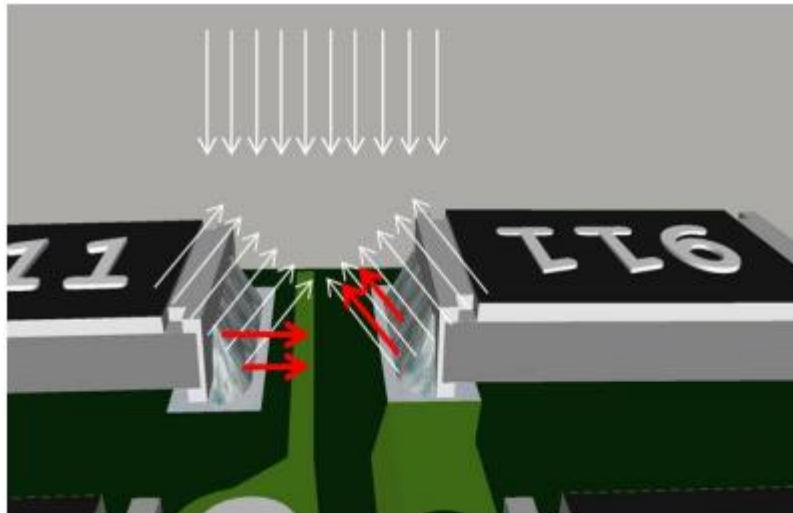
Na počátku vývoje AOI se používal pouze 2D způsob kontroly DPS. Byl pořízen velmi kvalitní snímek DPS. Deska byla rozdělena do několika úseku podle kvality rozlišení kamery. Tyto úseky byly vyfoceny, aby mohla být detailně porovnáno například nevzlínání pájky u jednotlivých kontaktů součástky. Principiálně fungoval tento způsob na porovnávání barev v konkrétních bodech, respektive oblastí předem definovaných v programu. Systém porovnával barvy v těchto úsecích s DPS, která byla nafocena jako referenční, vzorová bez závad. Tento způsob kontroly byl velmi složitý na nastavení a u složitějších DPS zobrazoval desítky falešných chyb. Relativně vhodné řešení může být pro kontrolu výroby malých sérií, kde vytvoření programu je daleko rychlejší ve srovnání s programem na 3D AOI. [1] [11] [12] [13] [14]

5.2.4 3D AOI

AOI má možnost oproti 2D AOI kontrolovat i výšku jednotlivých součástek a pájky. Dochází tak k velkému posunu v možnostech kontroly, ale i samotné kvality kontroly. Kvalitně vytvořený program zobrazuje minimum falešných chyb, šetří tak čas obsluhy. Díky rozšířeným možnostem lze kontrolovat nové defekty, a to je cesta k jejich odstranění. Stroje tak kombinují klasický 2D sken povrchu pomocí kamery, ale také laserové skenování nebo již zmíněnou fázovou profilometrii. Tyto nové techniky umožňují vytvoření 3D modelu DPS. Následně jsou opět naměřené hodnoty porovnány s referenčními a dojde k vyhodnocení. Nové AOI často disponují různými programy na vyhodnocení získaných dat a vedení důležitých statistik, podle kterých je opět možné výrobní proces vylepšovat. Po zvážení všech nových možností už většina firem přešla na novou generaci 3D AOI, protože kvalita a efektivita jsou pro ně klíčové. [1] [11] [12] [13] [14]

5.2.5 Odrazy mezi komponenty

Další výzva, která musela být vyřešena, je vznik odrazů mezi součástkami a lesklými povrchy na DPS. Tyto odrazy zkreslují 3D měření. Hotové DPS, které jsou kontrolovány, obsahují poměrně velké množství komponentů, od kterých se může signál odrazit (např. lesklý povrch pájky, povrch součástek, prokovy). Tyto odrazy se pak mohou dostat až do detektoru, který tento odraz vyhodnotí a vznikne problém. Tento problém často vzniká u pájených spojů, které jsou velmi blízko u sebe. [1] [11] [12] [13] [14]



Obrázek 5.5 Odrazy světla na DPS při skenování [3]

5.2.6 Benefity AOI

Jedna z největších výhod je celkové zvýšení výtěžnosti celé produkce, snížení počtu scrapů (DPS určené k likvidaci) DPS, zvýšení kapacity výroby, jelikož chyby jsou odhaleny dříve a DPS neprochází zbytečně celým procesem. Hlavní ukazatel efektivity výroby je výtěžnost neboli FPY (poměr DPS které projdou bez nutnosti oprav ku celkovému počtu DPS), kde vyšší výtěžnost znamená vyšší počet použitelných DPS. AOI také bezpochyby zvyšuje celkovou spolehlivost DPS, a tak i jejich životnost. Snížením množství scrapů se zvyšuje ekologický dopad výroby na svět. [1] [11] [12] [13] [14]

5.3 X-ray

Pro kontrolu BGA (Ball grid array) a QFN (Quad flat no-lead package) součástek není možné použít AOI, protože vývody jsou umístěny na spodní straně pouzdra. Z tohoto důvodu bylo nutné kontrolovat správnost zapájení pomocí rentgenového záření. Není tak nutné součástku elektricky testovat, jak tomu bylo před tímto vývojem. Navíc s přechodem na bezolovnaté pájení, potřeba monitorovat kvalitu zapájení čím dál menších součástek rapidně stoupla. Díky velkému nárustu těchto pouzder, které mají velmi malé rozestupy mezi jednotlivými kontakty, byl vytvořen tlak na výrobce k vytvoření rentgenů vyhovujících nárokům průmyslu takové, jaké se používají aktuálně dnes. Z počátku výrobci přecházeli z uzavřených rentgenových trubic na otevřené s daleko vyšším výkonem, zvětšením a rozlišením. Dalším pokrokem byla možnost zkoumání vzorků pod úhlem, to má pro kontrolu BGA a dalších pouzder velký význam. Protože pokud je aplikován rentgenový paprsek přímo shora, tvar kuličky je částečně skrytý. Nejdříve vývoj přišel s možností naklánění vzorku a rentgenová trubice a detektor zůstávaly pevné. Nejnovější zařízení jsou ale konstruované s pevným vzorkem a posouvá

se pouze s detektorem. Tak je zaručena bezpečnost vzorku a nedojde k jeho poškození. Díky tomu, že je vzorek velmi blízko k rentgenové trubici, je možné použít vysoké zvětšení a skvělý kontrast. Detektor, který zachytí záření, je zobrazí v různých odstínech šedi v závislosti na intenzitě záření. Hustší nebo silnější materiály a oblasti se na digitálním rentgenovém snímku obvykle zobrazí tmavší (např. kovy). Tenčí a méně husté oblasti se zobrazí světlejší (např. materiály jako plast). Vznikne tak známý rentgenový snímek, který lze následně zobrazit, digitálně zpracovat a vyhodnotit. [1] [15] [16] [17] [18]



Obrázek 5.6 X-ray Nordson [6]

5.3.1 In-line x off-line

Rentgenové systémy se opět vyrábí v několika variantách, in-line a off-line. In-line rentgenové zařízení je nejkomplexnější řešení automatické kontroly DPS. Zařízení je umístěno na konci výrobní linky, se kterou je propojeno pomocí dopravníkového systému. Špičkoví výrobci mají celý proces natolik automatizovaný, že není nutné obsluhy. Zařízení si pomocí čidel a dopravníků samo nabírá DPS a následně je třídí do daných zásobníků podle výsledku inspekce. Následně jsou DPS označené jako NG (DPS nevyhovující nějakému z nastavených limitů pro hledání defektů) přesunuty na stanoviště opravy, kde má pracovník k dispozici digitální snímky defektu a další důležité informace. Poté pracovník provede podle interních postupů opravu daného defektu a znovu zkontroluje opravený defekt na rentgenu. Rentgenové zařízení už nemusí být tak výkonné a automatizované, protože pracovník už je obeznámen, kde se daný defekt nachází

a kontroluje pouze tento konkrétní. Firma tak zde může ušetřit finance.

Off-line rentgenová zařízení zpravidla disponují pouze manuálním hledáním defektů v rámci úspory ceny. Jsou vhodná pro malé série, kde není nutné překontrolovat tisíce DPS. U tohoto typu je nutná zaškolená obsluha, která bude přístroj ovládat, manuálně najde kontrolované součástky, vyhodnotí danou situaci a podle svých zkušeností rozhodne, jestli se jedná o defekt nebo ne. Následně danou DPS vyjme a uskladní ji do příslušného zásobníku. Tento proces se nejvíce liší v subjektivitě hodnocení daných snímků. Proces tak není vždy stejný a nedá se jednoduše replikovat. Kvalita vyhodnocení tak velmi záleží na zkušenostech daného operátora. [1] [15] [16] [17] [18]

6. PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část diplomové práce by byla rozdělena do čtyřech hlavních bodů. První se věnuje porovnáním dat z SPI a AOI pro dvě různé povrchové úpravy šablon. Firmou byly objednány dvě šablony s úpravou povrchu plasma-coatingem a electro-polishingem. Na těchto šablonách běžela výroba jednotlivých DPS, díky tomu budou zpracovány aktuální data přímo z výroby. Jedním z cílů, které si firma stanovila je následné zjištění finanční návratnosti, protože každá z těchto technologií vyžaduje jinou finanční investici. Technologové tak budou mít dostatek podkladů pro případnou diskusi o investici do nové technologie.

Druhá část se zabývá měření přenosu pájecí pasty v závislosti na velikosti apertur. Pro každou šablonu bylo vybráno 100 náhodných DPS, následně byly zpracovány vhodná data z SPI. Výsledkem je pět grafů, kde je zobrazen rozdíl v objemu, ploše, ale také posunu pájecí pasty v závislosti na velikosti apertur pro dvě různé povrchové úpravy šablon.

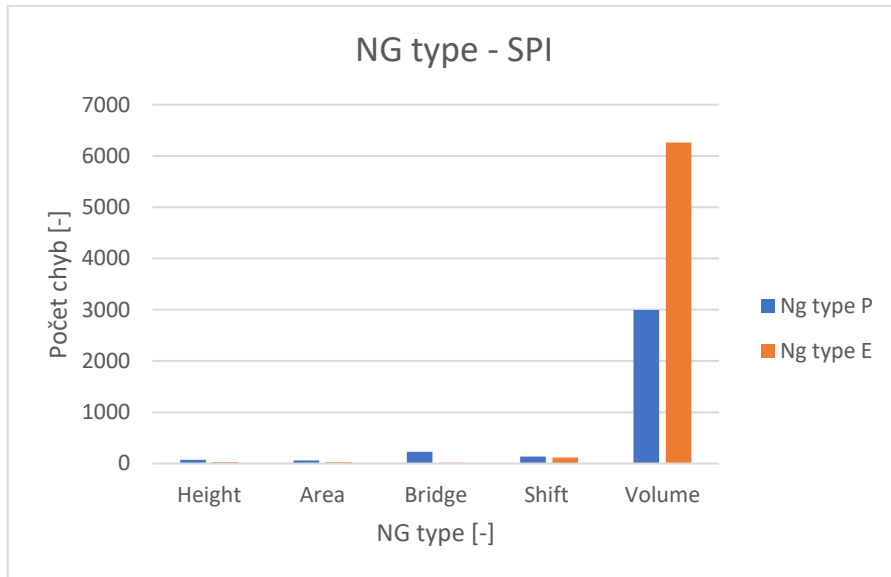
Třetí část se zabývá měřením aktivity hydrofobního povlaku na všech třech typech povrchových úprav šablon (nano-coating, electro-polishing, plasma-coating). Pomocí této metody se dá jednoduše kontrolovat opotřebení povrchových úprav šablon. Také se dá porovnat rozdílnost hydrofobnosti daných povrchů, což je jedna z klíčových vlastností šablon.

Poslední část se zabývá povrchem šablony s electro-polishingem, která byla měřena různými typy mikroskopů. Bude zde měřena drsnost povrchu, která pak souvisí s hydrofobními vlastnostmi povrchu. Pod elektronovým mikroskopem bude zkontrolován a vyhodnocen stav apertur.

6.1 Zpracování dat z AOI a SPI

V této kapitole jsou zpracovány naměřená data z SPI a AOI. Měření probíhalo na dvou stejných modelech DPS, ovšem byly použity dvě šablony. První s povrchovou úpravou pomocí plasmu a druhá s povrchovou úpravou pomocí electro-polishingu. Celkově bylo vyfiltrováno 4484 unikátních DPS pro šablonu s úpravou pomocí plasmu (v grafech zobrazeno modře). Dále bylo vyfiltrováno 4484 unikátních DPS pro šablonu s úpravou pomocí electro-polishingu (v grafech zobrazeno oranžově). Pro data z AOI byly použité stejné DPS jako pro data z SPI, data jsou tak maximálně autentická a reprezentují skutečný stav při výrobě. Data byly měřeny vždy při totožném nastavení výrobní linky, aby byly tak nejlépe porovnatelné. Nastavení šablonového tisku bylo následující, stěrka je dlouhá 20 cm a přítlak na stěrku je 12,5 kg, rychlost 40 mm/s, malé čištění šablony probíhalo po každém tisku a velké čištění po každé desáté DPS. Malé čištění je specifikováno jako vlhké čištění a odsávání nečistot. Velké čištění navíc obsahuje ještě suché čištění. Použitá pájecí pasta je M705-ULT369-PX typ 4.

Pro vyhodnocení následujících grafů bylo nutné odstranit záznamy DPS, kde bylo nalezeno více jak 10 defektů na jedné DPS. Kdyby tyto DPS nebyly odstraněny, bylo by tím znehodnoceno celé měření. Tyto DPS byly v procesu zařazeny jako testovací, na kterých se nastavoval a testoval tisk pájecí pasty, nebo zde docházelo k roztisku stroje.



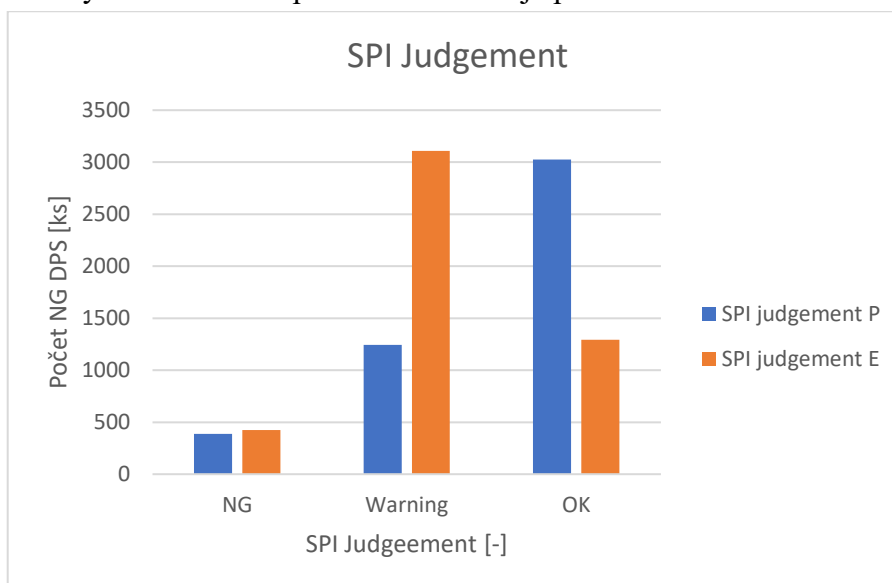
Graf 1 NG type – SPI

Graf č.1 popisuje změřená data z SPI, konkrétně přímo počet zjištěných defektů na DPS. Tyto defekty se řadí do následujících skupin.

- Height – Kontrola výšky nanesené pájecí pasty
- Area – Kontrola plochy nanesené pájecí pasty
- Volume – Kontrola naneseného objemu pájecí pasty
- Shift – Kontrola posunutí v ose x nebo y
- Bridge – Detekce pájecí pasty v mezerách mezi jednotlivými ploškami (kde se pájecí pasta nemá nacházet)

Z naměřených dat vyplývá, že největší problém byl právě v objemu nanesené pájecí pasty. Při šabloně s úpravou pomocí electro-polishingu (dále už pouze šablona typu E) bylo naměřeno 6261 chybových hlášení, kde byla překročena kritická hodnota pro objem nanesené pasty, tyto chyby obsahovalo 2094 ks DPS z celkových 4484 ks. Z toho vychází že pokud byla DPS označena jako chybná obsahovala průměrně 3 chyby. U šablony s úpravou pomocí plasmy (dále už pouze šablona typu P), jsou naměřené data daleko nižší. Bylo detekováno 2993, tyto chyby obsahovalo 1228 ks DPS z celkových 4484 ks. Což je průměrně 2,4 chyby na jednu chybnou DPS. Díky nedostatečnému objemu přenesené pasty může vzniknout mnoho kritických defektů v pozdější fázi výroby a součástky nebudou kvalitně zapájeny. U některých kusů bude omezena pouze kvalita pájeného spoje, ovšem u některých bude muset dojít k opravě daných defektů, případně, k likvidaci DPS. V příloze A.18 je možné vidět graf který zobrazuje rozložení četnosti

chyb na jednotlivých DPS. Nejčastější je případ jedné chyby na DPS, se zvyšujícím se počtem chyb na DPS se exponenciálně snižuje počet těchto DPS.



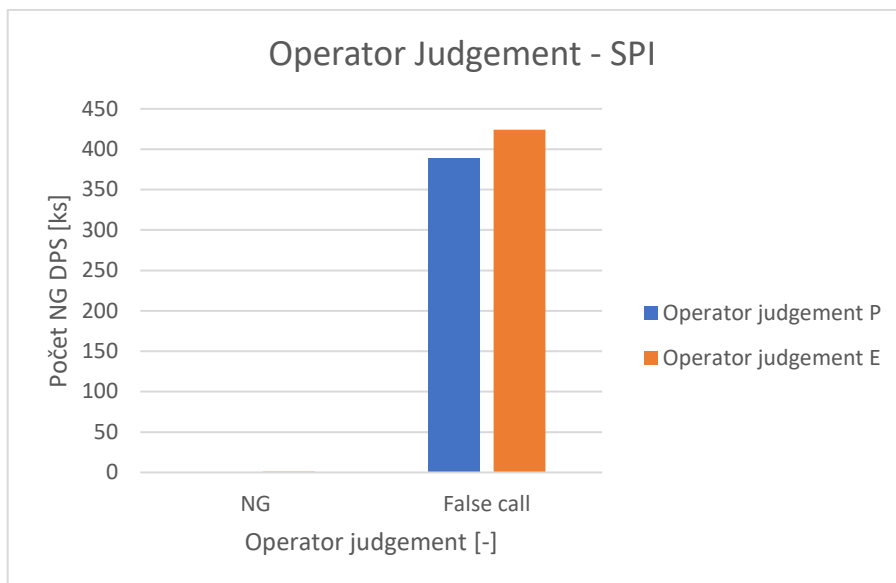
Graf 2 SPI Judgement

Naměřené hodnoty z SPI pro skupinu SPI judgement, neboli rozhodnutí stroje jestli, měřená DPS je OK (v pořádku, jsou splněny všechny nastavené limity pro kontrolu), Warning (DPS spadá do skupiny s varováním, některá z kontrolovaných hodnot se blíží krajním nastaveným mezím). Poslední ze skupin je NG (skupina DPS které nevyhovují kontrolovaným parametrům, DPS z této skupiny musí být přezkoumány operátorem, který rozhodne o jejím dalším osudu – operator judgement SPI).

