

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Metody pájení na tištěné vodivé motivy

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek ŘÍHA**
Osobní číslo: **E16B0202P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Metody pájení na tištěné vodivé motivy**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

1. Popište vhodné metody pájení pro tištěnou elektroniku.
2. Zpracujte přehled vhodných pájitelných tiskových past a inkoustů.
3. Vyhledejte vhodné pájecí slitiny.
4. Ověřte vhodné úpravy povrchu tištěných vrstev pro zvýšení pájitelnosti.
5. Na testovacích motivech ověřte pájitelnost.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

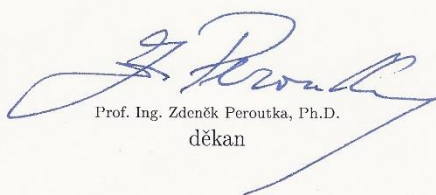
Seznam odborné literatury:

1. KLEIN WASSINK, R. J. Soldering in Electronics: Comprehensive Treatise on Soldering Technology for Surface Mounting and Through-hole Techniques. 2nd ed. Port Erin: Electrochemical Publications, 1994. 753 s. ISBN 0-901150-24-X
2. MACH, Pavel, SKOČIL, Vlastimil a URBÁNEK, Jan. Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 440 s. ISBN 80-01-02392-3
3. elektronické informační zdroje

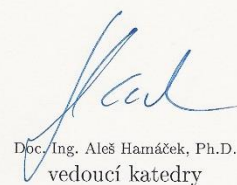
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Hlína
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 13. června 2019


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




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

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

V této bakalářské práci jsou popsány obecné informace o tištěné elektronice. Je zde také popsána problematika tisku a vhodné metody pájení pro tištěnou elektroniku. Dále je zde zpracován přehled vhodných tiskových past, inkoustů a pájecích slitin.

Praktická část je zaměřena na ověřování úprav povrchu tištěných vrstev pro zvýšení pájitelnosti. Dále je zde ověřována pájitelnost na vybraných testovacích motivech.

Klíčová slova

Tištěná elektronika, pájení, pasta, inkoust, pájecí slitina, pájitelnost, olovo, cín, stříbro, měď, sítotisk, inkoustový tisk, pájení přetavením, pájení laserem, fotonické pájení

Abstract

This bachelor thesis describes general information about concept of printed electronics. It also compiles problematics of printing and suitable methods of soldering for printed electronics. There is written up a summary of suitable print pastes, inks and soldering alloys.

The practical part deals with verification of the surface treatment of printed layers for increasing the solderability. Then the solderability is tested on selected themes.

Key words

Printed electronics, soldering, paste, ink, soldering alloy, solderability, lead, tin, silver, copper, screen printing, inkjet printing, reflow soldering, laser soldering, photonic soldering

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 11.6.2019

Marek Říha

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Hlínovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Hirmanovi, Ph.D a panu doc. Ing. Řebounovi, Ph.D za odbornou pomoc při realizaci praktické části.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 TIŠTĚNÁ ELEKTRONIKA	12
1.1 VÝROBA TIŠTĚNÉHO MOTIVU – TLUSTOVRSTVÁ TECHNOLOGIE	13
1.1.1 Fotonické vytvrzování	15
1.1.2 Tepelné vytvrzování	16
1.2 TISK	16
1.3 KONTAKTNÍ TISKOVÉ TECHNOLOGIE	16
1.3.1 Sítotisk	16
1.3.2 Flexotisk	17
1.3.3 Hlubotisk	17
1.4 BEZKONTAKTNÍ TISKOVÉ TECHNOLOGIE	18
1.4.1 LDW	18
1.4.2 Aerosol Jet Printing	19
1.4.3 Inkjet	19
1.5 VODIVÝ INKOUST	21
1.6 VÝHODY TIŠTĚNÉ ELEKTRONIKY	22
2 METODY PÁJENÍ	23
2.1 RUČNÍ PÁJENÍ	24
2.2 PÁJENÍ PŘETAVENÍM	25
2.2.1 Pájení infračerveným zářením	26
2.2.2 Pájení laserem	27
2.2.3 Pájení v horkých parách	29
2.2.4 Pájení horkým vzduchem	30
2.3 FOTONICKÉ PÁJENÍ	31
3 TISKOVÉ PASTY A INKOUSTY	32
3.1 PŘEHLED INKOUSTŮ	32
3.2 PŘEHLED PAST	33
4 PÁJECÍ SLITINY	36
4.1 TEKUTÉ KOVOVÉ SLITINY	36
4.2 NÍZKOTEPLNÍ SLITINY	36
4.3 NÍZKOTEPLNÍ PÁJECÍ SLITINY	36
5 PRAKTICKÁ ČÁST	39
5.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ	39
5.1.1 První vzorek – Pájení přetavením	40
5.1.2 Druhý vzorek – Pájení v horkých parách	41
5.1.3 Třetí vzorek – Ruční pájení	42
5.1.4 Čtvrtý vzorek – Pájení na papír	43
5.2 OPTIMALIZACE EXPERIMENTŮ	45
5.2.1 Pájení přetavením	46
5.2.2 Pájení v horkých parách	47
5.2.3 Ruční pájení	47
5.2.4 Pájení horkým vzduchem	48

ZÁVĚR	51
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	52
PŘÍLOHY	1

Úvod

Tato bakalářská práce popisuje v dnešní době velice rozšířené téma, kterým je tištěná elektronika. Tento obor zaznamenal prudký nárůst zájmu během několika let a nadále se počítá s jeho rozvojem a přínosem do budoucna.

Práce je rozdělena na několik hlavních částí. První část popisuje, co vlastně znamená pojem tištěná elektronika a kde najde své uplatnění. Je zde také uvedena výroba tištěného motivu pomocí zmíněné technologie a následného vytvrzení. Důležitou část pak tvoří samotný tisk. Proto jsou zde zpracovány vhodné metody tisku. Dále je v této části popsána problematika vodivého inkoustu a jsou zde také popsány výhody, které nám tištěná elektronika nabízí.

Druhá část se již zabývá samotným pájením. Jsou zde uvedeny podmínky pro vznik pájeného spoje, je zde popsána problematika smáčivosti a jsou zde uvedeny hodnoty kontaktního úhlu. Poté následují již samotné metody pájení, které jsou vhodné pro tištěnou elektroniku.

Ve třetí části je podrobně popsán přehled vhodných tiskových past a inkoustů. Jsou zde také popsány jednotlivé společnosti, které se zabývají samotnou výrobou a distribucí.