Z naměřených dat je možné vidět, že kontrolní proces je nastaven velmi přísně a většina DPS spadá do skupiny s varováním. U šablony typu P bylo naměřeno výrazně méně dat spadajících do skupiny warning, celkem bylo zaznamenáno 2911 záznamů na 1243 ks DPS z celkového počtu 4484 ks DPS. U šablony typu E bylo záznamů 10493 na 3107 ks DPS (z celkového počtu 4484 ks DPS). Pokud tedy porovnáme průměrný počet chyb na chybné DPS, vychází zde pro typ P 2,3 a pro typ E 3,4 chyby na DPS. Z těchto hodnot vyplývá, že šablona typu E je téměř třikrát problematictější. Naměřené hodnoty jsou velmi často blízko hraničním mezím.

Hodnoty dat NG jsou v tomto měření nejdůležitější, protože poukazují na DPS, které neprošly stanovenými normami. Pro šablonu typu E bylo nalezeno 490 kritických chyb na 425 ks DPS z celkového počtu 4484 ks, průměr byl tedy 1,2 chyby na chybnou DPS. Pro šablonu typu P bylo nalezeno 582 kritických chyb na 388 ks DPS, průměr byl tedy 1,5 chyby na chybnou DPS. Výsledek je tedy opět nepatrně lepší pro šablonu typu P, celkově bylo NG DPS o 37 ks méně.

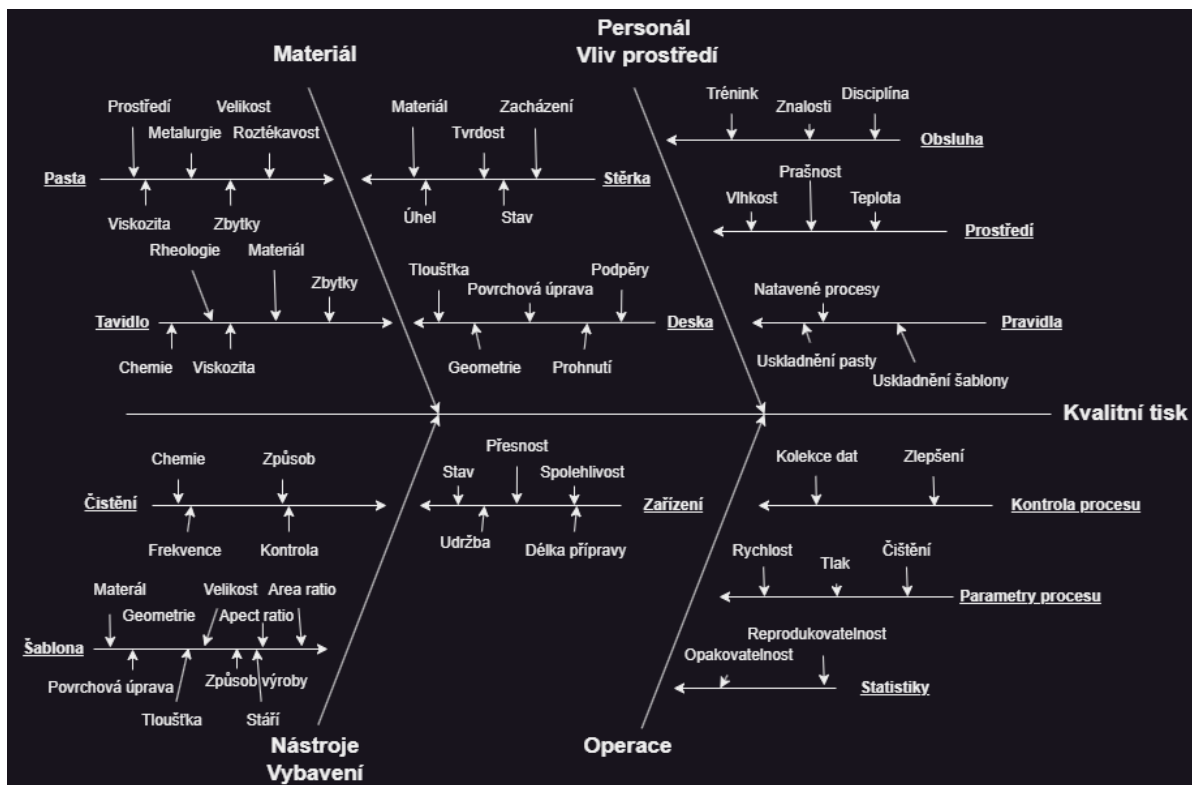
Podstatný rozdíl je v DPS, které prošly kontrolou se statusem OK. Pro šablonu typu P jich bylo 3027 ks a pro šablonu typu E jich bylo pouze 1294 ks DPS z celkového počtu 4484 ks. Toto je velmi znatelný rozdíl ukazující na kvalitu výrobního procesu.



Graf 3 Operator judgement – SPI

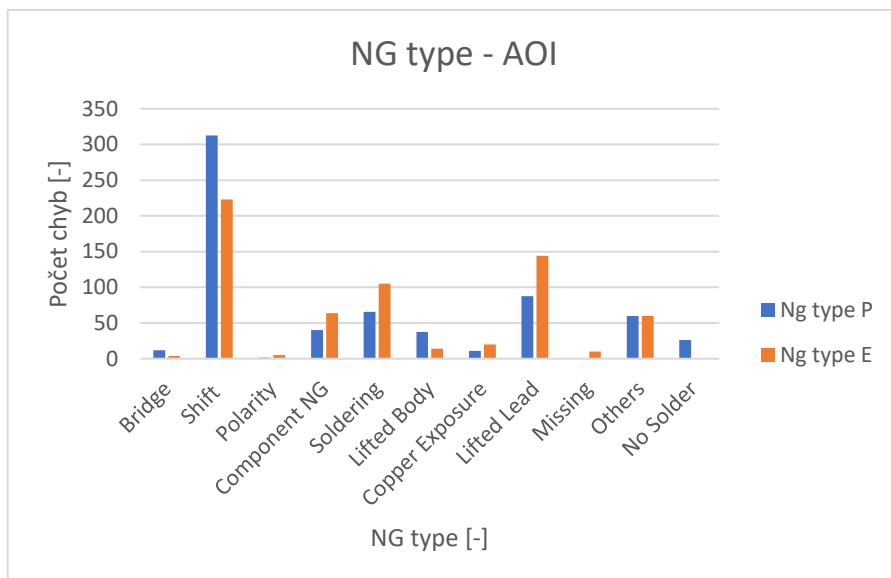
Graf č.3 obsahuje data z práce operátora na SPI. Operátor měl za úkol překontrolovat defekty označené automatickou kontrolou SPI na jednotlivých DPS. Operátor má k dispozici fotografie DPS z několika úhlů, také má k dispozici 3D model daného defektu (pájecí pasty), dále má možnost vidět jednotlivá naměřená data, kde jasně vidí, který z naměřených parametrů DPS nesplnila (v tomto případě byla většina defektů způsobena nedostatečným objemem pájecí pasty). Operátor musí z těchto informací určit, zda je tato chyba opravdu kritická a způsobila by v budoucnu defekt při pájení, nebo jestli se jedná o falešnou chybu a DPS bude připuštěna k osazení součástkami.

Z naměřených dat vyplývá, že téměř všechny DPS byly připuštěny k další výrobě. U šablony typu P bylo 582 chyb označeno jako falešných a tyto chyby se celkově nachází na 388 ks DPS, jako NG nebyla označena žádná DPS. Pro DPS se šablonou typu E bylo vyhledáno 489 falešných chyb na 424 ks DPS, pouze jedna chyba na jedné DPS byla označena jako NG, DPS tak byla vyřazena. Opět je tedy možné konstatovat, že výroba na šabloně typu P byla kvalitnější, protože zde bylo detekováno menší množství chyb.



Obrázek 6.1 Ishikawa diagram výrobního procesu

Z tohoto diagramu je vidět, jak komplexní tato problematika je, že není vůbec jednoduché určit příčinu problému. I velmi zkušený technolog musí postupovat velmi obezřetně a postupně vyřazovat možné příčiny vzniklého defektu. Konkrétně v tomto případě byl hlavní problém v přenosu pájecí pasty na pájecí plošky. Jedná se o defekt, který SPI definuje jako Volume viz Graf 1. Další defekt, který vznikl, byl bridging, stalo se tak díky pokusu o odstranění defektu s Volume. Technologové zvolili zvýšení tlaku na sěrku ve snaze protlačit pastu malými apertury, ale začal se tu objevovat problém s podmazáváním pájecí pasty. Pasta se přes větší apertury dostala až pod samotnou šablonu, kde se uchytila a začal se objevovat defekt bridging.



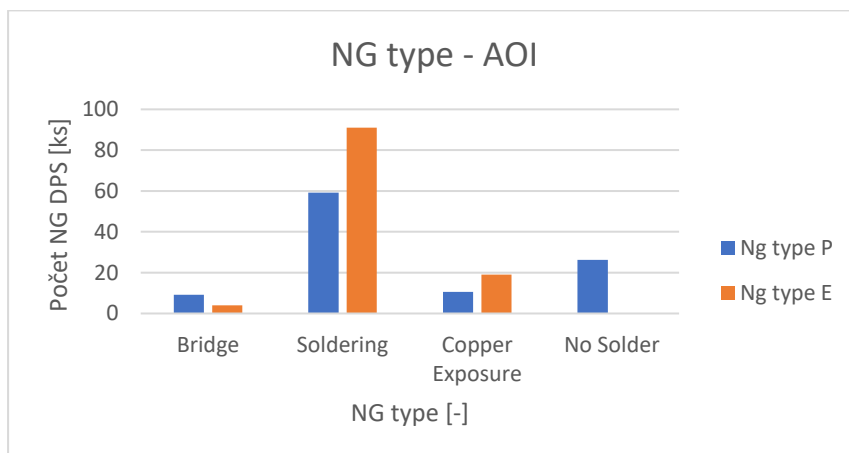
Graf 4 NG type – AOI

Graf č.4 je už sestaven z dat z AOI, na x ose grafu lze vidět všechny možnosti defektů které AOI dokáže detekovat. Postupně zde budou vysvětleny jednotlivé typy defektů.

- Bridge – kontrola takzvaných mostů, tedy nechtěných propojů jednotlivých kontaktů součástek
- Shift – kontrola posunutí součástky v x nebo y ose
- Polarity – kontrola polarit součástek (například podle nápisů nebo jiných značek viditelných na těle součástky)
- Component NG – kontrola rozměrů těla součástky a jejího popisu
- Soldering – obecné pájecí defekty, studený spoj, kontrola vzlínání pájky
- Lifted body – kontrola nadzvednutí součástky, například tombstoning u malých součástek, nebo velmi časté zvednutí jedné strany u většího čipu s velkým počtem vývodů
- Copper exposure – kontrola odhalení mědi
- Lifted lead – kontrola ohnutí vývodů součástek
- Missing – kontrola umístění komponentu
- Others – cizí komponent na DPS, může se jednat o spadlou součástku nebo nečistotu z výrobního prostředí
- No solder – kontrola umístění pájky

Pro tuto práci je vhodné hodnotit pouze ty defekty, které úzce souvisí s nanášením pájecí pasty. Tedy Soldering, Nosolder, Copper exposure a Bridge, hned na první pohled je vidět že v tomto případě se nejedná o nejčastější typy defektů. Z vybraných typů defektů je nejčastější Soldering, kde u výroby se šablonou typu E vzniklo 105 chyb a tyto chyby byly na 91 ks DPS, z toho vychází, že na jedné DPS bylo 1,2 chyby. Pro výrobu se šablonou typu P vzniklo chyb 66 a to na 59 ks DPS, z toho vychází, že je na jedné DPS

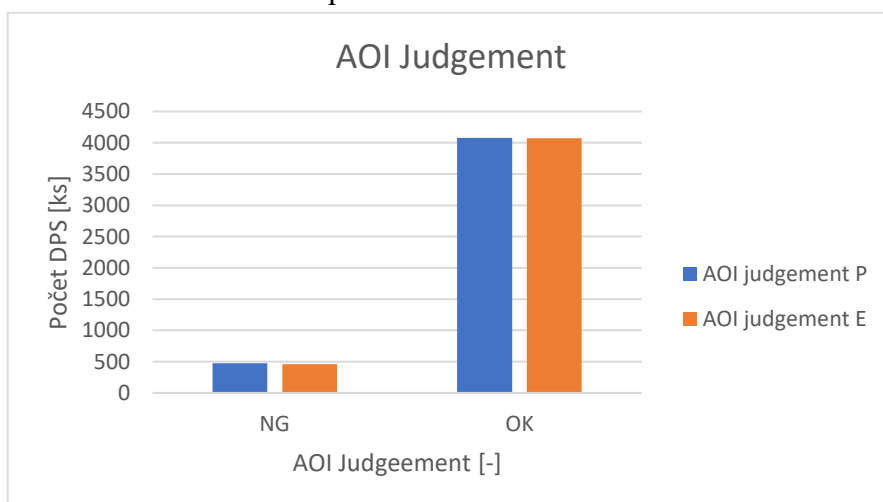
1,1 chyby. Konkrétně pro tento druh defektu bylo na šabloně typu P vyrobeno o téměř 30 % méně chybných DPS než na šabloně typu E.



Graf 5 Soldering NG

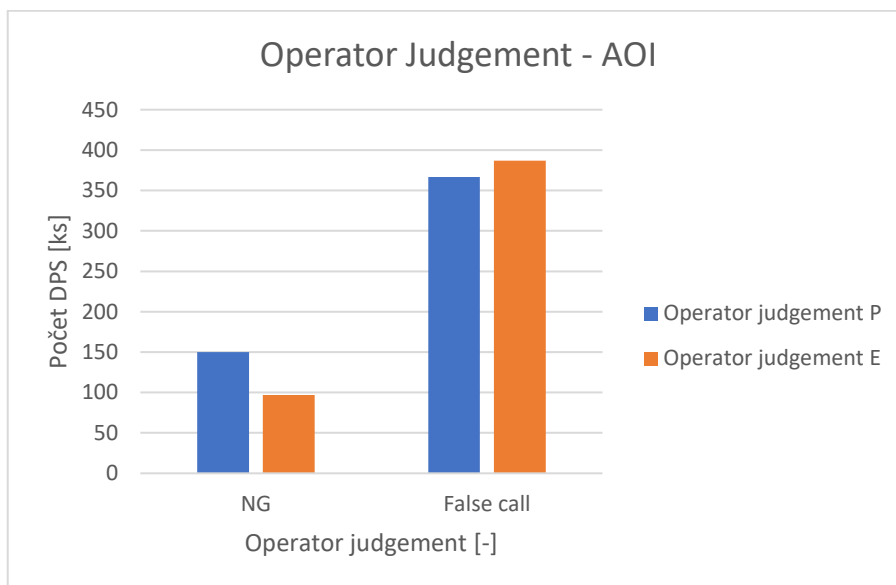
Defekt typu Bridge se vyskytl pro šablonu typu P 14krát na 9 ks DPS a pouze 4krát na 4 ks DPS u šablony typu E. Tyto hodnoty jsou zanedbatelné v porovnání s celkovým počtem 4484 ks DPS. Naopak defekt copper exposure se vyskytl 20krát na 19 ks DPS při šabloně typu E a u šablony typu P pouze 11krát na 11 ks DPS. Další druh defektu, který je vhodný zmínit je No Solder, který byl pouze u šablony typu P, a to 26krát na 26 ks DPS. Opět se nejedná o drastickou hodnotu a není tak možné vysledovat její příčinu, jedná se o nahodilé chyby.

V grafu č. 5 je vidět počet NG DPS pro šablonu typu P a šablonu typu E. Celkově tak data vychází příznivěji pro šablonu typu P, kde je 105 ks NG DPS, pro šablonu typu E pak 133 NG ks DPS. Celkově má tak výroba s šablonou typu P o 26 % méně kusů NG DPS, firma tak ušetří na následné opravě NG DPS.



Graf 6 AOI Judgement

Graf č. 6 popisuje naměřená data z AOI, konkrétně počet jednotlivých hodnocení při kontrole DPS. Na první pohled je vidět, že grafy jsou téměř identické pro šablonu typu P i pro šablonu typu E. Z celkových 4484 ks DPS bylo vyhodnoceno jako OK přes 4000 ks, pod 500 ks jich poté bylo označeno jako NG.



Graf 7 Operator judgement – AOI

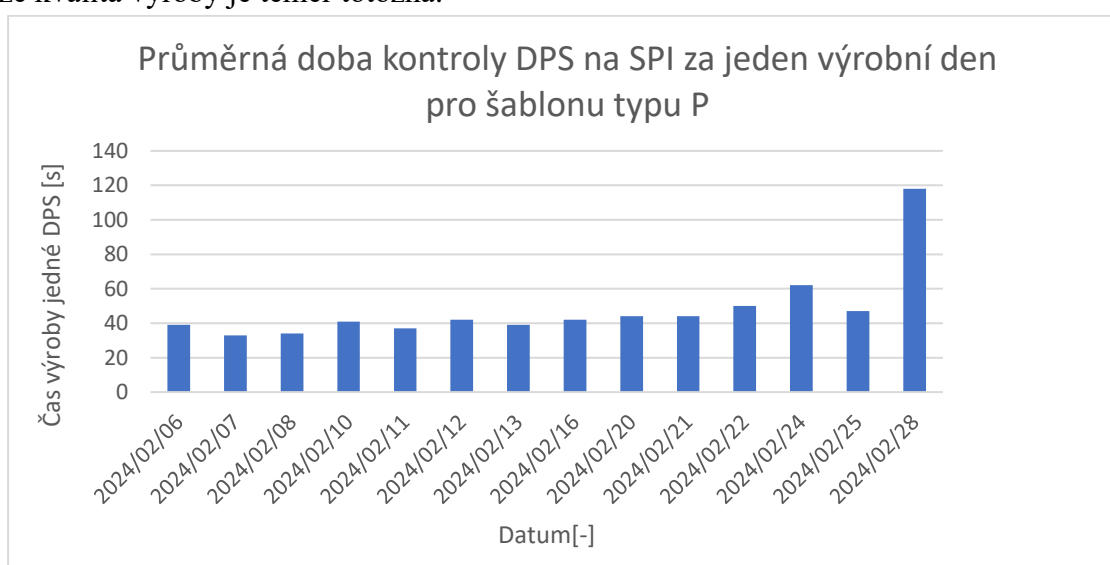
Graf č. 7 obsahuje data z AOI, konkrétně informace o rozhodnutí operátora ohledně verdiktu nad vybranými DPS. Oproti grafu č.5 zde už je vidět zásadní rozdíl mezi DPS vyrobených se šablonou typu P a typu E. Mnohem více NG DPS bylo nalezeno pro šablonu typu P, celkově o třetinu více. Každopádně tento nárůst NG desek nelze dát za vinu šabloně pro tisk pájecí pasty. Většina nalezených chyb nemá spojitost s tiskem pasty, nelze proto na základě tohoto grafu udělat, závěr která z použitých šablon je lepší a zda se vyplatí zainvestovat do dražší povrchové úpravy.

Jeden z hlavních úkolů této práce bylo zjistit pro kterou šablonu byla výroba výnosnější, a zda se investice do dražší povrchové úpravy (typ P) vyplatí. Jeden z ukazatelů je právě potvrzený počet NG DPS na AOI, a to ve prospěch šabloně typu P o 26 %, ovšem tento ukazatel se nedá tak jednoduše vyčíslit, aby bylo možné stanovit konkrétní cenu za opravu jedné NG DPS. Musely by být všechny defekty naceněny, například cena nové součástky, cena zapájení vývodu a podobně. Toto není jednoduše proveditelné, každý defekt je svým způsobem originální a kontrola výsledné ceny oprav by byla nemožná.