Poslední teoretickou část tvoří pájecí slitiny. Tato oblast je převážně zaměřena na nízkoteplotní slitiny. Jsou zde uvedeny příklady nízkoteplotních pájek, které v této oblasti najdou své uplatnění.

Praktická část je zaměřena na ověřování pájitelnosti pomocí různých metod pájení. Je zde testována pájitelnost na dvou vybraných testovacích motivech a jsou zde uvedeny hodnoty smáčecího úhlu.

Seznam symbolů a zkratek

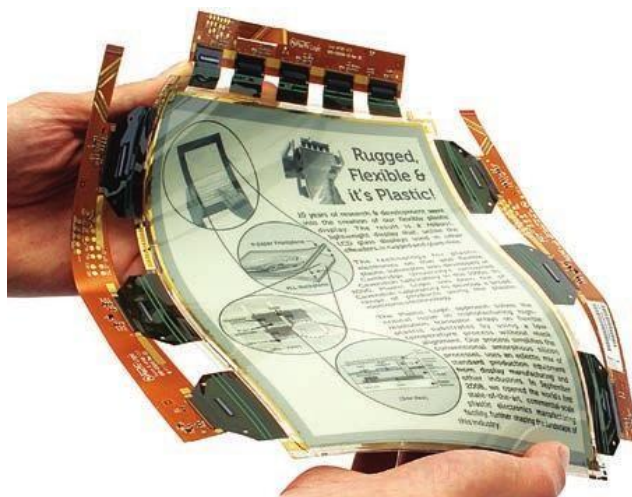
Ag	Stříbro
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
BGA.....	Ball Grid Array [typ pouzdra integrovaného obvodu]
Bi	Bismut
Ga	Gallium
Cd	Kadmium
CO ₂	Oxid uhličitý
DPS.....	Deska plošného spoje
EKG	Elektrokardiografie
FR4	Kompozitní materiál
In.....	Indium
IR	Infračervené záření
LED	Light-Emitting Diode [elektroluminiscenční dioda]
MEA	Microelectrode Array [mikroelektrodové pole]
OLED	Organic Light-emitting Diode [organická světelná dioda]
Pb.....	Olovo
PET.....	Polyethylentereftalát
RFID.....	Radio-frequency Identification [identifikace na rádiové frekvenci]
R2R	Roll-to-roll
SEM	Scanning Electron Microscope [rastrovací elektronový mikroskop]
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell [palivové články na bázi pevných oxidů]
Sn.....	Cín
UV	Ultrafialové záření
W	Watt
°C.....	Stupeň Celsia
ms	Milisekunda
nm	Nanometr
s.....	Sekunda
µm	Mikrometr

1 Tištěná elektronika

Tištěná elektronika je jednou z nejrychleji rostoucích technologií na světě. Nachází uplatnění v různorodých odvětvích, jako jsou například zdravotnictví, letectví a mnoho dalších [1]. Jak již vyplývá z názvu, tištěná elektronika je skutečně tištěná, a to různými technologiemi na různé materiály [2].

K tisku mohou být použity rotační tiskárny (masová výroba), sítotisk nebo také inkjet tiskárny. Lze tisknout na různé substráty jako například papír, fólii, sklo atd. Fólie mají různé vlastnosti a mnohé z nich jsou vyvinuty speciálně pro tištěnou elektroniku. Mohou být vodivé a dokonce i průhledné. Tyto folie se používají například pro výrobu dotykových displejů. [2]

Při výrobě tištěné elektroniky se mohou tisknout jak pasivní, tak aktivní součástky jako například tranzistory, LED, solární buňky atd. Výsledkem mohou být displeje (viz Obr. 1), antény pro RFID, solární panely atd. Pokud jako nosný materiál použijeme fólii, může být natištěná elektronika ohebná. Vše ale také závisí i na použité pastě, která musí vydržet samotný ohyb. [2]

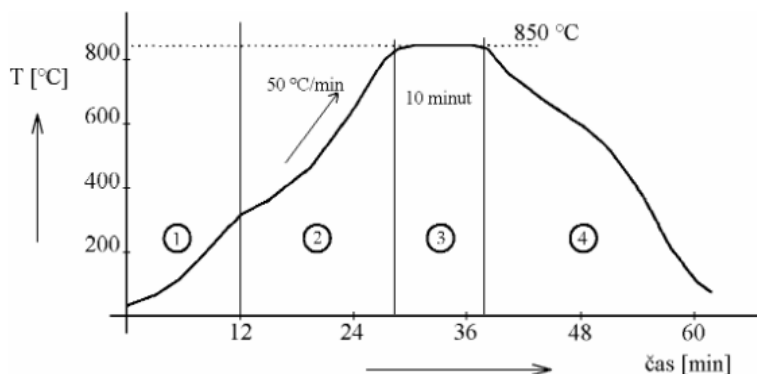


Obr. 1: Ohebný displej (Plastic Logic GmbH, LOPE-C 2012, převzato z [2]).

1.1 Výroba tištěného motivu – Tlustovrstvá technologie

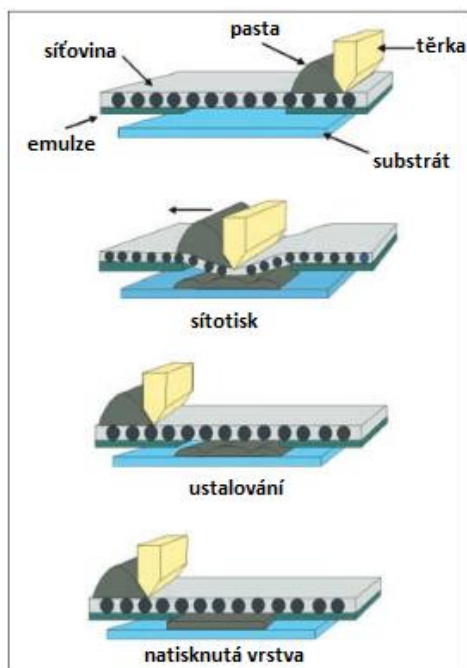
Tato technologie byla objevena na počátku roku 1942. V tomto roce byly vyvinuty také tekuté organické pasty, které obsahovaly stříbro. Zhruba o osm let později bylo zjištěno, že touto technologií lze vytvářet i DPS. S touto technologií byla vyvinuta i tenkovrstvá technologie, která jeden čas zastínila tlustovrstvou. Dnes se opět častěji setkáváme s tlustovrstvou technologií, která se neustále zlepšuje a zdokonaluje. Z této klasické technologie se vyvíjí nové, modifikované technologie (LTCC, technologie světlocitlivých vrstev). [3], [4]

Tlusté vrstvy se tvoří nejen na keramických substrátech. Charakteristický znak této technologie, která se používá v elektronice, tvoří amorfnní struktura. Ta se nejčastěji reprodukuje pomocí sítotisku. Další krok spočívá v samotném „zasušení“ pasty za konkrétních podmínek stanovených výrobcem. Poté následuje samotný výpal při teplotě 850 °C (viz Obr. 2). [3], [4]



Obr. 2: Výpal tlustých vrstev, (převzato z [4]).