Jeden z největších rozdílů vzniká při kontrole na SPI, kde, jak už bylo řečeno, jsou pro šablonu typu E sníženy kontrolní limity pro objem nanesené pájecí pasty. Konkrétně z 50 % na 40 % u spodní hranice kontrolního limitu, bylo tak učiněno kvůli funkčnosti výroby. Velmi pravděpodobně by bez této úpravy všechny DPS s označením warning na SPI skončily s označením NG, a to by absolutně paralyzovalo výrobu, u SPI by musel být

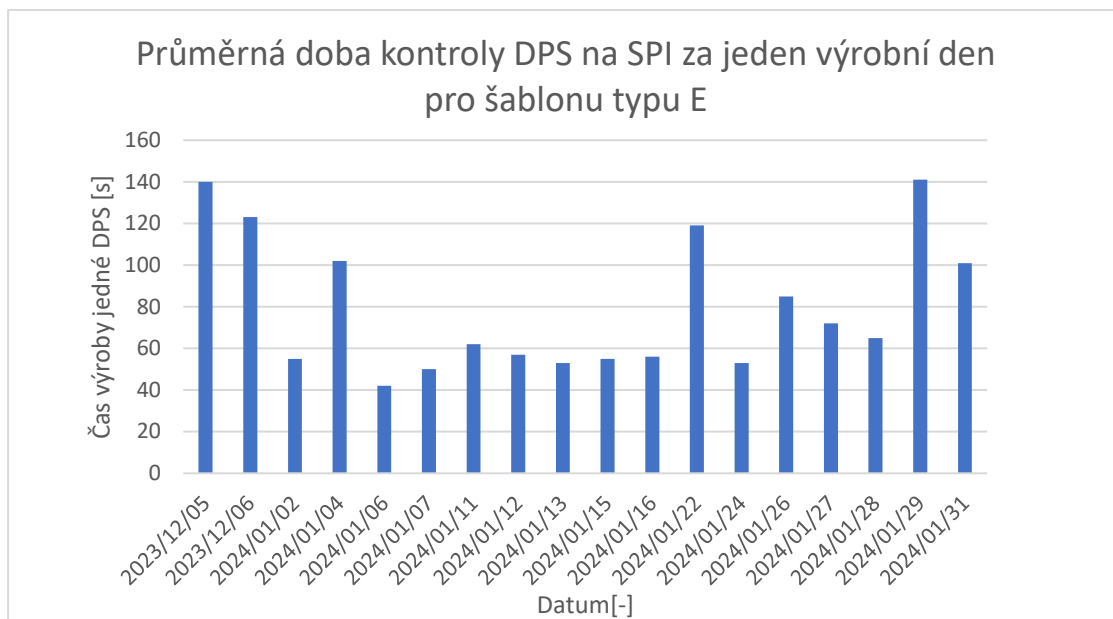
stále operátor, který by kontroloval NG DPS. Proto byly hranice posunuty, výrobu bylo nutné nezastavovat i za cenu občasných defektů zapájení na AOI. Šablona typu P byla i s běžně nastavenými limity na SPI, tedy 50 % jako spodní hranice povoleného objemu nanesené pasty, velmi úspěšná. Ze zpracovaných dat vychází více než dvojnásobný počet kusů OK DPS pro šablonu typu P. To je jasný ukazatel na velký kladný vliv povrchové úpravy šablony a kvalitu tisku pájecí pasty. Zásadní efekt má pak na plynulost celé výroby, jelikož operátor ke kontrole NG DPS je nutný jen velmi zřídka.

FPY (First pass yield) je ukazatel kvality výroby, který udává, jaké procento výrobků projde napoprvé výrobní procesem bezchybně. Pro šablonu typu E vychází celkové fpy na 90,8 %, pro šablonu typu P vychází celkové fpy na 90,9 %. Z těchto hodnot vychází, že kvalita výroby je téměř totožná.



Graf 8 Průměrná doba kontroly DPS na SPI za jeden výrobní den pro šablonu typu P

Graf č. 8 zobrazuje průměrnou dobu kontroly DPS na SPI za jeden výrobní den. Z grafu je vidět že kromě jednoho výkyvu je průměrný čas přibližně 40 s. Tyto data byly vypočteny po odfiltrování časových úseků větších než 4 min, aby data nebyly zkresleny přestávkami výroby pro operátory, případně jinými problémy, co se občasně vyskytují ve výrobě.



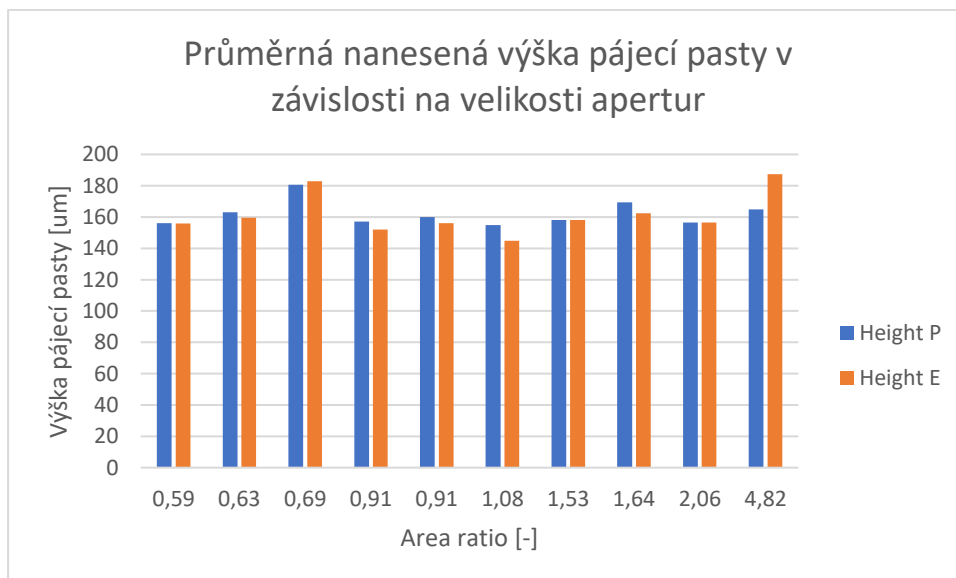
Graf 9 Průměrná doba kontroly DPS na SPI za jeden výrobní den pro šablonu typu E

Graf č. 9 zobrazuje průměrnou dobu kontroly DPS na SPI pro jeden výrobní den pro šablonu typu E, kde na první pohled je vidět velkou změnu oproti grafu č.8. Přibližně pro polovinu dnů byla průměrná doba kontroly DPS na SPI více jak 100 s, druhá polovina DPS měla čas přibližně 50 s. Z těchto dat je vidět, jaký vliv má šablona s povrchovou úpravou pomocí plasmy na kvalitu tisku, tedy i její následnou kontrolu. Právě DPS, co spadají u SPI kontroly do skupiny warning nebo ng, zpomalují celý proces kontroly, a tím pádem i snižují výrobní rychlost, takže firma ztrácí finance.

6.2 Měření přenosu pájecí pasty v závislosti na velikosti apertur

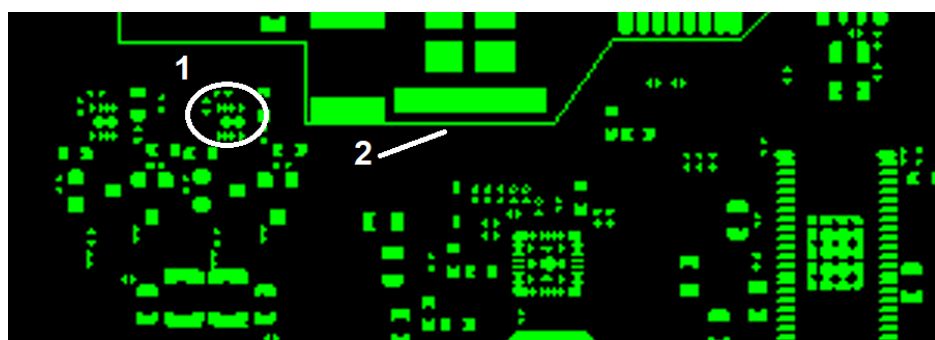
V této kapitole byly zpracovány data z SPI pro druhou stranu DPS stejného modelu jako v předchozí kapitole. Nejprve se jednalo o zkušební práci s daty a nebylo zásadní, o jaký model nebo stranu se jedná. Ovšem v průběhu roku došlo ke ztrátě mnoha dat z firemních serverů, a to i o data stejného modelu a strany, které byly použity v předchozí kapitole. Bohužel tak není možné spojovat souvislosti a závěry z různých kapitol.

Zpracovaná data vychází ze 100 ks DPS vyráběných v návaznosti. Zpracovaná data jsou pro dvě různé povrchové úpravy šablon. První je úprava pomocí plasmy (v dokumentu pak šablona typu P), druhá šablona je s povrchovou úpravou pomocí electro-polishingu (v dokumentu pak šablona typu E).



Graf 10 Průměrná nanosená výška pájecí pasty v závislosti na velikosti apertur

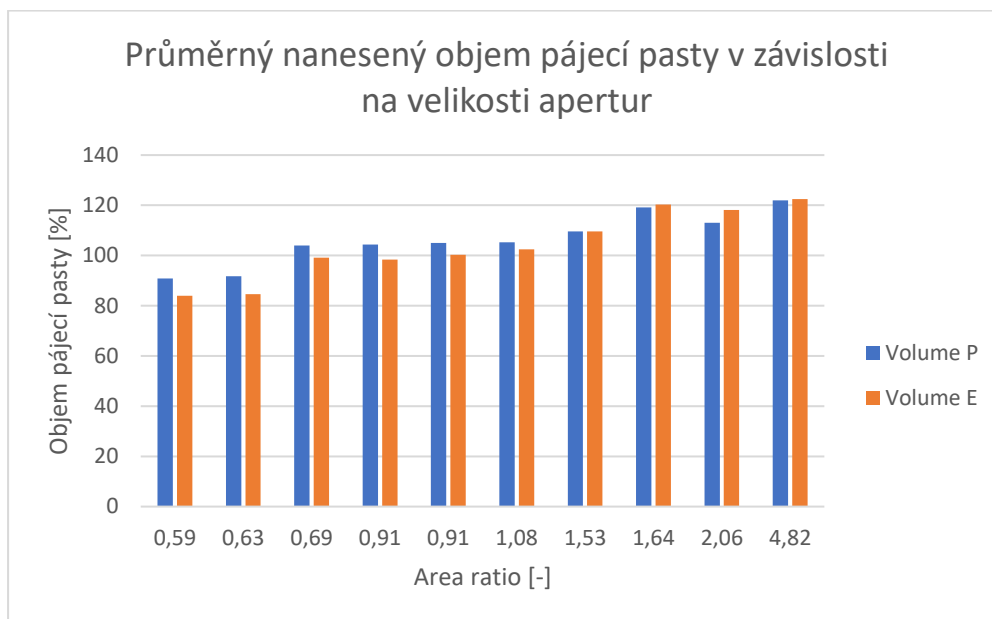
Pro zpracování těchto grafů bylo ideální použít průměrné hodnoty, v tomto případě průměrnou výšku nanosené pájecí pasty v závislosti na velikosti apertur. Ze zpracovaných dat vyplývá, že zde nejsou zásadní rozdíly mezi jednotlivými typy šablon. Pozoruhodné jsou výsledky pro aperturu s AR 0,69, kde je průměrná naměřená výška výrazně větší ve srovnání se všemi ostatními, a to pro oba typy šablon.



1- Pájecí plošky 2- Hranice step up části šablony 130 um na 150 um

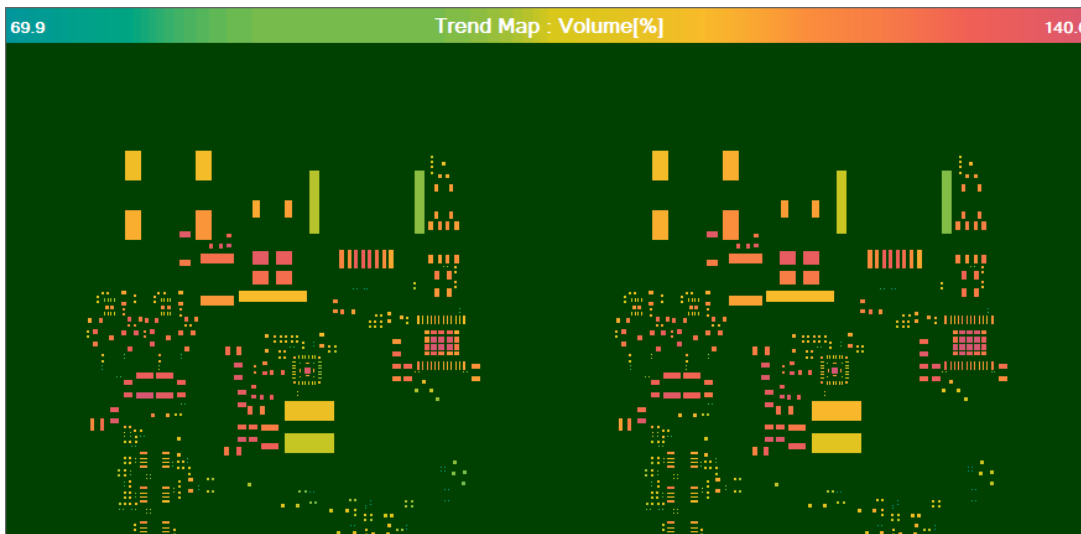
Obrázek 6.2 Step up přelom šablony

Vyšší výška pájecí pasty je zde právě proto, že několik těchto apertur se nachází na pomyslném přelomu, kde dochází ke zvýšení šablony ze 130 um na 150 um. Díky nedokonalým možnostem stěrky, která je nepatrně ohnutá a přitlačena k šabloně nedokáže vykompenzovat tak velkou povrchovou nerovnost jako je právě zde. Pokud je stěrka za hranicí, kterou naznačuje bod č. 2 v obrázku č. 6.2, je pak na pravé a levé straně od této hranice nepatrně zvednutá od povrchu, tím pádem je zde výška pájecí pasty vyšší než kdekoli jinde.



Graf 11 Průměrný nanesený objem pájecí pasty v závislosti na velikosti apertur

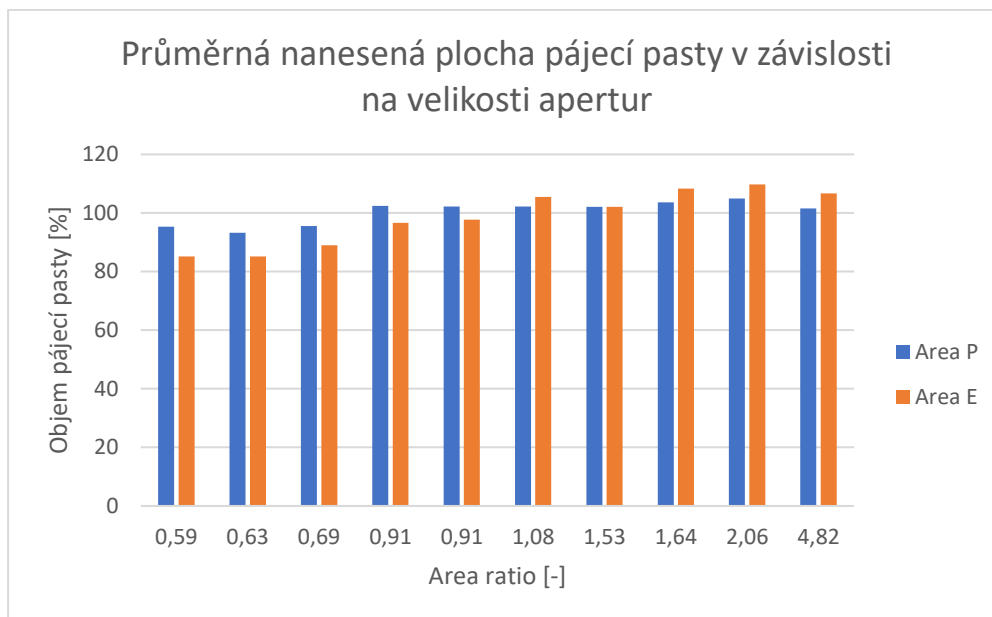
Změřená data přenosu objemu pájecí pasty v závislosti na velikosti apertur jsou jedny z nejdůležitějších, protože v předchozí kapitole byl právě tento defekt nejčastější. Mohou tak tyto data velmi napomoci k porozumění celé problematice. Z grafu je na první pohled vidět, že objem přenesené pasty velmi klesá se zmenšujícím se AR apertur. K tomuto jevu dochází vlivem tření pájecí pasty o hrany apertury. Čím menší je právě tento poměr AR, tím vyšší tření zde je a kuličky pasty mají obtížnější cestu skrz aperturu. Při velmi nízkém AR dochází k ucpávání apertur, neprojde tak skrz požadované množství pasty, stejně jako na tomto grafu.



Obrázek 6.3 Barevná mapa naneseného objemu pájecí pasty

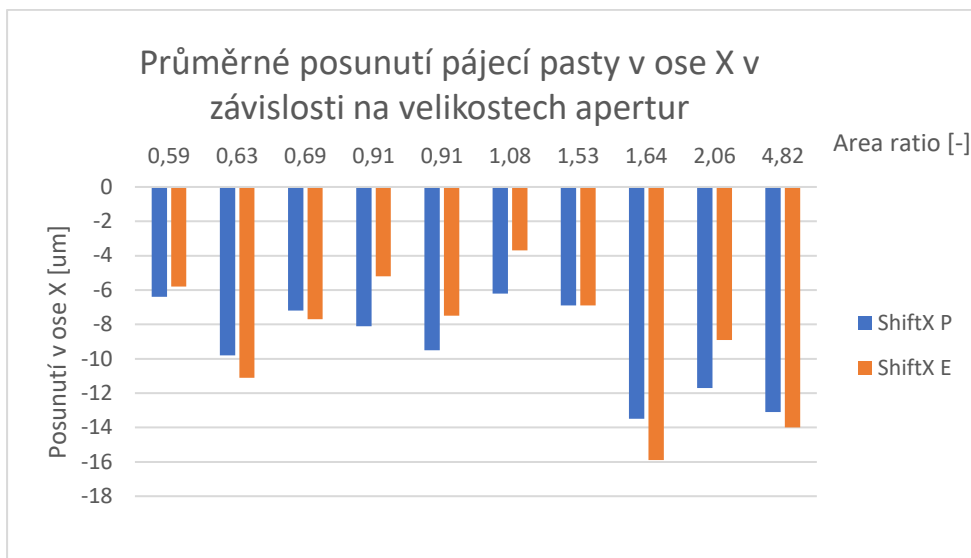
Na obrázku č. 6.3 je barevně naznačen přenos pájecí pasty, konkrétně její objem. Je zde vidět že malé apertury jsou zbarveny převážně žlutou barvou tedy přibližně střed z tohoto barevného rozsahu, tomu odpovídá i objem pasty. Větší apertury jsou pak zbarveny převážně do růžova, je zde tedy větší objem pájecí pasty.

Z naměřených dat vyplývá, že šablona typu E byla v přenosu pasty horší. U nejmenších apertur byl rozdíl mezi šablonami průměrně okolo 7 %, i tyto malé rozdíly mohou ovšem výrazně ovlivnit výslednou kvalitu pájeného spoje. Pokud ovšem porovnáme přenos pájecí pasty na apertuře s AR 1,64 a 0,59, rozdíl už je okolo 35 %. S těmito rozdíly musí dopředu počítat návrháři, kteří takovou šablonu připravují. Proces musí být dobře optimalizovaný, protože i příliš velké množství pájecí pasty může způsobit řadu defektů, je tak vhodné držet tyto hodnoty v přijatelných mezích, které pak kontroluje právě SPI.



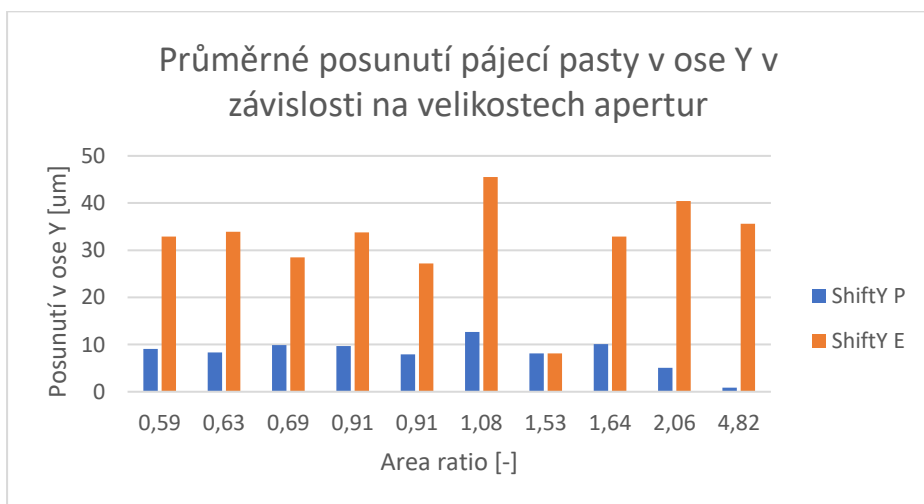
Graf 12 Průměrná nanesená plocha pájecí pasty v závislosti na velikosti apertur

Graf č. 12 popisuje průměrný nanesený obsah pájecí pasty v závislosti na velikosti apertur, kde je opět na první pohled vidět, že při malých AR přenáší pájecí pastu daleko lépe šablona typu P. Povrchová úprava pomocí plasmu velmi kladně ovlivňuje přenos pájecí pasty skrz apertury. Ovšem rozdíl není tak drastický, jak bylo zobrazeno na grafu použitým v teorii. Pravděpodobně proto, že právě od AR 0,53 byly zjištěny největší rozdíly v přenosu pájecí pasty. V našem případě jsou apertury stále relativně velké. Rozdíl například v přenosu pájecí pasty u AR 1,53 proti nejmenší 0,59 je pro šablonu typu E 15 %, tedy plocha nanesené pasty přes aperturu s AR 0,59 je o 15 % menší než plocha přenesené pájecí pasty přes aperturu s AR 1,53. Tato hodnota není nikterak kritická. Dle IPC norem je obecně povoleno rozsah 50-160 %, samozřejmě nastavení SPI podléhá mnoha dalším faktorům. Například pro pájecí plošky malých integrovaných čipů by program nebyl nastaven takto benevolentně. Technolog, který provádí nastavení má mnoho zkušeností, pro které součástky je vhodný takový rozsah, aby byla splněna kvalita zapájení a nevznikalo na SPI příliš mnoho falešných chyb.



Graf 13 Průměrné posunutí pájecí pasty v ose X v závislosti na velikosti apertur

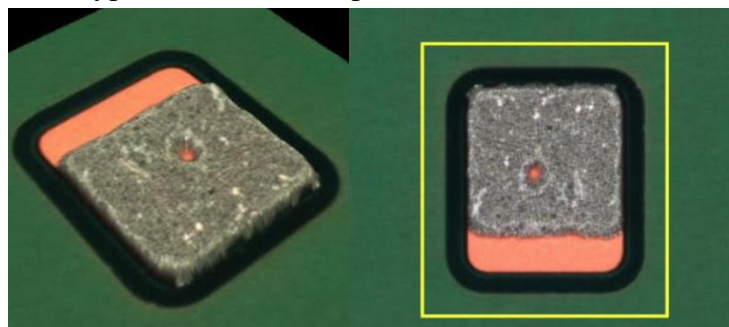
Graf č. 13 zobrazuje průměrné posunutí pájecí pasty v ose X v závislosti na velikosti apertur. Z grafu je patrné, že jsou všechny apertury posunuty jedním směrem. Jedná se tedy pravděpodobně o výrobní nepřesnost samotné šablony. Celkově jsou naměřené hodnoty velmi nízké a neovlivňují zásadně kvalitu tisku. Šablona typu P i šablona typu E mají v podstatě velmi podobné posunutí apertur, rozdíl v řádu jednoho mikrometru ku celkovému rozměru apertury je zanedbatelný.



Graf 14 Průměrné posunutí pájecí pasty v ose Y v závislosti na velikosti apertur

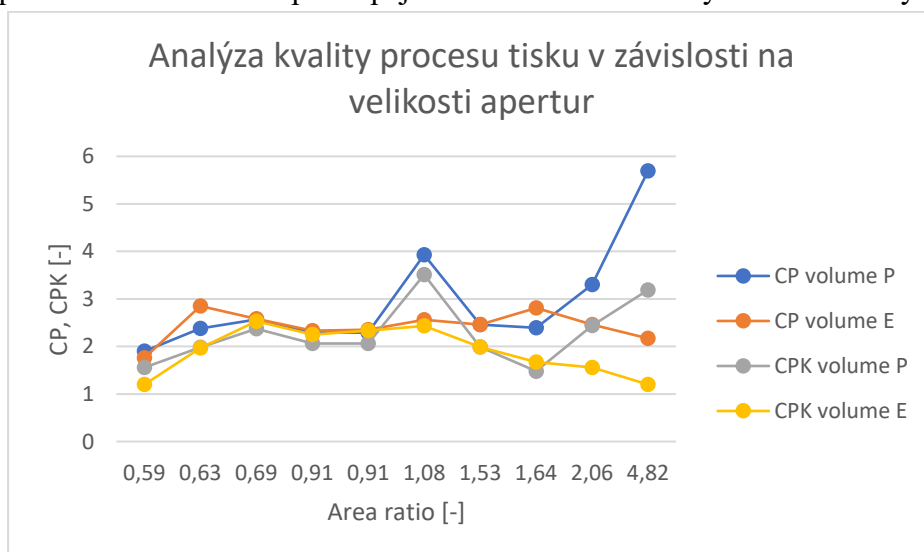
Na grafu č. 14 je zobrazena závislost průměrného posunutí pájecí pasty v ose Y na velikosti apertur. Oproti grafu č. 13 je zde vidět velký rozdíl mezi šablonou typu P a šablonou typu E. Šablona typu E má průměrně 3x vyšší míru posunutí než

šablona typu P, stále se ovšem může jednat o výrobní nepřesnost nebo o nepřesnost v sesazení tiskové šablony a DPS. Každopádně se stále jedná o velmi nízkou hodnotu posunu pájecí pasty, obecné natavení pro kontrolu toho defektu je posun o 150 μm kladně nebo záporně. U složitějších komponent je tato hranice snižována na 100 μm , proto je možné považovat tyto naměřená data za vyhovující. Maximální hodnoty posunu byly změřeny pro šablону typu P 93,1 μm , a to pro AR 4,82.



Obrázek 6.4 Defekt posunutí v ose Y SPI

Obrázek č. 6.4 obsahuje fotky z SPI, kde je zobrazen právě tento defekt posunutí v ose Y. U velkých apertur může dojít k takzvanému falešnému posunu, jde o to, že pasta je natlačena na jednu stranu apertury, respektive pájecí plošky, a to ve směru pohybu stěrky šablonového tisku. SPI pak naskenuje tento objekt pájecí pasty a určí jeho geometrický střed a ten pak porovnává se středem apertury, respektive pájecí plošky. Díky tomu pak vznikají velké hodnoty posunu pájecí pasty, které ovšem nejsou kritické pro kvalitu zapájení, protože je zde splněn vhodný objem nanesené pasty. Posun o 100 μm pak nemá zásadní vliv pro zapájení relativně velkého vývodu součástky.



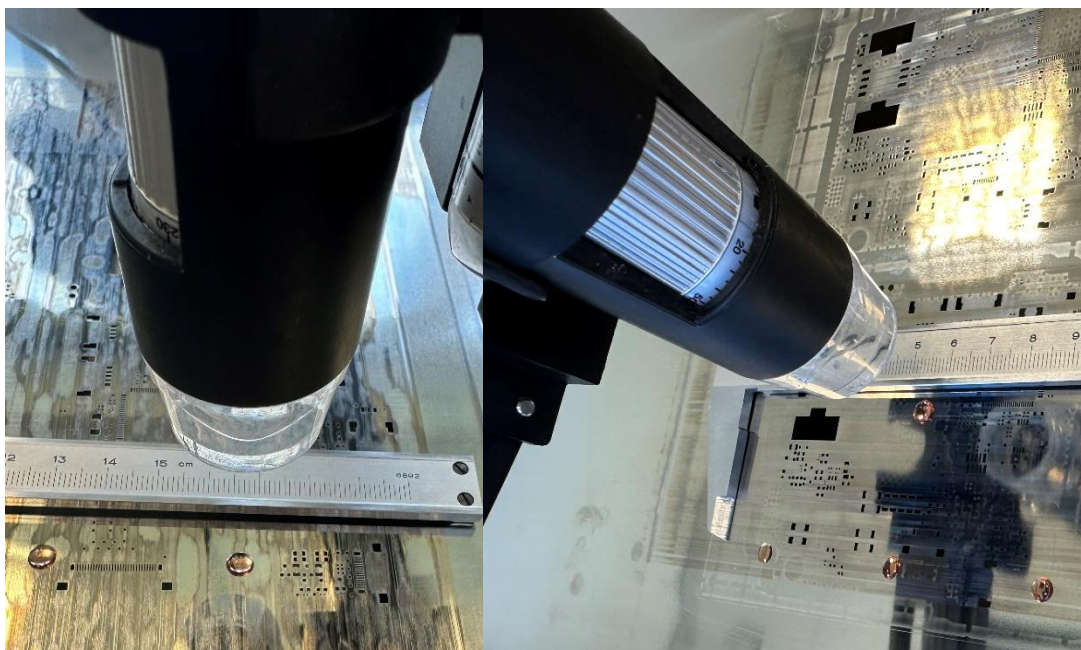
Graf 15 Analýza kvality procesu tisku v závislosti na velikosti apertur

Graf č. 15 zobrazuje kvalitu a způsobilost procesu tisku pájecí pasty, hodnoty pro CP a CPK byly vypočítány z dat pro měření objemu nanesené pájecí pasty, jelikož se jedná o nejvíce problémový defekt. CP (process capability) česky tedy potencionální způsobilost procesu, udává maximální možnou míru shody produktů procesu s požadovanými limity. CPK (process capability index) česky tedy index způsobilosti procesu, zde se bere v úvahu i střední hodnota procesu a udává tak jeho aktuální míru shody s požadovanými limity. Velmi kritické je pak CPK pro šablonu typu E pro nejmenší aperturu s AR 0,59, kde se hodnota blíží k hranici 1, která označuje nekvalitní proces. K tomu došlo u největší apertury s AR 4,82, kde dochází k opačnému problému, je zde měřen příliš velký objem pájecí pasty.

Celkově z naměřených a zpracovaných dat vyplývá, že šablona s povrchovou úpravou plasma-coatingem, oproti úpravě electro-polishingem, dokáže lépe přenést pájecí pastu skrz velmi malé apertury. U měření přeneseného objemu pájecí pasty bylo potvrzeno očekávání, že čím menší byly apertury, tím větší rozdíl v přeneseném objemu pájecí pasty u porovnaných šablon typu P a typu E. Graf č. 13 pak popisuje, jak se šablona typu E blíží v krajních velikostech apertur k hodnotám $CPK=1$.

6.3 Měření hydrofobnosti povrchu šablon pro tisk pájecí pasty

V této kapitole budou okomentovány výsledky měření hydrofobnosti povrchu čtyř různých šablon, konkrétně dvakrát dvě šablony pro stejný produkt, ale s různou povrchovou úpravou. Šablona označena jako E X představuje šablonu pro produkt X s povrchovou úpravou pomocí electro-polishingu. Šablona označena jako N Y představuje šablonu pro produkt Y s povrchovou úpravou pomocí nano-coatingu. Šablona označena jako E Y představuje šablonu pro produkt Y s povrchovou úpravou pomocí electro-polishingu. Šablona označena jako P X představuje šablonu pro produkt X s povrchovou úpravou pomocí plasma-coatingu.



Obrázek 6.5 Příklad měření hydrofobnosti povrchu na šabloně E Y

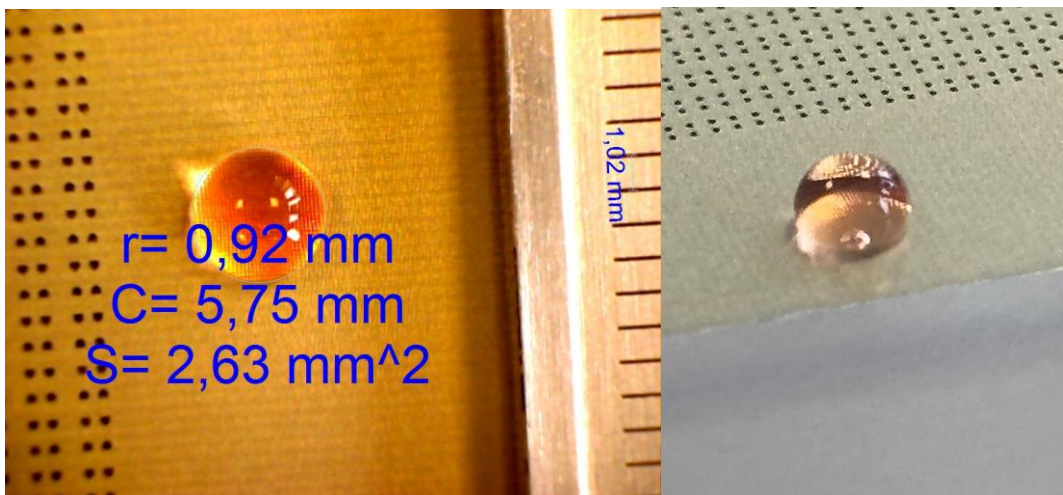
Měření probíhalo následovně, nejprve byla očištěna spodní strana šablony pomocí izopropylalkoholu. Měření probíhá na spodní straně. Z důvodu, že právě zde jsou požadované hydrofobní vlastnosti šablony, aby docházelo k odpuzení pájecí pasty a ta se nelepila na šablonu. Po přípravě šablony pod USB mikroskop, bylo nutné obraz zaostřit, aby byl výsledný snímek použitelný. Poté bylo pomocí dávkovací pipety odměřeno 0,02 ml destilované vody, která byla obarvena potravinářským barvivem pro zlepšení viditelnosti pod mikroskopem. Následně byla pipeta zvážena na analytické váze pioneer PA214CM (hodnota ml v tabulce naměřených dat), z tohoto údaje pak bude možné přesně stanovit, jaký objem kapaliny byl použit k měření. Po zvážení byla pipeta vyprázdněna na předem určené místo v šabloně. Výška, ze které byla kapalina aplikována byla 1 cm. Pro pozdější replikaci měření byl zvolen dřevěný objekt ve výšce 1 cm. Objekt byl vždy umístěn na šablonu v místě aplikace, aby měl laboratorní pracovník vždy

přehled o výšce konce pipety. Po aplikaci byla pipeta opět zvážena na váze (hodnota m2 v tabulce naměřených dat). Následně bylo vedle vzniklé kapky položeno posuvné měřidlo, podle jehož stupnice pak bylo možné kalibrovat měřítko na mikroskopu. Jako poslední bylo provedeno sesazení obrazu z mikroskopu, aby se zde nacházela jak měřená kapka, tak i posuvné měřidlo. Jakmile byla vytvořena fotografie, bylo nutné provést kalibraci měřítka pro danou fotografii, a poté bylo pomocí dostupných nástrojů provedeno měření obsahu kapky. Výsledná fotografie i s měřením byla uložena a postup celého měření se opakoval. Z naměřených hodnot není možné vypočítat smáčecí úhel mezi kapkou a šablonou, protože zde chybí údaj o výšce tohoto vrchlíku. K tomu, aby bylo možné experiment změřit by bylo zapotřebí dalšího mikroskopu, který by měřil výšku kapky. Proto tuto práci je dostatečné porovnávat pouze změřené plochy kapek, které mají stejnou vypovídající informaci.

Výrobce	Tloušťka [um]	Technologie povrchové úpravy	Stáří [cykly]	Označení
ASMPT	80	Nano ultra gold	0	N Y
Tannlin	80	Electropolished	2000	E Y
Christian Koenen	130	Electropolished	100000	E X
Christian Koenen	130	Plasma 3.0	20000	P X

Tabulka 6.1 Parametry použitých šablon

V tabulce 6.1 jsou zmíněny jednotlivé parametry použitých šablon. K měření je nutné dodat, že každá šablona dosahuje jiného stáří a opotřebení, například šablona N X je nová a nepoužitá. Šablona E X je víceméně také nová, byla použita na přibližně 2000 ks DPS. Šablona typu E Y je nejstarší a dle norem výrobce po své životnosti, proto byla také v dalším experimentu rozřezána pro měření pod elektronovým mikroskopem. V posledním případě, šablona P Y její stav je přes 20000 cyklů, tedy přibližně 1/5 životnosti.



Obrázek 6.6 Měření hydrofobnosti povrchu šablony s povrchovou úpravou nano-coatingem

Obrázek č. 6.6 zobrazuje jeden z výsledků měření na šabloně N Y, tedy s povrchovou úpravou nano-coatingem. Zlatý podklad pod nanosenou kapkou je už samotná vrstva povrchové úpravy. Na první pohled je vidět, že se povrch chová vysoce hydrofobně, kapka nemá tendenci se roztékat. Naměřený obsah kapky $2,63 \text{ mm}^2$ je druhý nejmenší ze všech měření a průměrná hodnota obsahu u povrchové úpravy nano-coatingem je $7,4 \text{ mm}^2$ a to je nejmenší průměr ze všech měřených druhů. Je tak možné potvrdit, že povrchová úprava pomocí nano-coatingu perfektně plní svou roli. Druhá fotografie byla pořízena mobilním zařízením a je na ni opět vidět hydrofobnost povrchu, smáčecí úhel se pak velmi pravděpodobně pohybuje v rozmezí od 90° do 150° .