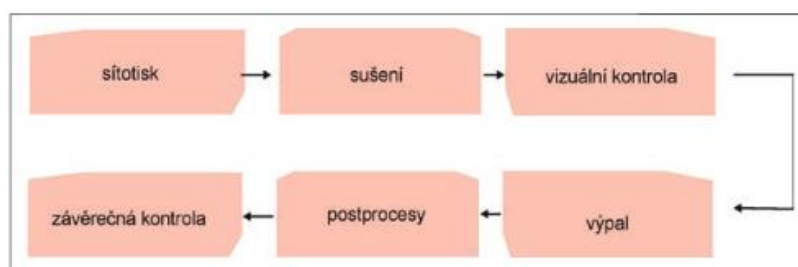
Princip spočívá v protlačení pasty skrz síťovinu na substrát. Tím dojde k vytvoření vrstvy. Další důležitou část tvoří těrka, která funguje jako flexibilní nůž. Pomocí těrky se protlačí pasta na substrát. Celý proces je znázorněn viz Obr. 3. [3], [4]



Obr. 3: Princip síťotisku, (převzato z [3]).

Při použití síťotisku, musíme zohlednit různé parametry a nastavení síťotiskového zařízení (odskok síta, viskozita pasty, ...). Pro vytvoření samotného motivu se používají různé druhy past. Ty obsahují čtyři složky: Funkční složka, organická složka (obě tyto složky udávají tiskové vlastnosti pasty), pojivová složka (zajišťuje soudržnost pasty se substrátem), modifikující složka (upravuje viskozitu past, v průběhu sušení a výpalu vyhoří). Druh pasty je určen obsahem jednotlivých prvků (stříbro, platina, měď, ...) ve funkční složce. Pasty můžeme dělit na odporové, vodivé a dielektrické. Volba závisí na elektrických parametrech. [3], [4]

Samotným síťotiskem ale proces nekončí. V dalším kroku je potřeba pastu zasušit. Tím dojde k vyrovnání povrchu natlačené vrstvy. Výpalem na izolační podložce získává vrstva finální vlastnosti. Každá pasta a podložka má přesně stanovený teplotní profil výpalu. Technologický postup je znázorněn pomocí blokového schématu (viz Obr. 4). [3], [4]



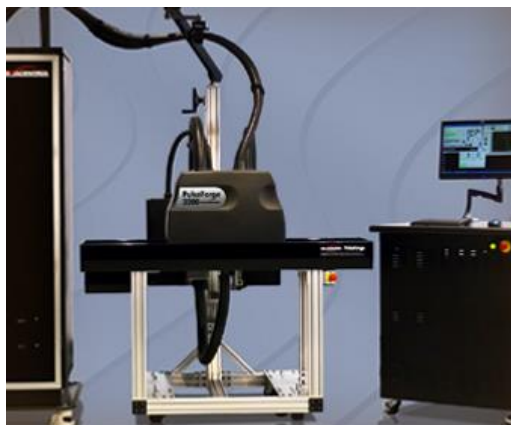
Obr. 4: Blokové schéma tvorby tlustých vrstev síťotiskem, (převzato z [3]).

Velmi důležitou část tvoří výběr materiálu izolační podložky. Kvalitu natisknuté vrstvy totiž ovlivňuje řada faktorů keramického materiálu jako poréznost, drsnost povrchu apod. Mezi nejběžnější materiál patří 96% Al_2O_3 . Tlustovrstvá technologie se hlavně používá pro HIO, senzory atd. [3], [4]

1.1.1 Fotonické vytvrzování

Jedná se o tepelný proces, který využívá pulzní světlo k zahřívání natištěného filmu. Doba expozice je velice krátká (1 ms). Tato technologie byla vyvinuta společností NovaCentrix (viz Obr. 5). Mezi největší výhody patří doba zpracování. Umožňuje produkovat nižší náklady na tepelné zpracování. Lze ho také použít k sušení tenkých vrstev. V současné době je tato technologie široce využívána. [5], [6], [7], [8]

Princip spočívá ve využití pulzního záblesku světla určeného k tepelnému zpracování vrstev na substrátech. Absorbované světlo vytvoří tepelný gradient, který dokáže zaručit vyšší teplotu povrchu než samotného substrátu. Tento proces je vhodný zejména pro nízkonákladové substráty (PET, atd). Ohebné fólie, papír či plast mohou být zahřívány pouze okolo 150 °C, jinak dojde k jejich poškození. [5], [6], [7]



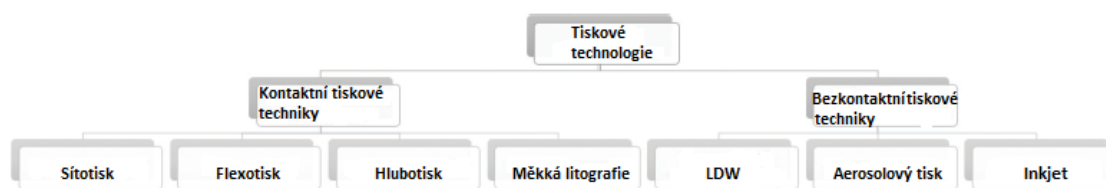
Obr. 5: Novacentrix PULSEFORGE 3200, (převzato z [7]).

1.1.2 Tepelné vytvrzování

Tento proces je velice důležitý. Jakmile je dokončen proces vytištění motivu, musí ihned následovat vytvrzení inkoustu. Pokud inkoust ihned nevytvdíme, dojde k vypaření rozpouštědla a tím dojde k vyschnutí inkoustu. Zvýšením teploty inkoustu dojde ke spuštění chemické reakce, vytvoří se vodivá matrice na základě kovových částic a dojde ke spojení. Problém s pájením či vodivostí může nastat právě proto, není-li inkoust dostatečně dlouhou dobu vytvrzen. Vytvrzením zajistíme ty nejlepší vlastnosti vodivosti, pájení a přilnavosti. K vytvrzení se může použít například pec. [9]

1.2 Tisk

Tištěná elektronika může být obecně rozdělena na kontaktní a bezkontaktní techniky tisku (viz Obr. 6). [10]



Obr. 6: Tiskové technologie, (převzato z [10]).

U kontaktní techniky je tiskové zařízení v přímém kontaktu se substrátem (sítotisk, hlubotisk, flexotisk, měkká litografie). U druhé techniky, jak již název vypovídá je tomu přesně naopak. [10]

1.3 Kontaktní tiskové technologie

V dnešní době tyto tiskové technologie převládají. Tiskové procesy produkují poměrně vysoký materiálový odpad a omezení, které se týkají rozsahu použitých materiálů, jako jsou substráty, rozpouštědla, ...). Fotolitografie zahrnuje ještě větší materiálový odpad než je tomu u tiskových procesů. [10]

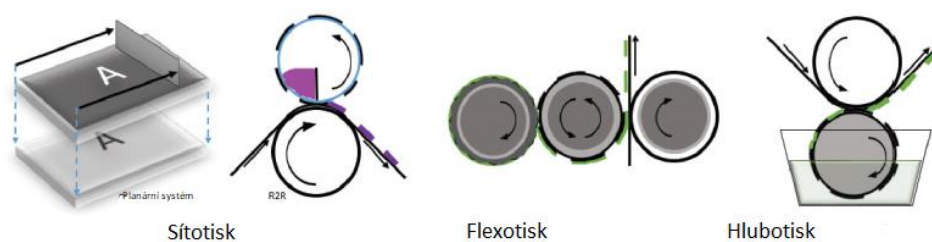
1.3.1 Sítotisk

Jedná se o techniku, kterou lze provádět v rovinném systému či v procesu „roll-to-roll“ (viz Obr. 7). Považuje se za jednu z nejstarších tiskových technik. Co se týká rovinného systému, ten využívá síťovinu, která je vyrobena z nerezové oceli či plastu a ta je v přímém

kontaktu se substrátem. Princip spočívá v pohybu těrky, tím dochází k distribuci pasty a vyplňování síťoviny. Pasta se situuje do standardního obrazu v síti a tím určuje konečný obraz. Jako substrát se může použít sklo, papír, keramika, polymery. [10]

V procesu R2R („roll-to-roll“) se již nevyskytuje těrka, ale váleček. Čepel a pasta se vyskytují uvnitř. Princip spočívá ve vytlačení pasty pomocí čepele přes síťovinu. Tento proces se nazývá kontinuální. To nám umožňuje poměrně vysokou rychlost výroby. Na druhou stranu rotační nastavení je poměrně drahé a čištění zařízení je velice obtížné. [10]

Dá se říci, že tato technologie se velice často využívá a to hlavně z důvodu spolehlivosti. Jiné konvenční způsoby tisku dosahují větší rychlosti než je rychlost planárního systému. Můžeme ho využít pro RFID antény, membránové klávesnice, dielektrické, fosforové a pasivní vrstvy elektroluminiscenčních tištěných ploch. [10]



Obr. 7: Přehled kontaktního tisku, (převzato z [10]).

1.3.2 Flexotisk

Jedná se o technologii přímého tisku (R2R). Obsahuje aniloxový keramický válec, který je pokryt mikro dutinami. Válec má na sobě vytvořený cílový motiv, který je přenesen na substrát. (viz Obr. 7). Další část tvoří uzavřená komora, jejíž účel je přenos inkoustu do aniloxového válce. Velice důležitá část je čepel. Ta odstraňuje zbytkový inkoust z válce. Válec se kontinuálně otáčí, musí být ve styku se substrátem a tím nám zajišťuje vysokorychlostní tisk. Je vhodný pro výrobu tištěných baterií. [10]

1.3.3 Hlubotisk

V podstatě se dá říci, že se jedná o obrácený proces flexotisku. Vytištěný obraz je negativní (viz. Obr. 7). Inkoust je vázán k hlubotiskovému válci, který obsahuje výsledný motiv. Další část tvoří kovová čepel, která má za úkol odstranit přebytečný inkoust. Přenos inkoustu je zapříčiněn kapilárním působením z malé dutiny na povrch válce. Výhodou je

také vysoká výrobní rychlost. Kvalita tisku závisí na mnoho okolnostech, například smyková síla, viskozita inkoustů, vytvrzování, dostatečná vzdálenost buněk (1,06 – 1,4 μm). [10]

Je poměrně široce využíván při výrobě časopisů a k určitým elektronickým produktům, jako EKG podložky, RFID, snímače, solární články [10]

1.4 Bezkontaktní tiskové technologie

Tato technologie má v porovnání s kontaktními tiskovými technologiemi jednu hlavní výhodu a to, že substrát přijde do styku pouze s depozičním materiálem. Tím se nám výrazně sníží riziko deformace substrátu a kontaminace. Jako substrát se může použít sklo, dřevo, polymery, atd. [10]

1.4.1 LDW

Jedná se o techniku přímého laserového zápisu. Technologie laserového zápisu je určena k realizaci 1D a 3D struktury. Samotný zápis je realizován pomocí laserem indukované depozice polymerů, kovů či keramiky. Nedochází zde k žádnému dotyku mezi substrátem a tryskou. Hlavní složku tvoří počítač, který ovládá laserové pulsy. Tato technika umožňuje vytvářet velmi složité struktury, které nejsou realizovatelné pomocí jiných technologií. [10]

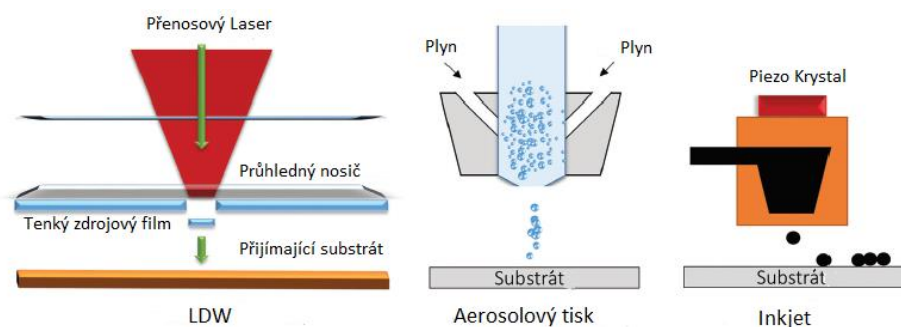
V rámci zápisu může být tato technologie ještě rozdělena na tři techniky:

- **LDW+**, kde jednotlivý materiál je uložen z plynných a kapalných prekurzorů, laserovým paprskem či z nosiče na substrát (viz. Obr. 8). Tato technika je velice nákladná a to hlavně z důvodu vybavení. Také se může tisknout pouze na rovné podklady.
- **LDW-**, v tomto případě je materiál odstraněn pomocí ablace (řezání, leptání, fotochemicky, ...). Využívá se tam, kde vyžadujeme vysoké rozlišení.
- **LDWM**, zde je materiál zpracován chemicky či tepelně. Základem je substrát, který je ponořen v chemickém roztoku a ten obsahuje ionty, které jsou důležité z hlediska depozice. Další část tvoří paprsek, díky němuž dochází k nárůstu teploty, tím se

zapříčiní rozkladu kapaliny a to následně eskaluje k uložení kovové vrstvy na substrát. Tato technika bohužel není schopna vytvářet 3D struktury. [10]

1.4.2 Aerosol Jet Printing

Tato technologie (viz Obr. 8) byla vyvinuta společností Optomec. Hlavní princip spočívá v umístění inkoustu do rozprašovače, kde dojde k aerosolizaci v podobě kapalných částic (20 nm – 5 µm). Vše závisí na viskozitě inkoustu. V dalším kroku je inkoust přenesen do depoziční hlavy díky proudění dusíku a tím dojde k zaostření aerosolu na substrát. Jedná se o nízkoteplotní proces, takže je vhodný pro celou škálu substrátů a materiálů. Díky tomuto tisku můžeme tisknout poměrně složité návrhy (solární články, ...). Stejně jako ostatní techniky, tak i tento druh tisku doprovází řada nevýhod. Například nosič, který obsahuje kapičky, vytváří nežádoucí oblak prášku, který zasahuje do tisku. Další nevýhodou tvoří vysoká cena zařízení. [10]



Obr. 8: Přehled bezkontaktního tisku, (převzato z [10]).

1.4.3 Inkjet

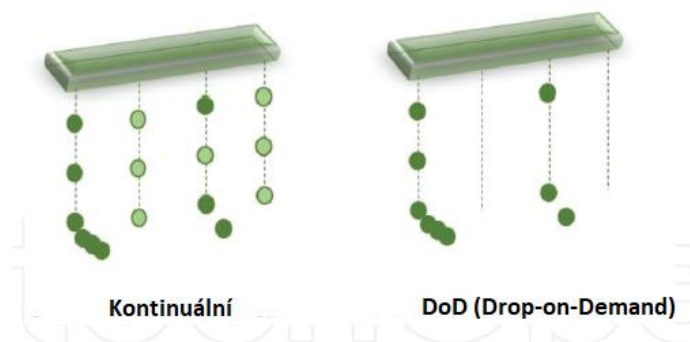
Jedná se o poměrně novou technologii, která se neustále rozvíjí. Princip spočívá v tisku motivu pomocí přímé depozice, většinou z malých otvorů, které jsou uloženy v tiskové hlavě. Odpadá zde možnost použití masek a nedochází k přímému kontaktu mezi substrátem a tiskovou hlavou. Inkoust se situuje do určeného místa na substrátu působením gravitační síly, odporem vzduchu a tím dojde k tvorbě tiskového vzoru (viz Obr. 8). [10]

Inkoust vysychá odpařením rozpouštědla či krystalizací. V dalším kroku musí přijít tepelné zpracování (sintrování). Použití substrátů je velmi rozsáhlé, od skla až po textil. Tato technologie je také šetrná k životnímu prostředí, neboť produkuje malé množství škodlivého odpadu. Tento typ tisku má velkou škálu použití, například tranzistory, snímače,

biomedicínské materiály atd. Tato technika nevyžaduje žádné speciální podmínky určené ke zpracování. Naopak, je kladen důraz na jednoduchý princip s minimálním počtem výrobních kroků a nízkým nákladem na suroviny. Inkousty musí splňovat řadu specifikací, jako jsou viskozita, množství zvlhčovačů (10 – 20%) a povrchové napětí. I tato technologie má své nevýhody. Může hrozit ucpání trysek a také samotný proces není příliš rychlý. Přesto můžeme říci, že se jedná o technologii, která oplývá vysokou kvalitou. [10]

Tento druh tisku pracuje ve dvou režimech: Kontinuální inkoustový tisk a DoD inkoustový tisk (Drop-On-Demand). Každý režim má zcela unikátní způsob řízení kapiček. [10]

- **Kontinuální tisk** – Jak již název napovídá, vyhození kapky je kontinuální napříč všemi tryskami tiskárny. Obsahuje piezoelektrický měnič, který je připojen k tiskové hlavě. Kapka, která dopadne na požadovanou polohu substrátu (viz Obr. 9), je řízena elektrickým polem, jehož úkolem je řídit trajektorii. Odklon kapky může probíhat binárními či vychylovacími systémy. V prvním případě jsou kapky odkloněny do jediného pixelového umístění v rámci substrátu. Ve vychylovacím systému jsou kapky nabity a odkloněny na substrát => tvorba více pixelů. Rychlost tisku se pohybuje okolo 25 ms. Kapky jsou odkloněny nezávisle na gravitaci, což je považováno za jednu z hlavních výhod. Kapky mají standardní velikost 150 μm . Tato technologie je používána převážně pro velkopřemyslovou výrobu, zejména čárových kódů. Mezi tiskovou hlavou a substrátem je poměrně dlouhá vzdálenost, to znamená, že kapky nemají moc dobré rozlišení a to při výrobě elektronických výrobků může být nežádoucí. Další problém může být v použití elektrolytických inkoustů, které musí mít nízkou viskozitu. [10]
- **DoD** – V tomto systému dochází k depozici pouze jedné kapky pomocí tiskové hlavy (viz Obr. 9). Tiskárna obsahuje několik vstřikovacích trysek, které jsou uloženy v tiskové hlavě. Vysouvání kapiček probíhá paralelně k sobě.



Obr. 9: Technologický režim, (převzato z [10]).