Obrázek 6.7 Měření hydrofobnosti povrchu šablony s povrchovou úpravou electro-polishingem

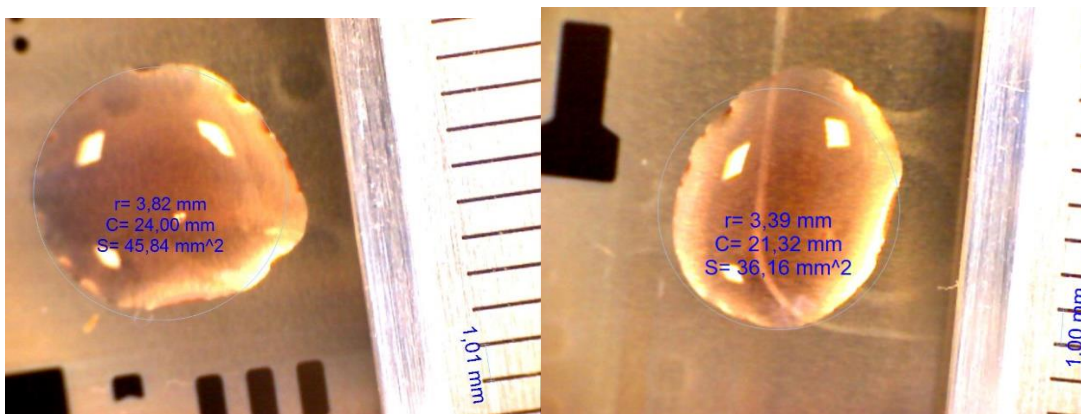
Obrázek č. 6.7 zobrazuje jeden z výsledků měření na šabloně E Y, tedy s povrchovou úpravou electro-polishingem. Hned na první pohled jsou vidět zásadní rozdíly oproti šabloně typu N Y. Aplikované kapky dosahují průměrně dvojnásobných rozměrů než

u šablony typu N Y. Jelikož se jedná o velmi specifickou šablonu pro DPS, kde jsou osazovány pouze LED diody, není možné provést toto měření uvnitř šablony mezi aperturami, jako to bylo provedeno u šablon typu X. Měření je tak prováděno v blízkosti okrajů, kde už nejsou apertury, ale stále se jedná o aktivně používanou část šablony stěrkou. Na pravém obrázku je možné vidět jedno zkušební měření, které bylo provedeno uprostřed šablony na aperturách. I přesto, že kapka leží na otvorech, je obsah kapky menší než u některých měření na okrajích šablony, kde apertury nejsou. Toto měření nebylo započítáváno do vypočtených průměrných hodnot.



Obrázek 6.8 Měření hydrofobnosti povrchu šablony s povrchovou úpravou plasma-coatingem

Obrázek č. 6.8 zobrazuje měření hydrofobnosti povrchu šablony typu P X. Pro tuto šablonu vychází průměrná hodnota obsahu nanesené kapky $56,45 \text{ mm}^2$. Toto měření tedy poukazuje na velký rozdíl naměřených hodnot v různých místech šablony. Tato kapka byla umístěna do prostoru, kde po celé délce v ose Y nejsou žádné apertury. Jedná se o místo předělu dvou DPS, které jsou spojeny do jedné pomocí panelu, ve kterém jsou umístěny. Z levého obrázku je možné vidět, že v ose Y je tento pruh přibližně 2-3 cm široký a v tomto pruhu není šablona téměř opotřebena. V ostatních místech šablony je vidět opotřebení od neustálého tlaku pohybuující se stěrky. Toto měření tak nebylo započteno do celkového průměru, ale poukazuje s největší pravděpodobností na stav šablony na začátku její životnosti.



Obrázek 6.9 Měření hydrofobnosti povrchu šablony s povrchovou úpravou plasma-coatingem

Obrázek č. 6.9 zobrazuje měření hydrofobnosti povrchu šablony typu P X. Na první pohled je vidět, že výsledek měření je nesrovnatelný například s šablonou typu N Y, u které je průměrná hodnota 8x menší. Velmi důležitý je zde i samotný tvar kapky. Kapka se na povrchu téměř rozlévá do různých stran, je vidět že v některých směrech je to povrchové napětí nižší a voda směřuje tam. Povrch šablony s úpravou plasma-coatingem tedy nespňuje princip hydrofobnosti a pájecí pasta by se pravděpodobně jednoduše přilepila k povrchu šablony.

E X	m1[g]	m2[g]	m[g]	S[mm2]	mp[g]	Sp[mm2]
1	82,8347	82,8127	0,022	5,5	0,02	6,05
2	82,8378	82,8142	0,0236	6,94	0,02	8,19
3	82,8368	82,8145	0,0223	6,02	0,02	6,71
4	82,8373	82,8133	0,024	6,49	0,02	7,79
5	82,8366	82,8134	0,0232	5,64	0,02	6,54
6	82,839	82,8144	0,0246	5,25	0,02	6,46
7	82,8364	82,8137	0,0227	6,33	0,02	7,18
8	82,8376	82,8149	0,0227	8,18	0,02	9,28
9	82,8385	82,8149	0,0236	6,67	0,02	7,87
10	82,8386	82,8158	0,0228	6,87	0,02	7,83
mimo	82,8391	82,8156	0,0235	10,86	0,02	12,76
Průměr			0,0231	6,39		7,39

Tabulka 6.2 Naměřená data pro šablonu E X

Tabulka 6.2 obsahuje naměřená a vypočtená data pro šablonu X s povrchovou úpravou electro-polishingem. Změřené data jsou ve sloupci s označením m1, kde je

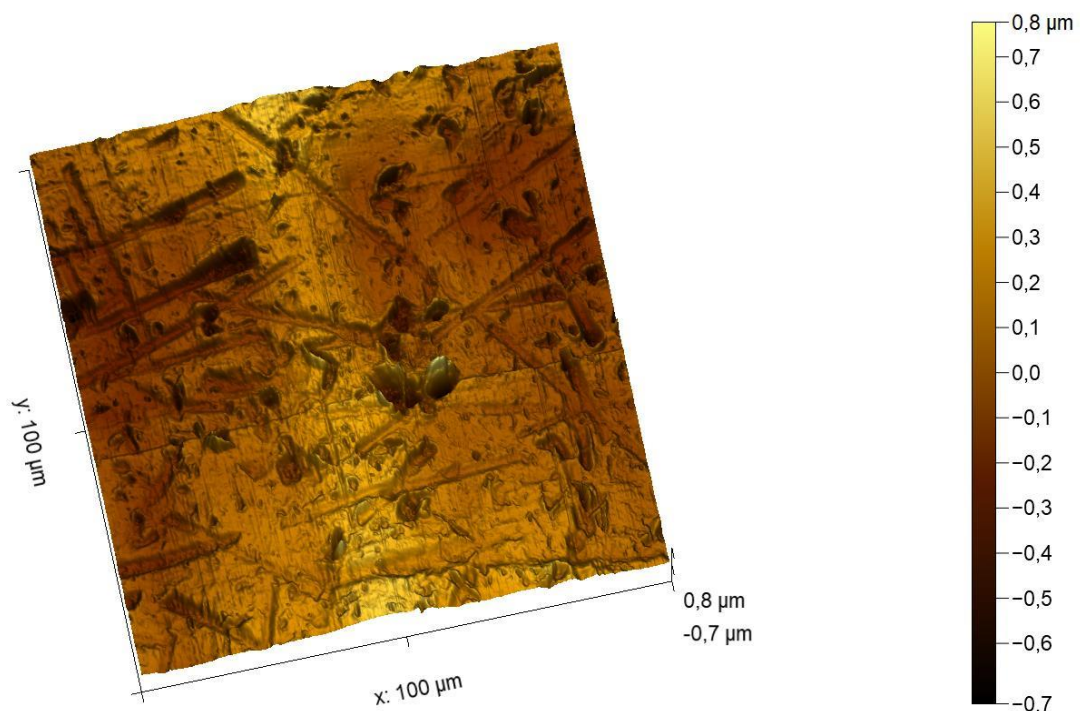
zaznamenána hmotnost naplněné pipety před použitím. Ve sloupci s označením m2 je zaznamenána hmotnost pipety po nanesení jejího obsahu na měřenou šablonu. Ve sloupci m je výsledná hmotnost aplikované tekutiny. Ve sloupci s označením S je zaznamenán změřený obsah kapky z mikroskopu, jako například z obrázku č. 6.7. Ve sloupci s označením mp je zaznamenána hmotnost kapky, pro kterou bude dopočítán obsah kapky (Sp), z důvodu možného porovnání mezi jednotlivými daty z ostatních měření pro další typy šablon. V posledním řádku byl spočítán průměr pro sloupec hmotnosti, obsahu a dopočítaného obsahu. Řádek s označením mimo, označuje měření, které bylo provedeno mimo aktivně používaný povrch šablony (mimo povrch šablony, který je v kontaktu s DPS při výrobním procesu), není tak započítáván do řádku hodnot s průměrem změřených dat.

Zhodnocení všech naměřených dat, celkově byly změřeny 4 šablony s různými parametry. Pro šablonu typu E Y byl naměřen průměrný obsah aplikované kapky $15,52 \text{ mm}^2$. Dle fotografií a vizuální kontroly je možné potvrdit, že tato hodnota značí hydrofobnost povrchu této šablony. Pro šablonu N Y vychází průměrný obsah aplikované kapky $7,04 \text{ mm}^2$, což je nejmenší naměřený průměr a jedná se tedy u nejvíce hydrofobní povrch ze všech měřených šablon. Pro šablonu typu E X se jedná o téměř stejnou situaci, byl zde naměřen průměr $7,39 \text{ mm}^2$, který opět značí, že šablona má velmi hydrofobní vlastnosti měřeného povrchu. Pro poslední šablonu typu P X byl naměřen průměrný obsah aplikované kapky $56,45 \text{ mm}^2$. Po kontrole fotografií a vizuální inspekci při měření je možné potvrdit, že měřený povrch šablony nemá hydrofobní vlastnosti. Nejvíce hydrofobní povrch ze všech měřených šablon má tedy šablona s povrchovou úpravou nano-coatingem, ovšem je velmi pravděpodobné, že vlivem opotřebení se její hydrofobní vlastnosti mohou změnit.

6.4 Analýza povrchu šablon pro tisk pájecí pasty

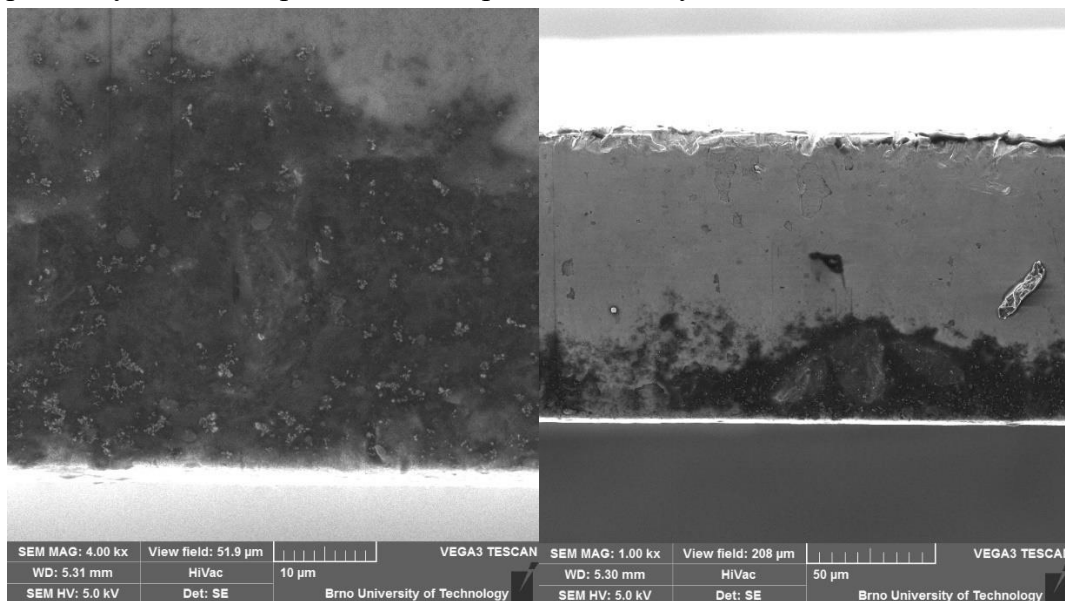
V této kapitole dojde ke zhodnocení různých pokusů o zjištění, co nejvíce hodnotných informací o povrchu měřené šablony. Pro toto měření byla vybrána šablona typu E Y, tedy šablona s povrchovou úpravou pomocí electro-polishingu. Tato šablona byla použita i pro měření v kapitole 6.1. Zvolena byla z důvodu nevratných destruktivních změn, které musely být provedeny, šablona musela být vyříznuta z rámu a zmenšena, aby ji bylo možné vložit do jednotlivých mikroskopů. Nejdříve byl vytvořen pouze jeden malý vzorek, který byl pak použit pro měření na elektronovém mikroskopu, mikroskopu atomárních sil a konfokálním mikroskopu. Pro spektroskopickou analýzu byl pak vyříznut ještě jeden vzorek (č.2), aby bylo možné provést měření i na jiné menší apertuře.

První měření probíhalo na konfokálním mikroskopu, ze kterého byly pořízeny dvě fotografie pro vrchní stranu šablony (příloha A.6) a pro spodní stranu šablony (příloha A.5). Na první pohled jsou na vrchní straně vidět známky opotřebení od neustálého pohybu stěrky a převalující se pájecí pasty. Pro spodní stranu není opotřebení tak znatelné. Povrch je pokryt malými náhodnými škrábanci, pravděpodobně od kontaktu s povrchem DPS. Dále byla pomocí konfokálního mikroskopu změřena drsnost povrchu, pro spodní stranu šablony byla naměřena drsnost povrchu $0,101 \mu\text{m}$. Tato hodnota značí že povrch je velmi hladký, bez větších nerovností.



Obrázek 6.10 Spodní strana šablony typu E Y pod AFM mikroskopem

Druhá část probíhala na mikroskopu atomárních sil, kde byl naskenován spodní povrch šablony o velikosti 100 x 100 um. Z naměřených dat byl v programu Gwiddion vytvořen 3D model tohoto povrchu, který je zobrazen v obrázku č. 6.10 a v příloze A.8. V programu byla také změřena drsnost povrchu, která vyšla 0,123 um, což znamená, že se jedná o velmi hladký povrch. Ze 3D modelu je možné vyčíst, že nejhlubší a nejvyšší nerovnosti v povrchu jsou od -0,7 do 0,8 um, avšak větší z těchto záznamů jsou jen chyby v měření, většina nerovností se pohybuje v rozsahu $\pm 0,3$ um, a jsou pravděpodobně způsobeny kontaktem povrchu DPS a povrchu šablony.



Obrázek 6.11 Hrana apertury šablony typu E Y pod elektronovým mikroskopem

Třetí část probíhala pod elektronovým mikroskopem, kde byla šablona nafocena z obou stran. Spodní strana šablony je zobrazena v příloze A.9, na první pohled je vidět absolutně hladký povrch bez viditelných defektů. Vrchní strana je zobrazena v příloze A.10 a A.11, zde je už vidět opotřebení šablony od pohybující se stěrky, a hrany apertury nesou známky opotřebení. A.11 pak zobrazuje detailní pohled na hranu apertury, která je pravděpodobně poškozena od pohybu stěrky a pasty, jejichž abrasivní vlastnosti postupně ničí šablonu. Nejzajímavější je ovšem obrázek č. 6.9. Jedná se o fotografii vnitřní hrany apertury, konkrétně vzorku 1, apertura je označena šipkou v příloze A.16. Na vnitřní hraně apertury byly nalezeny známky oxidace. Tato oxidace může velmi negativně ovlivnit schopnost tisku pájecí pasty. Kuličky pájecí pasty se budou snáze zachytávat na vnitřních hranách apertur a způsobovat tak nedostatek pájecí pasty na plošce.

V poslední části byly vzorky podrobeny spektroskopické analýze, konkrétně měření proběhlo na hraně apertury stejně jako v případě obrázku č. 6.11. Díky tomu to měření bylo možné potvrdit rostoucí oxidaci na spodní straně hrany apertury. Také zde bylo potvrzeno složení základního materiálu šablony, což je chrom, železo a nikl. Například v příloze A.14 je vidět množství nashromážděného kyslíku právě na straně apertury kde

dochází k oxidaci. Dále je v příloze A.15 obrázek který zobrazuje pokrytí hrany cínem (Sn). Z obrázku je vidět že zbytky po pájecí pastě rovnoměrně pokrývají celou hranu apertury, to svědčí o nedostatečném nebo nekvalitním čištění šablony.

6.5 Návrhy pro další pokračování ve výzkumu

Pro další pokračování by bylo vhodné průběžné monitorování stavu jednotlivých šablon s různými povrchovými úpravami. Bylo by pak možné lépe vysledovat opravdovou životnost šablon, protože i když životnost určuje výrobce, nelze stanovit obecně pro jednu povrchovou úpravu určitou životnost. Ta závisí na nastavení tisku a dalších podmínkách výroby. Většinou se tedy určí konec životnosti šablony z výsledného hodnocení SPI. Pokud je kvalita tisku špatná a nepomáhají běžné nápravné kroky a šablona má přibližně onen počet cyklů tisku, vyhodnotí se jako nezpůsobilá. Právě tento způsob určení stavu šablony by se mohl změnit a stav životnosti šablony by se mohl kontrolovat více technickým způsobem. Šablony by tak byly testovány například po každých 10000 cyklech a z výsledných hodnot by bylo možné vyvodit spojitost mezi hydrofobností povrchu a jejím opotřebením.

Dále by bylo velmi užitečné zpracování dalších dat z výroby, konkrétně SPI a AOI. Zejména pro šablony s povrchovými úpravami, které v této práci testovány nebyly, tedy například šablona typu N Y a E Y z kapitoly 6.4. Jedná se o dva totožné návrhy a šablony mají povrchovou úpravu electro-polishingem a nano-coatingem. Tyto šablony nemohly být v této práci zpracovány, protože výroba na nich se teprve bude spuštěna. Data by byla použita pro zjištění opravdu nejideálnější povrchové úpravy, která by minimalizovala defekty při tisku. Management by tak měl lepší přehled a podklady pro následné zvolení správného řešení.

Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, bylo by vhodné provést to samé i pro měření z kapitoly 6.2. Také by bylo přínosné provést identické měření pro šablony typu N Y a E Y, a díky tomu by se dala podrobně analyzovat kvalita tisku na těchto šablonách. Vhodné by bylo se zaměřit na problematiku přenosu pájecí pasty při velmi malých aperturách, a tím by prakticky šla ověřit závislost velikosti apertur na objemu přenesené pájecí pasty. Tato data by pak mohly pomoci při výběru vhodné povrchové úpravy na základě nejmenších apertur, které se v šabloně vyskytují, a firma by tak mohla ušetřit finance.

Další možnost v pokračování se jeví u destruktivních testů. Díky datům z mikroskopie byla zjištěna oxidace vnitřních hran apertur. Zajisté by tak bylo přínosné provést podobná měření na dalších šablonách, které by se blížily ke konci životnosti. Měření by mohla přinést užitečné informace o vznikající oxidaci a její příčině nebo hloubce. Velmi důležité by bylo zjištění, kdy k této oxidaci dochází, ale k tomu by bylo nutné provést mnoho destruktivních testů se šablonami v různém stadiu životnosti. Pro tento případ by bylo vhodné vytvoření několika desítek vzorků a uměle pak simulovat cyklování a sledovat, jak se mění povrch apertur s postupným opotřebením.

7. ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zaměřila na komplexní analýzu a optimalizaci procesu šablonového tisku pájecí pasty, který je klíčový pro výrobu vysoce kvalitních a spolehlivých elektronických zařízení. V průběhu práce byly podrobně prozkoumány jednotlivé aspekty tohoto procesu, od teoretických základů až po praktické experimenty.