1.5 Vodivý inkoust

Důležitým faktorem bez ohledu na použitou techniku je inkoust. Ten musí být správně vytvrzen, aby došlo ke správnému spojení se substrátem a vytvoření celku jako takového. Pokud není inkoust správně vytvrzen, má velmi špatnou vodivost a může velmi negativně ovlivnit použití. [11]

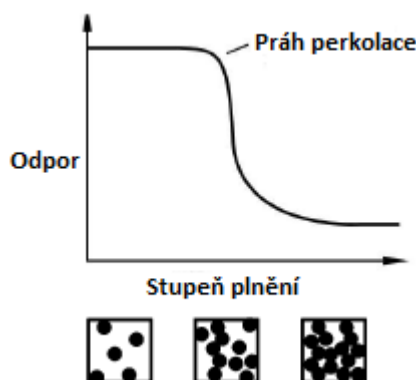
Jedná se o typ inkoustu, jehož hlavním účelem je přenos elektřiny. Na poli tištěné elektroniky nachází velmi časté uplatnění. Díky tomuto inkoustu a různými kombinacemi tisku jsme schopni tisknout obvody či návrhy na materiál od papíru až po polyester. Obvykle jsou uvedeny hodnoty odporu inkoustu či vodivosti v Ohm/čtverec/25 μ m. Inkoust, který bude vysoce vodivý, bude mít vždy malý odpor. [12]

Mezi hlavní složky vodivého inkoustu patří polymerové pojivo, rozpouštědlo a vodivý materiál nebo částice. [12]

V dnešní době existuje několik typů vodivých inkoustů. Široce používaný je inkoust na bázi graphenu. Ten se hodí zejména pro aplikace, jako jsou tištěné displeje, čipové karty atd. Dalšími možnostmi jsou nano-stříbrné, nano-karbonové, reaktivní stříbrné a dielektrické inkousty atd. [12]

Důležitým pojmem této problematiky je tzv. perkolační práh. Prahová hodnota perkolace je vlastně nejnižší koncentrace plniva, kdy je izolační materiál přeměněn na vodivý. Můžeme tedy říci, že tato hodnota (perkolace) je nejnižší koncentrace plniva, kdy je

vytvořena elektrická dráha v celém vzorku (viz Obr. 10). Není-li splněna prahová hodnota perkolace, nemůžeme docílit dostatečné vodivosti. Vodivé inkousty jsou hojně naplněny vodivými částicemi (stříbro, nikl, ...). Co se týká stupně plnění, tak ten závisí požadavcích aplikace (elektrická vodivost). Inkousty, které dosahují vysoké viskozity, jsou velice stabilní. Množství pojiva a rozpouštědla se snižuje se zvyšujícím se stupněm plnění. Inkousty, které jsou silně naplněny, mají „kašovitý“ charakter a nejsou tedy proto moc vhodné. [13], [14]



Obr. 10: Schéma perkolace ve funkčním inkoustu, (převzato z [14]).

1.6 Výhody tištěné elektroniky

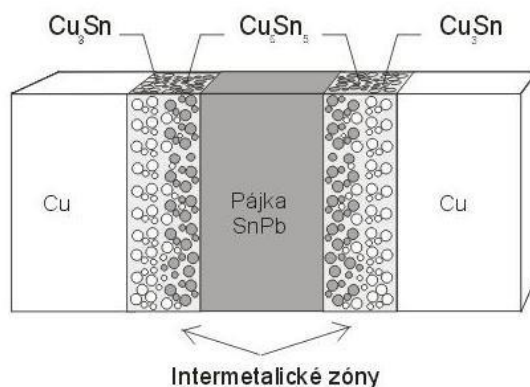
V dnešní době se tištěná elektronika stala flexibilní, bezpečnou napříč všemi instancemi průmyslových odvětví. Tato technologie také vyžaduje méně vstupních materiálů a méně energie pro práci s nimi. Mezi hlavní výhody můžeme zařadit: [15]

- **Nízké náklady**
- **Flexibilita**
- **Snadná integrace**

Dnes nám tištěná elektronika pomáhá vytvářet řadu inteligentních předmětů, které můžeme používat v běžném životě. Od senzorů až po displeje. Tištěná elektronika otevírá řadu možností a ovlivňuje řadu průmyslových odvětví. [15]

2 Metody pájení

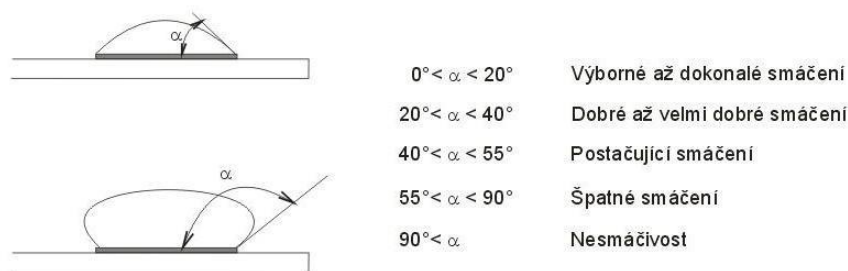
Pájení je proces, kdy se spojují dva kovy za použití pájecí slitiny. Pájecí slitina musí mít nižší teplotu tavení než spojované části, aby nedošlo k roztavení. Pájka, která se používá v elektrotechnice, je kovová slitina, která je vyrobena nejčastěji kombinací olova a cínu a to v různých poměrech. Během ochlazování vytváří velmi silnou elektrickou (mechanickou) vazbu mezi jednotlivými komponenty. Princip pájení spočívá ve styku povrchových atomů materiálu a atomů roztavené pájky v poměrně malé vzdálenosti. Tím se vytvoří podmínky pro účinek kohézních a adhezních sil. [16], [17], [18]



Obr. 11: Pájený spoj, (převzato z [18]).

Základní rozdělení pájení je na měkké a tvrdé. Pájený spoj (viz Obr. 11) je realizován pomocí měkkých pájecích slitin. To znamená, že teplota tavení pájky dosahuje hodnoty menší než $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. U tvrdého pájení je tomu přesně naopak. V elektrotechnice se převážně používá měkké pájení a to klasickou pájkou na bázi SnPb. Pájený spoj vytváří dvě vrstvy (Cu_3Sn a Cu_6Sn_5). Druhá zmiňovaná vzniká při teplotě okolo $186\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve formě krystalů, je nepájkivá a může způsobit obtíže z hlediska smáčivosti povrchu. [18]

Jedna z nejdůležitějších podmínek pro docílení dobré pájitelnosti je smáčivost pájeného povrchu. Tato vlastnost nám umožňuje vytvářet nepřerušovanou vrstvu pájecího materiálu na základě kontaktu s roztavenou pájkou. Aby byl vytvořen kvalitní pájený spoj, musíme dosáhnout kvalitní smáčivosti. Smáčivost je dána tzv. kontaktním úhlem. Na Obr. 12 můžeme vidět hodnoty kontaktního úhlu. Menší úhel = lepší smáčivost. [19], [20]

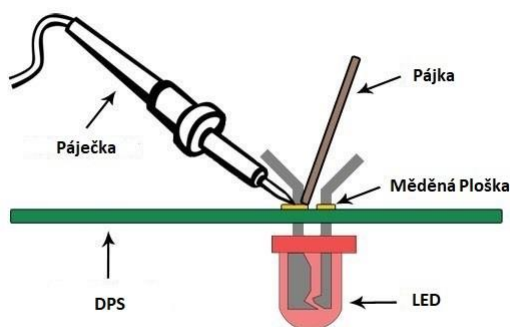


Obr. 12: Stykový úhel pro smáčivý a nesmáčivý povrch, hodnoty úhlu, (převzato z [20]).

Níže budou obecně popsány jednotlivé metody pájení, které jsou použitelné pro tištěnou elektroniku. Není zde uvedena metoda pájení vlnnou, jelikož není vhodná pro flexibilní tištěnou elektroniku.

2.1 Ruční pájení

Jedná se vůbec o jednu z nejstarších spojovacích technik. U této techniky je spoj ohříván hrotem páječky. Páječky mají různé velikosti a tvary. Vše závisí na výrobci. Ještě před samotným pájením je dobré zkontrolovat hrot páječky. Ten by měl být očištěn od zbytků pájecí slitiny. Samotné čištění je velice jednoduché, postačí namočená houbička, do které se pájecí hrot otře. Obecně se doporučuje nastavit teplotu hrotu na nejnižší možnou, přesto to není zcela klíčový prvek při pájení. Teplota závisí na použité pájecí slitině. Další krok spočívá již v nanesení pájky (viz Obr. 13). Roztavená pájka proudí od chladnějšího prostoru k teplejšímu. Jedná se o poměrně rozšířenou metodu. Na druhou stranu je poměrně nespolehlivá. Nejistá je doba pájení či množství samotné pájky ve spoji. Proto najde uplatnění zejména tam, kde chceme provádět drobné ruční opravy, či chceme připojit součástky, které nelze pájet hromadně. [17], [21].



Obr. 13: Základní princip pájení, (převzato z [16]).

2.2 Pájení přetavením

Jedná se o velmi významnou metodu pájení. Tato metoda má zcela opačný princip než je tomu u metody pájení vlnou či ručního pájení. [22]

Základní princip spočívá v nanesení pájecího materiálu na předem určené pájené místo. V dalším kroku dojde k působení tepelné energie, která vede k přetavení pájecího materiálu. Jako pájecí materiál se nejčastěji používá pájecí pasta. [22]

Tato technologie se skládá ze čtyř hlavních zón. Jedná se o předehřev, aktivaci tavidla, přetavení a chlazení. Cílem je přenos dostatečného množství tepla, což vede k roztavení pájky, která vytvoří spáry mezi jednotlivými spoji, aniž by došlo ke zničení součástek. [23]

Předehřev – Během této fáze dochází k zahřívání všech součástí na stanovenou teplotu. Nesmí ale dojít k přílišnému zahřátí. Obvykle by nárůst teploty neměl překročit 2°C/s. Při větším zahřátí může dojít k úniku pájecí pasty. [23]

Aktivace tavidla – Hlavní účel této fáze spočívá v tom, aby byly všechny komponenty připraveny do fáze přetavení. Nelze přesně specifikovat přesný čas. Vše závisí i na přítomných druzích součástek.

Přetavení – V této fázi dochází vlivem zvětšování teploty nad bod tání pájecí pasty ke vzniku kapaliny. Pájka je udržována nad bodem tání, aby zajistila správnou smáčivost mezi součástkami a DPS. Čas se pohybuje v rozmezí 30 – 60 s. Během této fáze je také důležité kontrolovat teplotu, aby nedošlo k poškození součástí, které jsou vystaveny nadměrnému teplu. Během této metody lze také zvážit přítomnost dusíku. [23]

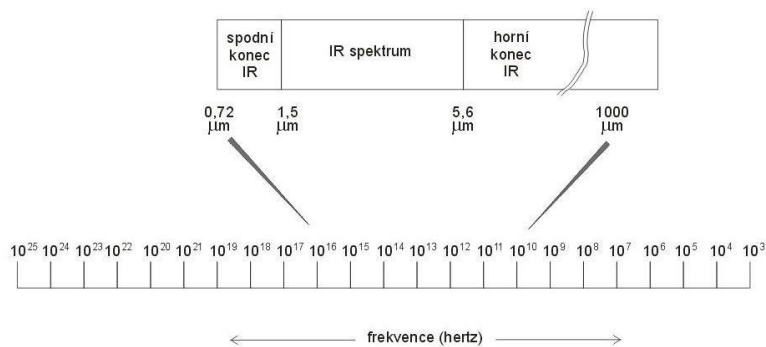
Chlazení – Během této fáze dochází k chlazení sestavy. Obvyklá rychlost chlazení by neměla překročit 3°C/s. [23]

2.2.1 Pájení infračerveným zářením

Touto metodou se pájené spoje vytvoří tak, že vlivem tepelné energie pomocí IR zářičů dojde k zahřátí pájecí pasty nad bod tání slitiny. Čím vyšší je vyzáření energie, tím větší je teplota. Energie zářiče, který je součástí elektromagnetického spektra pro svoje šíření nepotřebuje žádné médium. [24], [25]

V přetavovacích pecích je teplo získáváno převážně z elektricky napájených zdrojů, které vyřazují tepelnou energii. Tyto pece obsahují vzduch, a proto vyzařování tepla vzniká za pomoci přirozeného proudění. Existuje ještě možnost jak zlepšit kvalitu tištěného spoje. Jedná se o možnost použití dusíku. V dusíkové atmosféře se pájecí pasta přetaví při zahřátí bez oxidace. Bylo testováno, že dusík zvyšuje špičkovou teplotu přetavení o 25°C. Během procesu přetavení dusík eliminuje oxidaci všech materiálů. Použití dusíku se tedy jeví jako velice praktické. Mimo jiné nám umožňuje zlepšit smáčivost přívodů komponent, které jsou montovány, zlepšit integritu spojů, podpořit pájitelnost, eliminovat tvorbu bílého zákalu při oxidaci cínu atd. [24], [25]