V první kapitole praktické části byla zpracována data z AOI a SPI pro dvě stejné šablony, ale s různou povrchovou úpravou. Byly zde použity šablony s povrchovou úpravou pomocí plasmu (typ P) a šablony s povrchovou úpravou pomocí electro-polishingu (typ E). Hlavním cílem bylo zjistit, která šablona poskytuje lepší výsledky, a zda se vyplatí investovat do dražší povrchové úpravy. Byla zde zpracována data z výroby 4484 ks DPS pro každou šablonu. Šablona s povrchovou úpravou pomocí plasmu (typ P) prokázala v mnoha ohledech lepší výkonnost než šablona s povrchovou úpravou pomocí electro-polishingu (typ E). Zlepšení v počtu chyb, doba kontroly a vyšší počet DPS bez defektů jednoznačně ukazují na vyšší kvalitu výroby a efektivitu při použití šablony typu P. I když je povrchová úprava pomocí plasmu dražší, výsledky naznačují, že investice do této technologie může být pro firmu přínosná, zejména pokud jde o snížení počtu defektů a zlepšení plynulosti výroby.

Tato kapitola se zabývá analýzou dat z SPI pro druhou stranu DPS stejného modelu jako v předchozí kapitole. Zpracovaná data pocházejí ze 100 ks DPS vyrobených v návaznosti, přičemž byly použity dvě různé povrchové úpravy šablon – plasmu (šablona typu P) a electro-polishingu (šablona typu E). Byla zkoumána průměrná výška, objem a plocha nanesené pájecí pasty v závislosti na velikosti apertur, a také posunutí pájecí pasty v osách X a Y.

Z výsledků vyplývá, že šablona typu P vykazuje lepší přenos pájecí pasty, zejména u menších apertur. Objem přenesené pasty klesá se zmenšujícím se AR, přičemž šablona typu E vykazuje horší výsledky u nejmenších apertur, což může ovlivnit kvalitu pájeného spoje. Posunutí pájecí pasty v ose X je zanedbatelné, zatímco v ose Y má šablona typu E průměrně třikrát vyšší míru posunutí než šablona typu P, ovšem tyto hodnoty jsou stále v přijatelných mezích. U apertur s AR 0,69 byla zaznamenána výrazně vyšší průměrná výška pájecí pasty, bylo zjištěno, že to je zapříčiněno změnou tloušťky step-up šablony. Celkově šablona s povrchovou úpravou pomocí plasmu lépe přenáší pájecí pastu a vykazuje vyšší kvalitu tisku.

V této kapitole byly analyzovány výsledky měření hydrofobnosti povrchu čtyř různých šablon s různými povrchovými úpravami. Měřeny byly šablony s povrchovou úpravou pomocí electro-polishingu (označené jako E X a E Y), nano-coatingu (označené jako N X) a plasma-coatingu (označené jako P Y). Měření probíhalo na spodní straně šablon pomocí obarvené destilované vody a výsledky byly analyzovány za použití mikroskopu.

Z výsledků měření vyplývá, že šablona s povrchovou úpravou nano-coatingem (N X) vykazuje nejvyšší hydrofobní vlastnosti s průměrnou hodnotou obsahu kapky 7,04 mm². Naopak šablona s povrchovou úpravou plasma-coatingem (P Y) vykázala nejhorší výsledky s průměrem 56,45 mm², což naznačuje nízké hydrofobní vlastnosti a také životnost, jelikož, zde vidět velké opotřebení povrchu již po 20000 cyklech. Šablona E Y měla průměrný obsah kapky 15,52 mm². Celkově lze konstatovat, že povrchová úprava nano-coatingem zajišťuje nejlepší hydrofobní vlastnosti, které může pozitivně ovlivnit kvalitu tisku pájecí pasty.

V poslední kapitole praktické části byla zhodnocena povrchová úprava šablony typu E X pomocí různých mikroskopických metod. Měření na konfokálním mikroskopu ukázalo drsnost spodní strany šablony 0,101 μm, což svědčí o velmi hladkém povrchu. Mikroskop atomárních sil (AFM) potvrdil tuto hladkost s drsností 0,123 μm a vytvořil 3D model povrchu. Elektronový mikroskop odhalil opotřebení vrchní strany šablony od pohybující se stěrky a oxidaci na vnitřní hraně apertury, čímž může být negativně ovlivněn tisk pájecí pasty. Spektroskopická analýza potvrdila přítomnost oxidace a složení materiálu šablony. Celkově tato měření poskytují komplexní pohled na stav a vlastnosti povrchu šablony po jejím používání.

Celkově firma dostane mnoho užitečných dat které jí pomohou při dalším rozhodování v oblasti tisku pájecí pasty a výběru vhodné povrchové úpravy šablony.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] STARÝ, J; KAHLE, P. Plošné spoje a povrchová montáž. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 208 s.
- [2] Advantech. Online. Dostupné z: <https://www.advantech.com/en/resources/case-study/automated-optical-inspection-aoi-systems-for-pcb-manufacturing>. [cit. 2023-11-12].
- [3] JOHNSON, Dick a HOFFMAN, John. EXTENDING 3D MRS SENSOR TECHNOLOGY TO ADDRESS CHALLENGING MEASUREMENT AND INSPECTION APPLICATIONS. SMTA Proceedings. 2018, s. 1-6.
- [4] VCTA. Online. 2012. Dostupné z: <https://aoi-spi.com/detection-principle-automatic-optical-inspection-aoi/>. [cit. 2023-11-14].
- [5] Etechnog. Online. 2019. Dostupné z: <https://www.etechnog.com/2019/12/exact-comparison-between-ccd-and-cmos.html>. [cit. 2023-11-14].
- [6] XD7600NT Ruby FP - Flat Panel X-Ray Inspection System. Online. Smtnet. Dostupné:https://smtnet.com/company/index.cfm?fuseaction=view_company&company_id=48999&component=catalog&catalog_id=23149. [cit. 2023-11-14].
- [7] MACLEOD, Ross. A Comprehensive Guide to the Design and Manufacture of Printed Board Assemblies. 2. Electrochemical publications, 1999. ISBN 0901150339.
- [8] HUI, Tak-Wai; PANG, Grantham Kwok-Hung. Solder paste inspection using region-based defect detection. The International journal of advanced manufacturing technology, 2009, 42: 725-734.
- [9] WU, Xinyu, et al. A new solder paste inspection device: Design and algorithm. In: Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2007. p. 680-685.
- [10] BENEDEK, Csaba, et al. Solder paste scooping detection by multilevel visual inspection of printed circuit boards. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60.6: 2318-2331.
- [11] TAHA, E. Mahmoud; EMARY, Eid; MOUSTAFA, Khalid. Automatic optical inspection for PCB manufacturing: A survey. International Journal of Scientific and Engineering Research, 2014, 5.7: 1095-1102.
- [12] DAI, Wenting, et al. Soldering defect detection in automatic optical inspection. Advanced Engineering Informatics, 2020, 43: 101004.
- [13] WANG, Wei-Chien, et al. A machine vision based automatic optical inspection system for measuring drilling quality of printed circuit boards. IEEE access, 2016, 5: 10817-10833.
- [14] PRAMUDITA, Resa; HARIADI, Farkhad Ihsan. Development of techniques to determine object shifts for pcb board assembly automatic optical inspection (aoi). In: 2018 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD). IEEE, 2018. p. 1-4.

- [15] MOGANTI, Madhav; ERCAL, Fikret. Automatic PCB inspection systems. *IEEE Potentials*, 1995, 14.3: 6-10.
- [16] HOUDEK, Cal; DESIGN, Caltronics. Inspection and testing methods for PCBs: An overview. *Engineer/OwnerCaltronics Design & Assembly*, 2016.
- [17] NEUBAUER, Claus. Intelligent X-ray inspection for quality control of solder joints. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part C*, 1997, 20.2: 111-120.
- [18] PIERCE, Bennie L., et al. Automated inspection of through hole solder joints utilizing X-ray imaging. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1994, 9.2: 28-32.
- [19] LITWILLER, Dave. Ccd vs. cmos. *Photonics spectra*, 2001, 35.1: 154-158.
- [20] WALTHAM, Nick. CCD and CMOS sensors. *Observing Photons in Space: A Guide to Experimental Space Astronomy*, 2013, 423-442.
- [21] M. Haupt, C. Oehr, R. Ruhfaß, R. Schmidt "Entwicklung von Antihafschichten auf Schablonen zur Optimierung von Druckprozessen in der Mikroelektronik“, Tagungsband Elektronische Baugruppen – Aufbau und Fertigungstechnik – Erfolg durch Innovation, 2006, Fellbach, Germany
- [22] STEPPUTAT, Vincent N., et al. Investigation of post-processing of additively manufactured nitinol smart springs with plasma-electrolytic polishing. *Materials*, 2021, 14.15: 4093.
- [23] NESTLER, Klaus, et al. Plasma electrolytic polishing—an overview of applied technologies and current challenges to extend the polishable material range. *Procedia Cirp*, 2016, 42: 503-507.
- [24] JACQUET, P. A. The mechanism of electrolytic polishing of Copper. *CR Acad Sci*, 1936, 202: 402.
- [25] DUBROVSKI, Oles, et al. The Enhancement of Ion Transport in an Electrochemical Cell Using High Frequency Vibration for the Electropolishing of Copper. *Journal of The Electrochemical Society*, 2018, 165.5: E236.
- [26] HAN, Wei; FANG, Fengzhou. Fundamental aspects and recent developments in electropolishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 139: 1-23.
- [27] DURAIRAJ, R., et al. Rheological characterisation and printing performance of Sn/Ag/Cu solder pastes. *Materials & Design*, 2009, 30.9: 3812-3818.
- [28] DURAIRAJ, R.; NGUTY, T. A.; EKERE, N. N. Critical factors affecting paste flow during the stencil printing of solder paste. *Soldering & Surface Mount Technology*, 2001, 13.2: 30-34.
- [29] HUANG, Chien-Yi, et al. The solder paste printing process: critical parameters, defect scenarios, specifications, and cost reduction. *Soldering & surface mount technology*, 2011, 23.4: 211-223.
- [30] Momentum II BTB. Online. Etek europe. 2015. Dostupné z: <https://etek-europe.com/machines/momentum-btb-printer/>. [cit. 2024-01-02].

- [31] FA23 AUTOMATIC OFFLINE PRINTER. Online. In: Elas. 2016. Dostupné z: <https://elas.hu/en/prod/fa23-automata-offline-nyomtato/>. [cit. 2024-01-02].
- [32] Premium printer YSP10 Feature. Online. In: Yamaha motor. Dostupné z: <https://global.yamaha-motor.com/business/smt/printer/ysp10/feature/>. [cit. 2024-01-02].
- [33] Types of solder pastes. Why do we need different sizes of balls? Which flux to choose in the paste? Online. In: Linkedin. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/types-solder-pastes-why-do-we-need-different-sizes-balls-khramtsov>. [cit. 2024-01-02].
- [34] SOLDER PASTE PRINTING PROCESS. Online. In: SURFACE MOUNT PROCESS. Dostupné z: <https://www.surfacemountprocess.com/solder-paste-printing-process.html>. [cit. 2024-01-02].
- [35] RoHS Compliant Rosin Reflow Soldering Pb Free Solder Paste for SMD Components. Online. In: Made in china. Dostupné z: <https://xfsolder.en.made-in-china.com/productimage/tdyaTiAGuRVx-2f1j00QvYVlwdKlGbn/China-RoHS-Compliant-Rosin-Reflow-Soldering-Pb-Free-Solder-Paste-for-SMD-Components.html>. [cit. 2024-01-02].
- [36] SMT Automatic Solder Paste Mixer Solder Cream Mixer ZB500S for Repair PCB. Online. In: Ebay. Dostupné z: https://www.ebay.co.uk/itm/386210787372?chn=ps&_ul=GB&norover=1&mkevt=1&mkrid=710-170020-536818-2&mkcid=2&itemid=386210787372&targetid=293946777986&device=c&mktype=pla&googleloc=9062850&poi=&campaignid=20787991657&mkgroupid=157350415082&rlsataarget=pla-293946777986&abcId=&merchantid=5088343060&gclid=Cj0KCQiAhc-sBhCEARIsAOVwHuRRdrKTmPLyMlz8KevahKhZPRS6-nKJN-B-IoQek6w4XsGLPh3p9xkaAkFmEALw_wcB. [cit. 2024-01-02].
- [37] LASER CUT STAINLESS STEEL STENCILS. Online. In: Laserjob. Dostupné z: <https://www.laserjob.com/smd-stencils/stainless-steel-stencil.html>. [cit. 2024-01-02].
- [38] SMT-Stencils-Promotion. Online. In: Pcbunlimited. Dostupné z: <https://pcbunlimited.com/SMT-Stencils-Promotion>. [cit. 2024-01-02].
- [39] KEY FEATURES of KOH YOUNG 3D SPI Patented Dual Light Projection System. Online. In: Nmtronics. Dostupné z: <https://www.nmtronics.com/smt/koh-young.html>. [cit. 2024-01-02].
- [40] COLEMAN, William. Stencil Considerations for Miniature Components. Proc of SMTA International, 2009, 2009.
- [41] OOSTERHOF, Ahne; SCHMIDT, Stephan. SOLDER PASTE STENCIL MANUFACTURING METHODS AND THEIR IMPACT ON PRECISION AND ACCURACY. 2011.
- [42] BURGESS, Michael R.; COLEMAN, William E. Electroformed vs. Laser-cut: A Stencil Performance Study. SMT-TULSA-, 2007, 21.6: 23.

- [43] LEE, Yong-Won; KIM, Keun-Soo; SUGANUMA, Katsuaki. The behaviour of solder pastes in stencil printing with electropolishing process. *Soldering & Surface Mount Technology*, 2013, 25.3: 164-174.
- [44] DURAIRAJ, R., et al. Correlation of solder paste rheology with computational simulations of the stencil printing process. *Soldering & Surface Mount Technology*, 2002, 14.1: 11-17.

Příloha A - Naměřené data, grafy a obrázky

A.1 Tabulka naměřených hodnot

šablona_electropolished_Y

E Y	m1[g]	m2[g]	m[g]	S[mm2]	mp[g]	Sp[mm2]
1	82,8391	82,8167	0,0224	12,58	0,02	14,09
2	82,8399	82,8164	0,0235	18,61	0,02	21,87
3	82,834	82,8154	0,0186	22,73	0,02	21,14
4	82,8387	82,8152	0,0235	9,65	0,02	11,34
5	82,8393	82,8147	0,0246	8,27	0,02	10,17
6	82,8386	82,8141	0,0245	15,21	0,02	18,63
7	82,8373	82,8137	0,0236	9,64	0,02	11,38
8	82,8381	82,8144	0,0237	15,58	0,02	18,46
9	82,8373	82,8148	0,0225	14,67	0,02	16,50
10	82,8394	82,815	0,0244	9,51	0,02	11,60
mimo	82,8375	82,8148	0,0227	5,01	0,02	5,69
Průměr			0,0231	13,65		15,52

A.2 Tabulka naměřených hodnot

šablona_nanocoating_Y

N Y	m1[g]	m2[g]	m[g]	S[mm2]	mp[g]	Sp[mm2]
1	82,8443	82,8204	0,0239	13,5	0,02	16,13
2	82,8445	82,8222	0,0223	11,06	0,02	12,33
3	82,8462	82,8235	0,0227	8,49	0,02	9,64
4	82,8449	82,8253	0,0196	9,82	0,02	9,62
5	82,8464	82,8228	0,0236	3,11	0,02	3,67
6	82,8417	82,8211	0,0206	2,63	0,02	2,71
7	82,845	82,8223	0,0227	2,46	0,02	2,79
8	82,8435	82,82	0,0235	4,74	0,02	5,57
9	82,8439	82,8194	0,0245	2,91	0,02	3,56
10	82,8433	82,8194	0,0239	3,66	0,02	4,37
mimo	82,8433	82,8196	0,0237	9,27	0,02	10,98
Průměr			0,0227	6,24		7,04

A.3 Tabulka naměřených hodnot

šablona_electropolished_X

E X	m1[g]	m2[g]	m[g]	S[mm2]	mp[g]	Sp[mm2]
1	82,8347	82,8127	0,022	5,5	0,02	6,05
2	82,8378	82,8142	0,0236	6,94	0,02	8,19
3	82,8368	82,8145	0,0223	6,02	0,02	6,71
4	82,8373	82,8133	0,024	6,49	0,02	7,79
5	82,8366	82,8134	0,0232	5,64	0,02	6,54
6	82,839	82,8144	0,0246	5,25	0,02	6,46
7	82,8364	82,8137	0,0227	6,33	0,02	7,18
8	82,8376	82,8149	0,0227	8,18	0,02	9,28
9	82,8385	82,8149	0,0236	6,67	0,02	7,87
10	82,8386	82,8158	0,0228	6,87	0,02	7,83
mimo	82,8391	82,8156	0,0235	10,86	0,02	12,76
Průměr			0,0231	6,39		7,39

A.4 Tabulka naměřených hodnot

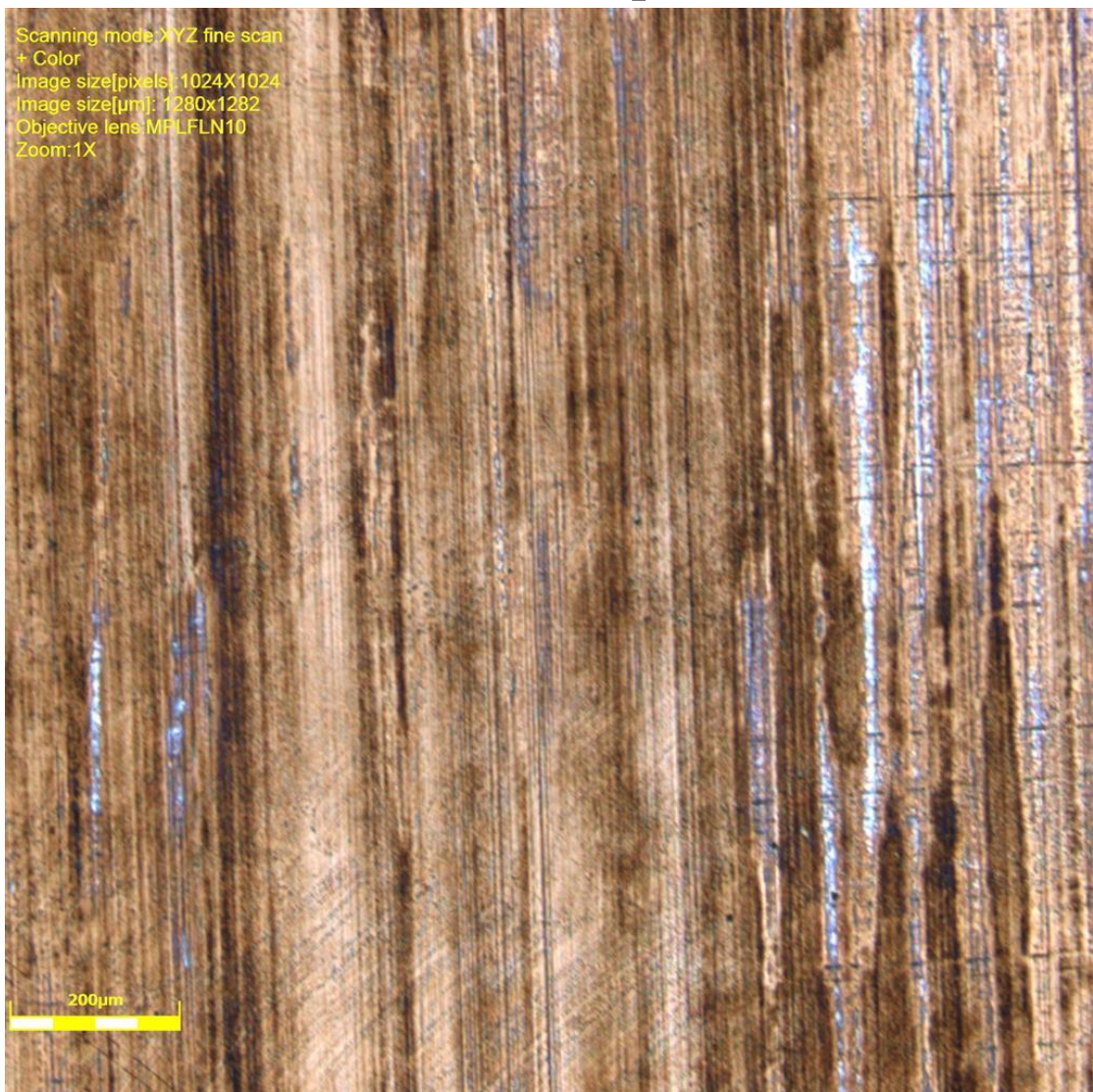
šablona_plasmacoating_X

P X	m1[g]	m2[g]	m[g]	S[mm2]	mp[g]	Sp[mm2]
1	82,8425	82,8189	0,0236	43,31	0,02	51,11
2	82,8432	82,8194	0,0238	69,04	0,02	82,16
3	82,8443	82,8206	0,0237	30,04	0,02	35,60
4	82,8462	82,8203	0,0259	45,84	0,02	59,36
5	82,8435	82,8204	0,0231	47,44	0,02	54,79
6	82,8441	82,821	0,0231	41,42	0,02	47,84
7	82,845	82,8225	0,0225	41,19	0,02	46,34
8	82,8454	82,8218	0,0236	49,07	0,02	57,90
9	82,8455	82,8225	0,023	76,05	0,02	87,46
10	82,8447	82,8215	0,0232	36,16	0,02	41,95
mimo	82,8461	82,8216	0,0245	7,57	0,02	9,27
Průměr			0,0235	47,96		56,45

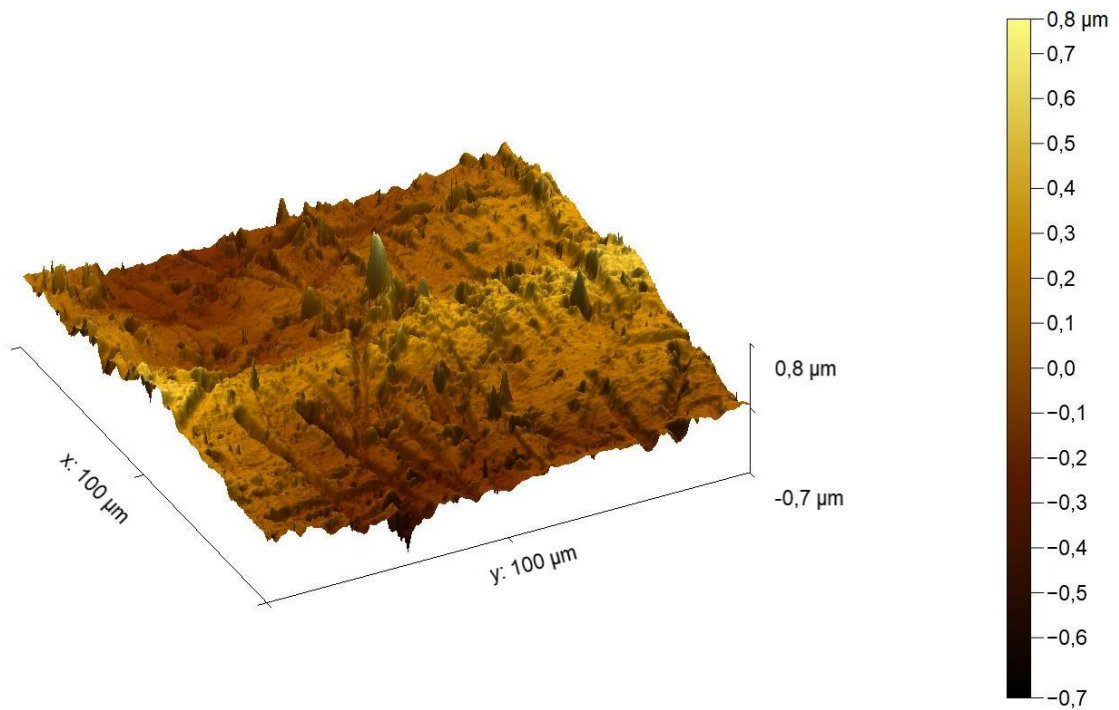
A.5 Spodní strana šablony typu E X pod konfokálním mikroskopem



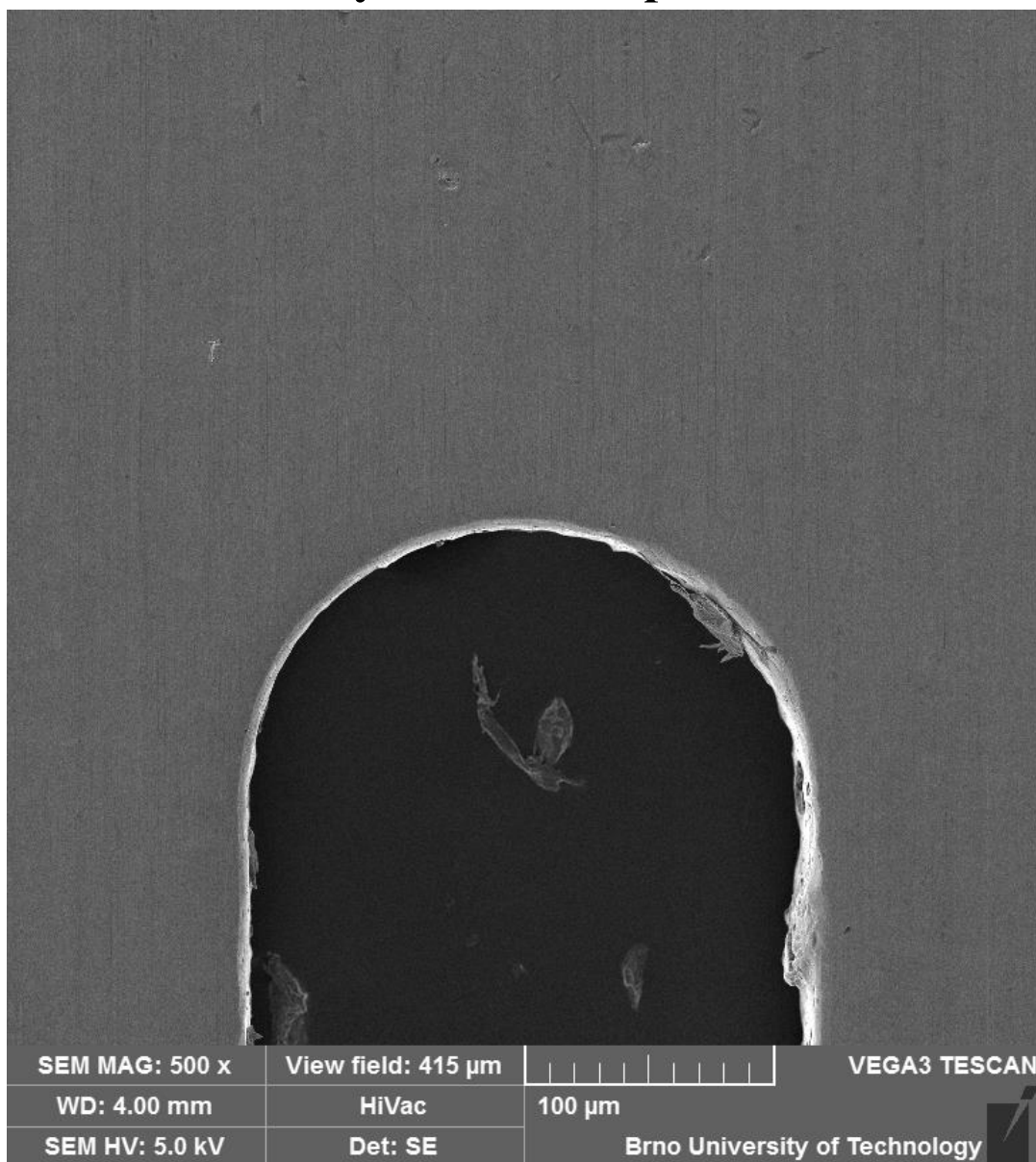
A.6 Vrchní strana šablony typu E X pod konfokálním mikroskopem



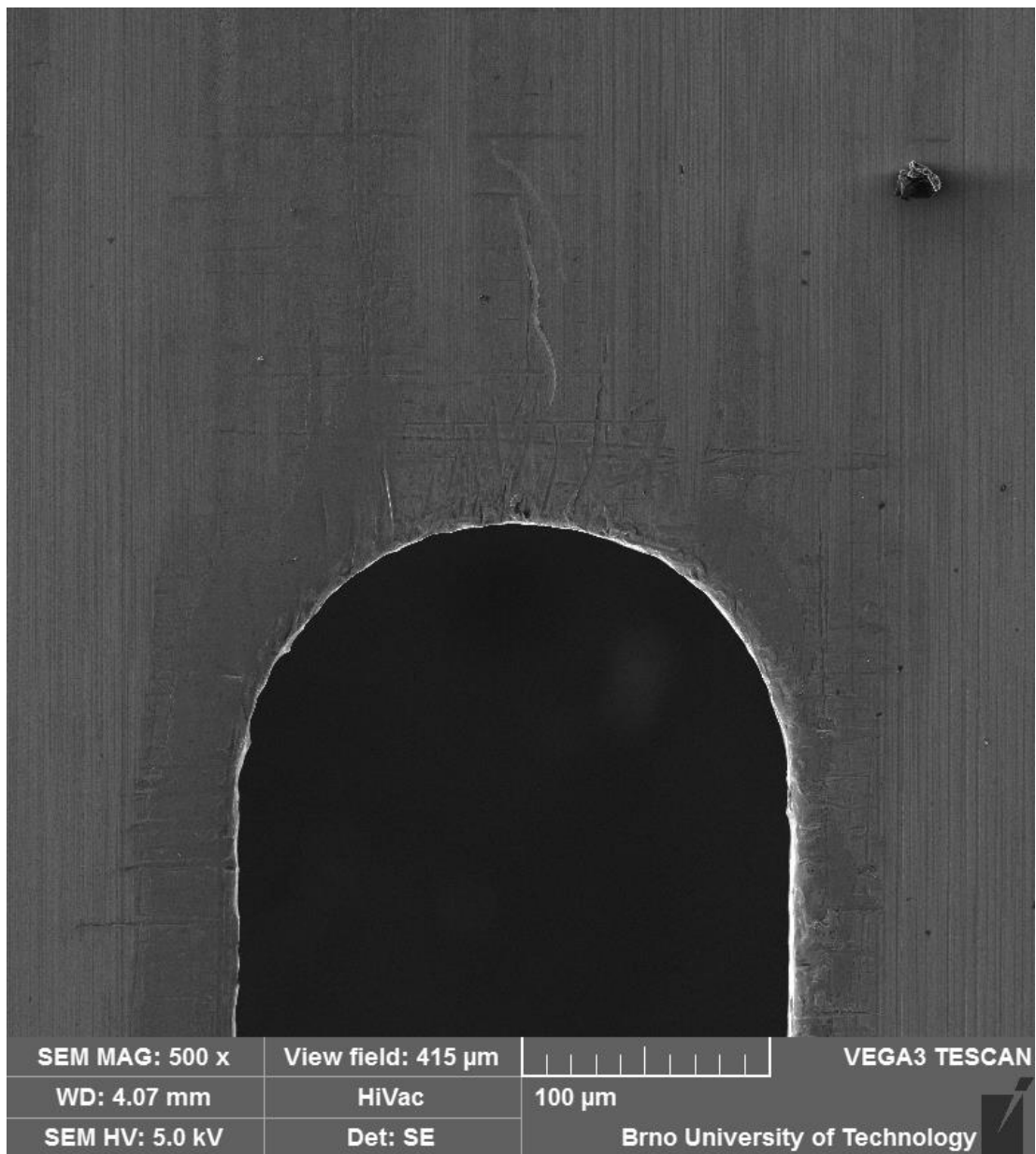
A.8 Spodní strana šablony typu E X pod AFM mikroskopem



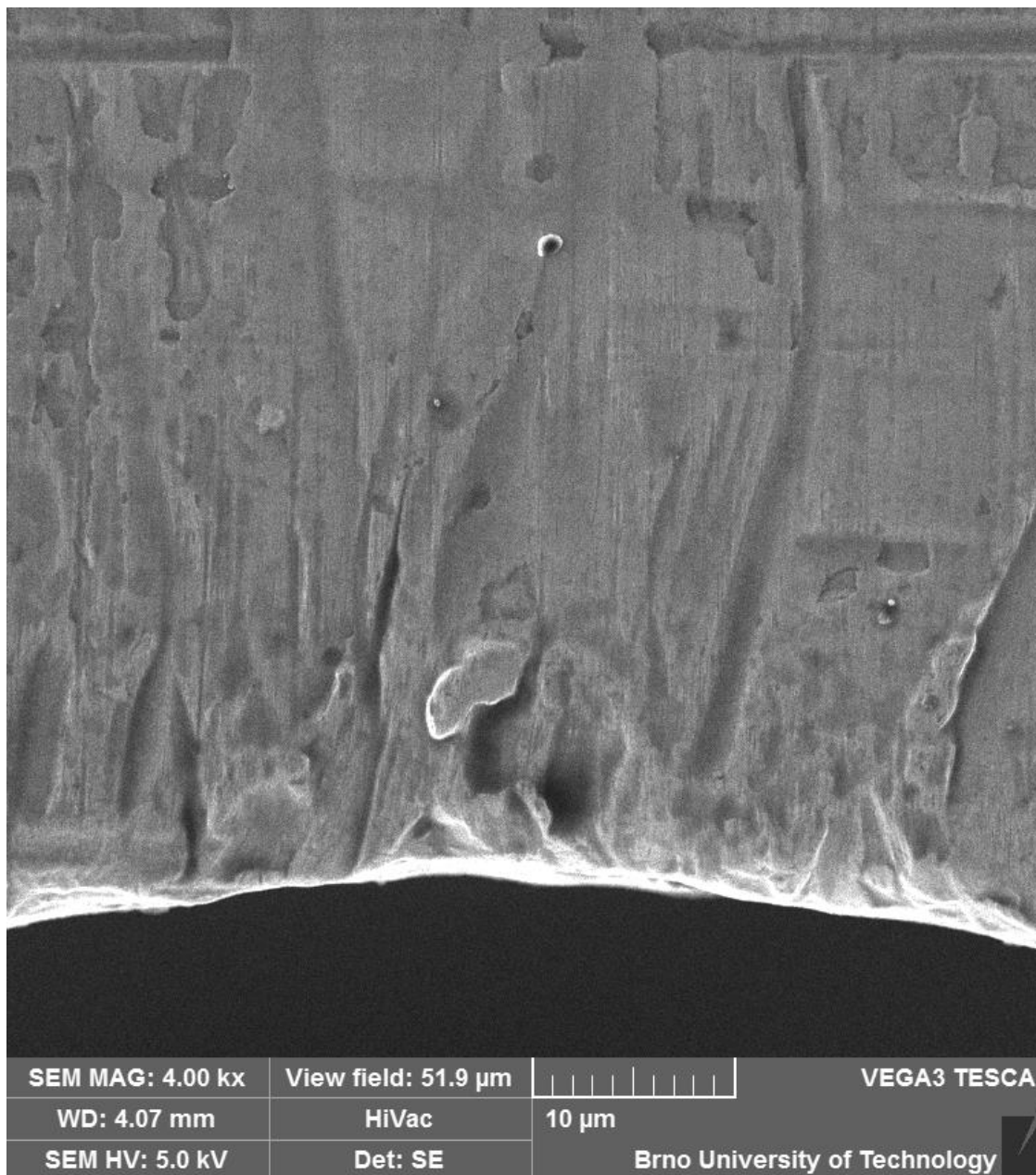
A.9 Spodní strana šablony typu E X pod elektronovým mikroskopem



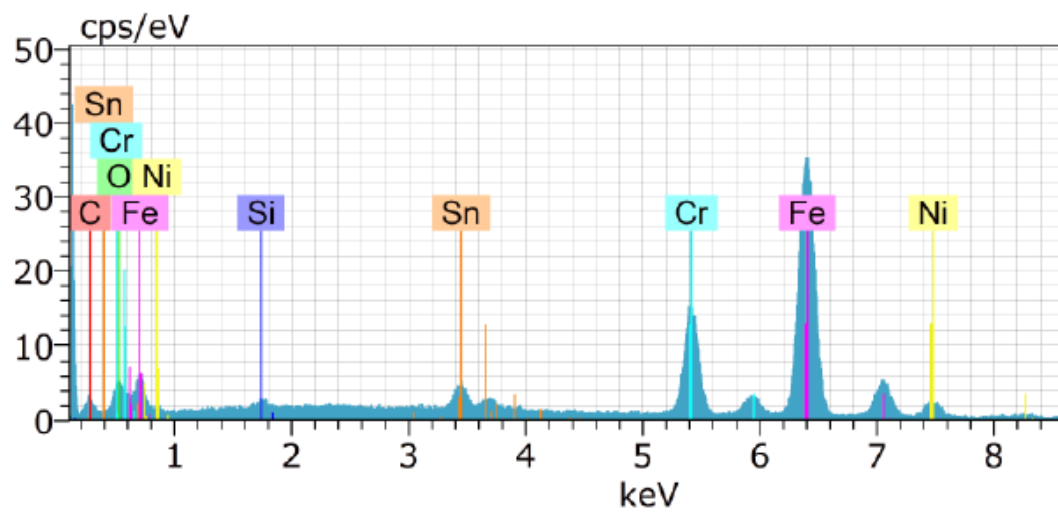
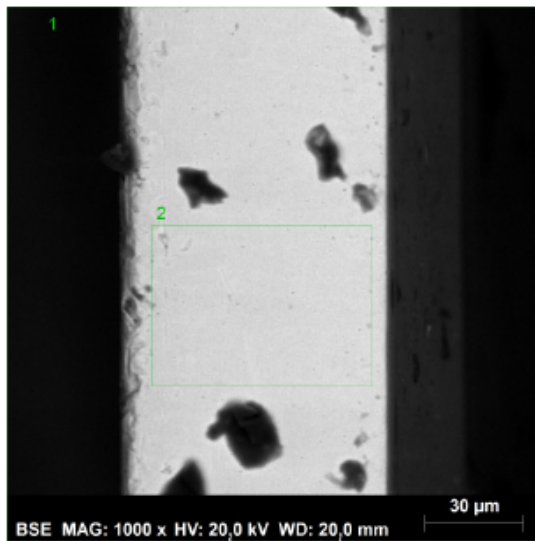
A.10 Vrchní strana šablony typu E X pod elektronovým mikroskopem



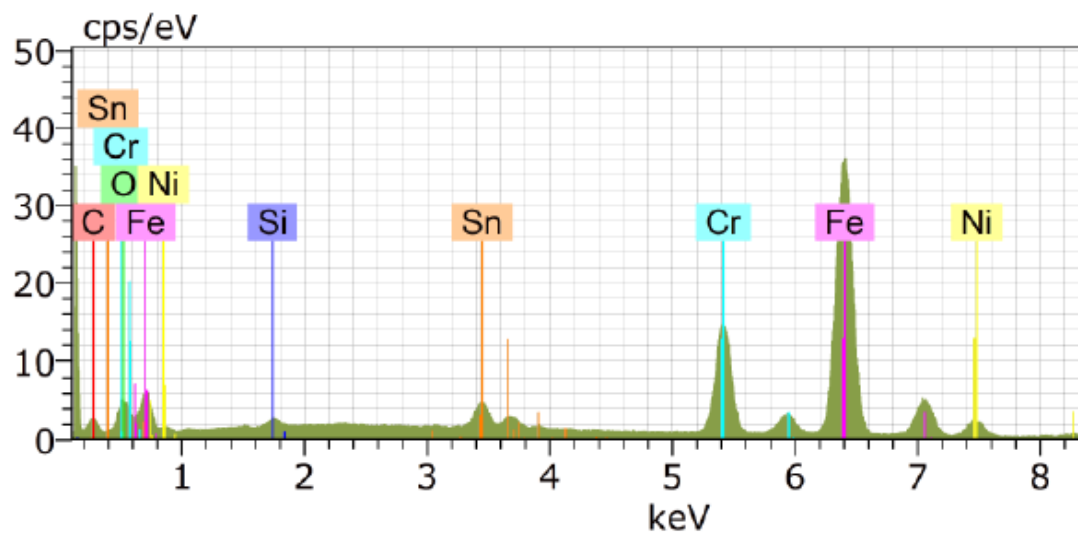
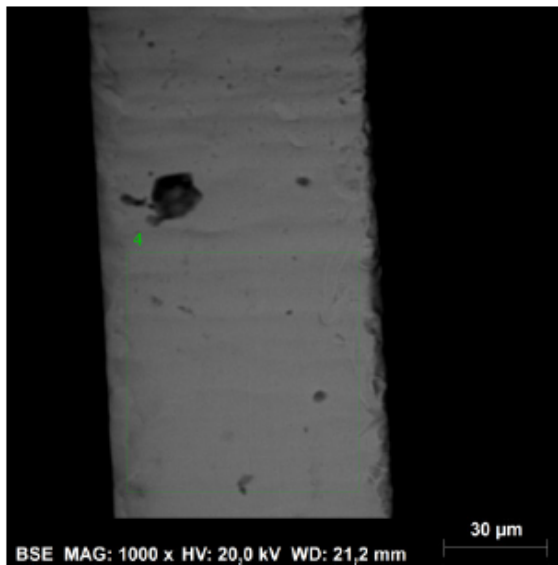
A.11 Vrchní strana šablony typu E X pod elektronovým mikroskopem



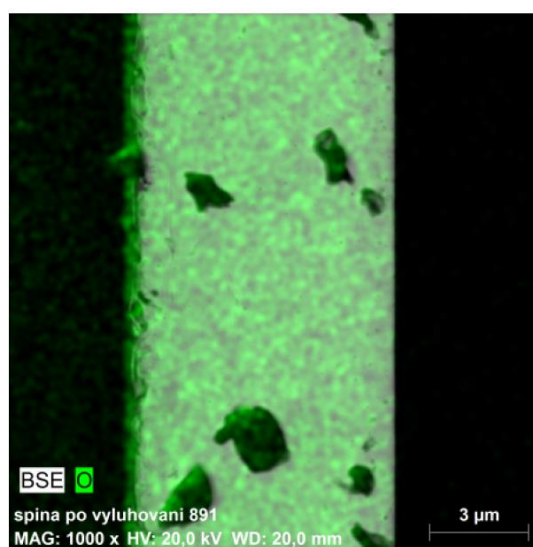
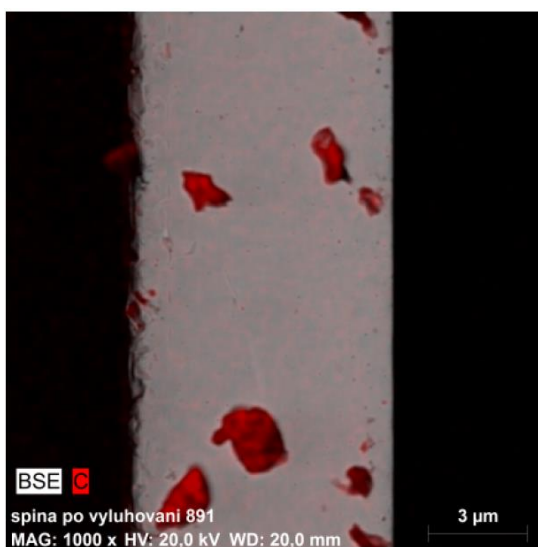
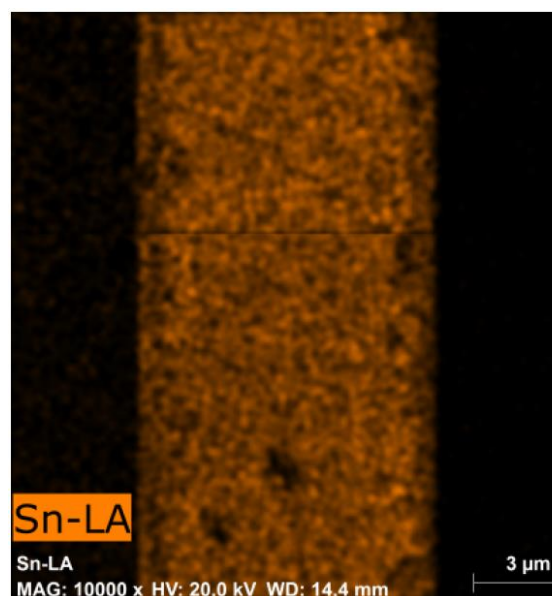
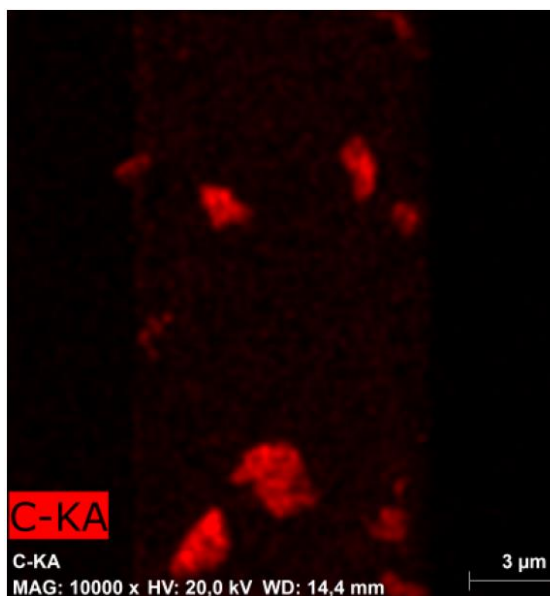
A.12 Spektroskopická analýza vzorek 1



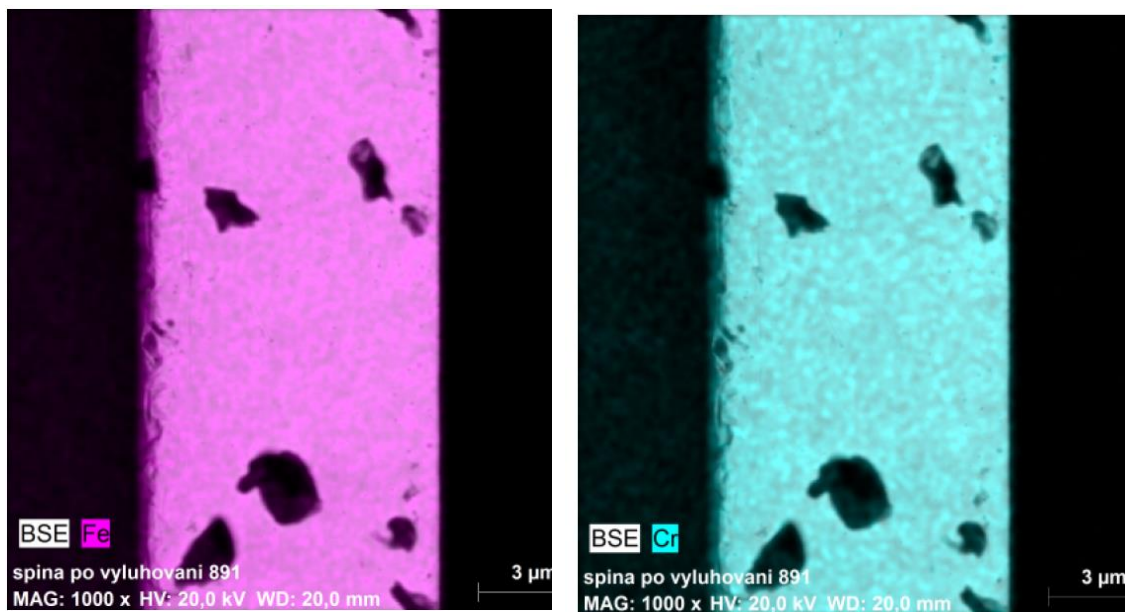
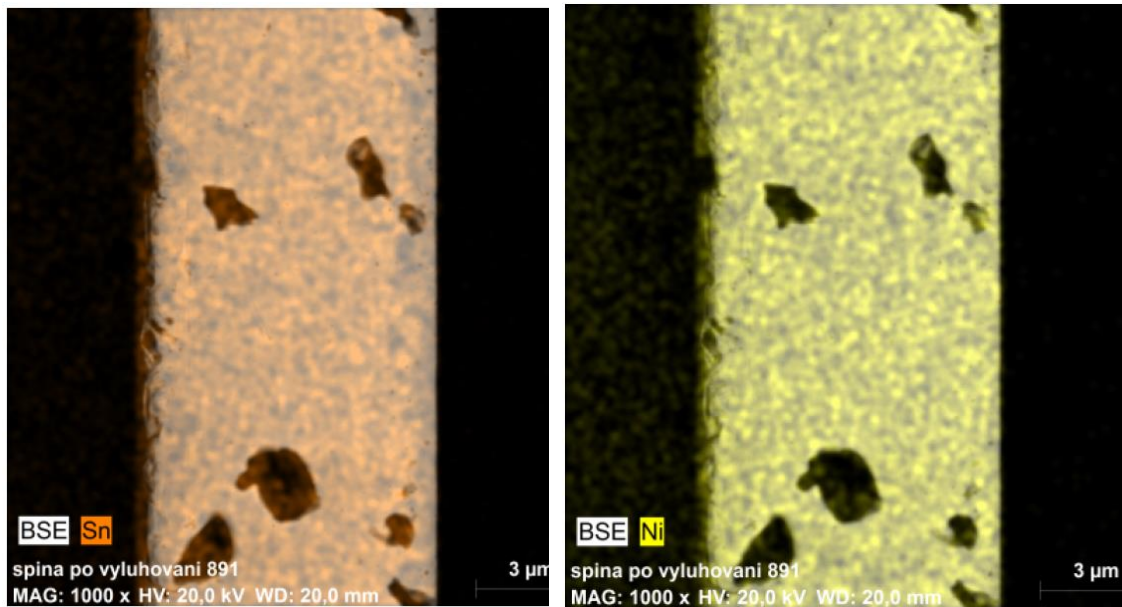
A.13 Spektroskopická analýza vzorek 2



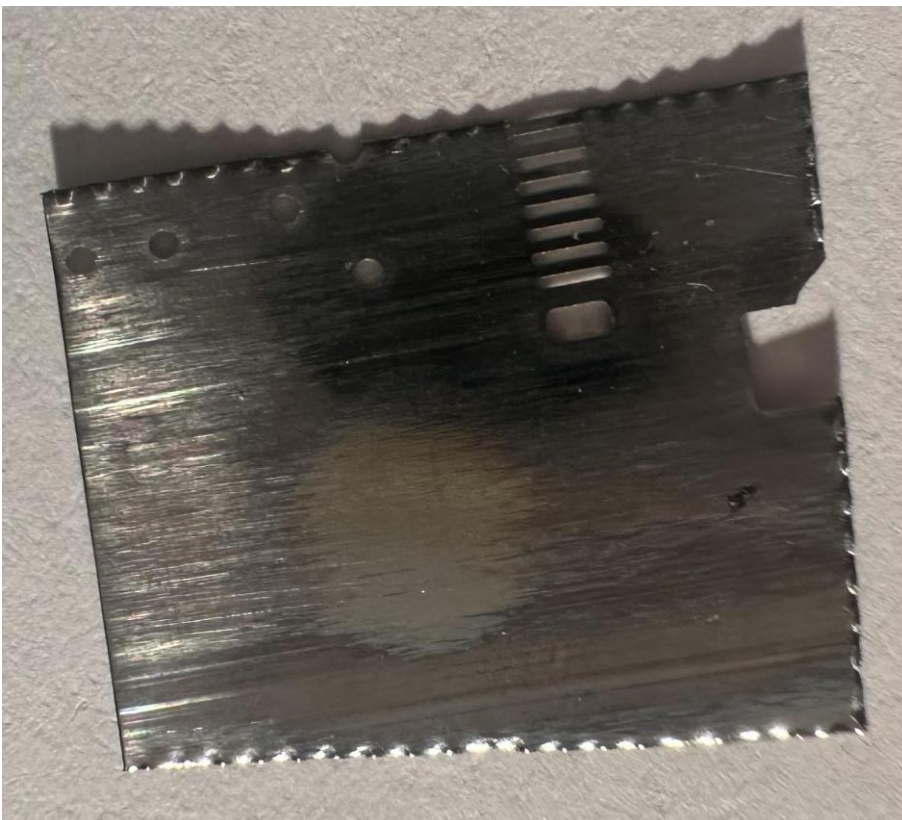
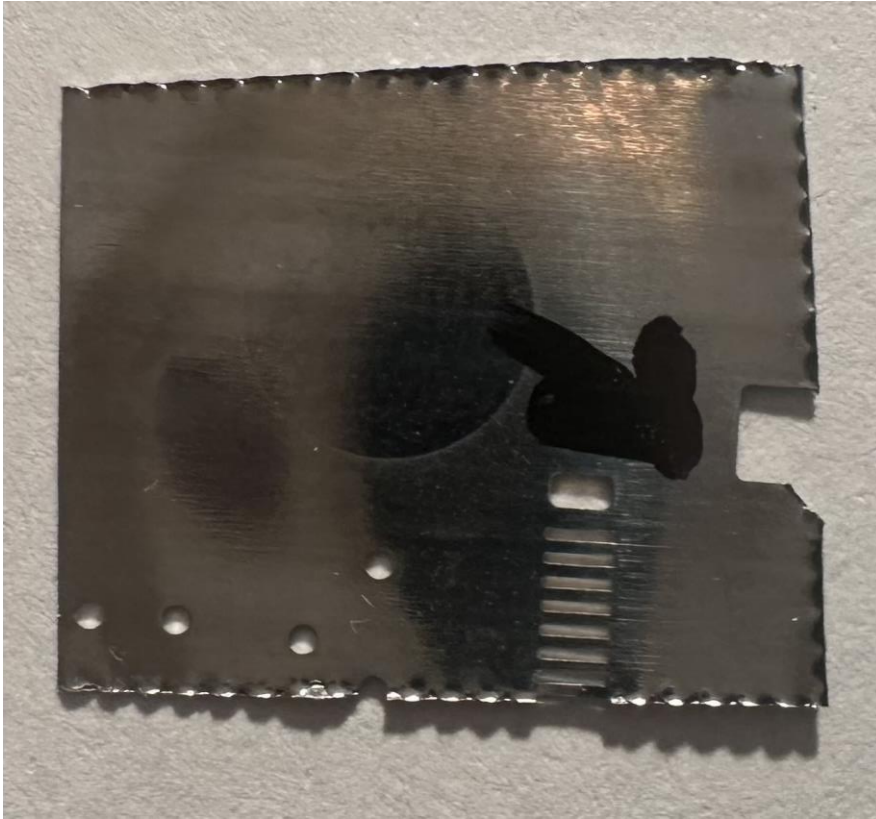
A.14 Spektroskopická analýza Vzorek 1 C



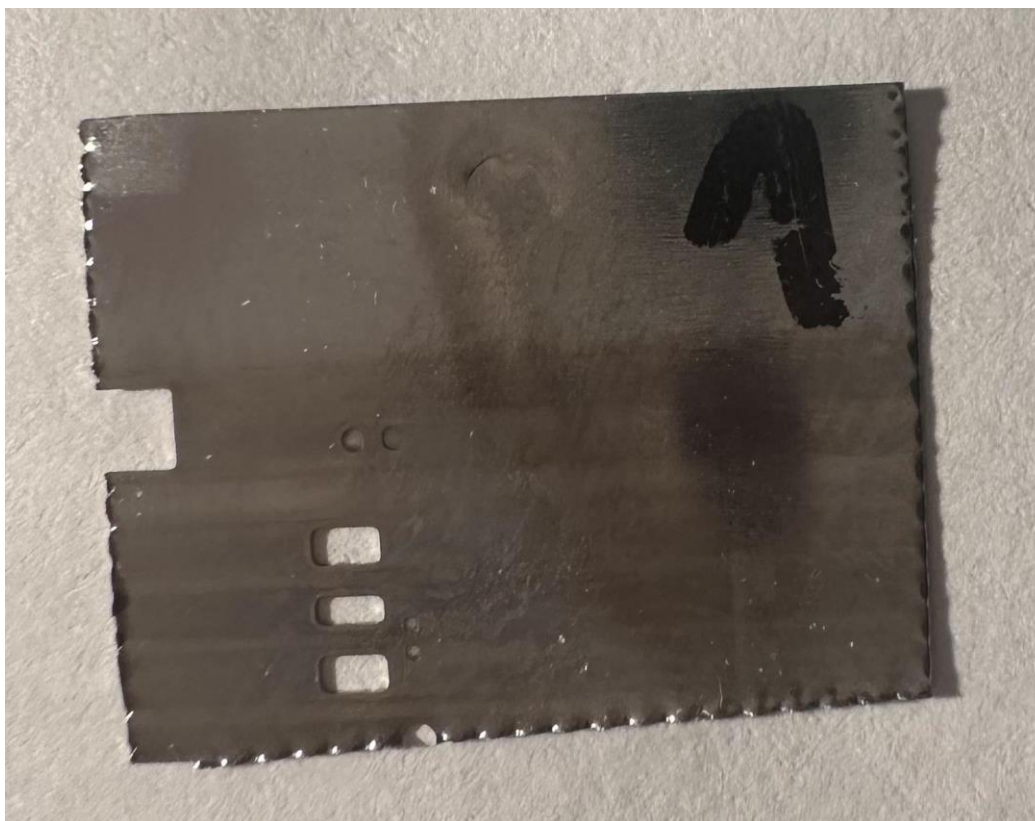
A.15 Spektroskopická analýza Vzorek 1 C



A.16 Vzorek šablony typu E X 1



A.17 Vzorek šablony typu E X 2



A.18 Graf ke kapitole 6.1 zobrazení množství kusů DPS s určitým počtem naměřených chyb pro defekt Volume