Z praktického hlediska se jako nejužitečnější vlnové délky jeví v rozsahu 0,1 – 100 μm (viz Obr. 14). V tomto rozsahu se vyskytují jak některé UV složky, tak viditelné světlo a IR složky. U tohoto přetavení se používají wolframové zářiče. Tato technologie má řadu výhod a to zejména jednoduchou konstrukci pece či možnost jednoduchého pásmového ovládní. Jak už tomu tak bývá, tak i tato technologie se potýká s řadou nevýhod. Mezi hlavní nevýhodu patří stínění. Máme-li některý pájený spoj skryt za součástkou vzhledem k hlavnímu zdroji tepla, účinnost ohřevu zářením prudce klesá. Další nevýhoda může být pohlcování tepla. Může nastat situace, která vyústí v nerovnoměrné rozložení tepla. Obecně můžeme říci, že tmavší barvy pohlcují větší množství vyzářeného tepla. To znamená, že černé součástky se budou zahřívat daleko rychleji než pájecí pasta. [24], [25]

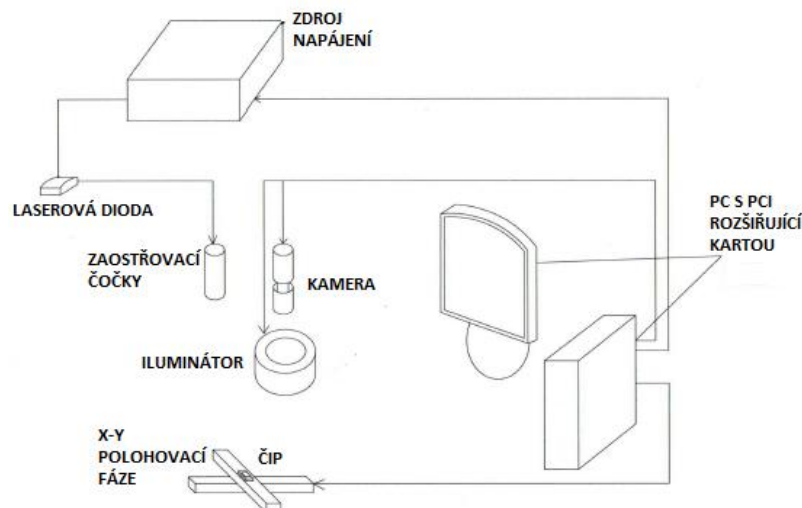


Obr. 14: Užitečné vlnové délky elektromagnetického spektra pro pájení přetavením (IR), (převzato z [24]).

2.2.2 Pájení laserem

Jedná se o techniku, kde zaostřený laserový paprsek zajišťuje ohřev pájecí slitiny a to vede k rychlému vytvoření vodivého spojení. Během procesu se využívá laserového paprsku, který přenáší energii do místa pájení. Pohlcená energie ohřívá pájku, dokud nedosáhne své teploty tavení. Při tomto druhu pájení je používána pájka, která v kapalném stavu má tu vlastnost, že smáčí spojované materiály a tím zajišťuje elektricky stabilní spojení při procesu tuhnutí. U této technologie se zahřívá pouze pájený spoj, proto je tento proces výhodnější pro propojení s pájkami, které mají širší rozsah teplot tání než je tomu u IR pájení. Obvykle bývá ohřev velmi krátký, zhruba 5 ms => nedochází ke vzniku intermetalických struktur na pájeném spoji. [26], [27]

System se skládá z laserového generátoru, optiky, optického modulu, iluminátoru, kamery, modulu počítačového vidění a pohybového modulu. Je také vybaven servoměničem a dalšími prvky. (viz Obr. 15). [26]



Obr. 15: Blokové schéma, (převzato z [26]).

První krok spočívá v generování paprsku u laserové diody a následné modulaci. Díky optickému systému je laserový paprsek velmi přesně zaměřen na pájený spoj. Požadovanou teplotu pájeného spoje získáme pohlcením ozařování. Výstup laseru je zaručen pomocí optického modulu, který se skládá ze spojovací optiky připevněné na držáku, konektorového opláštění kabelem a výstupní optiky, která zaostří paprsek na určené místo. Přesnost je jedna z nejdůležitějších kritérií. Z tohoto důvodu jsou zařízení spojeny s polohovacími tabulkami (XY). Zařízení se umisťují do polohy (XY) pomocí servomotoru. Tabulky slouží k přesnému umístění sestavy pod laserový paprsek a díky tomu dochází k bezkontaktnímu pájení. Mezi další důležité součásti patří galvanometry. Ty slouží k řízení dráhy laseru. Pro každý typ komponentu jsou naprogramovány jinak a jejich dráhy jsou uloženy v počítačovém rozhraní. [26]

Typy laserů

- *CO₂ (plynový)*
- *Nd: YAG (polovodičový)*
- *Diodový*

První typ laseru má vlnovou délku okolo 10,6 μm . Princip spočívá v odražení od kovových povrchů. Je silně vstřebáván tavidlem a proudění pak přenáší teplo na pájku. Jako hlavní médium je použita směs dusíku, oxidu uhličitého a hélia. Účinnost se pohybuje okolo 20%. Není vhodné tento typ laseru používat na pájení bez tavidla. [26], [27]

Druhý typ laseru spočívá v generování impulsního laserového paprsku o vlnové délce 1,06 μm . Tento druh záření proniká sklem a většinou plastických hmot. Toto záření je dobře pohlcováno kovy. Při přemísťování není nutné paprsek vypínat. Obsahuje neodým, který může nahradit i některé atomy yttria, které mají stejnou velikost. Pro pájení lze běžně použít energie 10 – 20 W. Pájka absorbuje záření okolo 1 μm => vysoká tepelná účinnost. [26], [27]

Tato technologie nabízí řadu výhod:

- *Nízké tepelné namáhání*
- *Eliminace intermetalických sloučenin*
- *Nízká údržba*
- *Flexibilita, bezkontaktnost*

Na druhou stranu i tato metoda má své omezení. Musíme přesně definovat laserový impuls. I sebemenší odchylka (nepatrná změna množství pájecí pasty, ...) může vést k destrukci. Další omezení spočívá ve vysoké ceně laseru. [26].

2.2.3 Pájení v horkých parách

Princip spočívá v zahřátí kapaliny na bod varu a poté dojde k odpaření. Součástky a DPS se ponoří do zóny odpařování (viz Obr. 16). V prvním kroku dojde ke kondenzaci páry na ploše desek, součástek a vývodů. Teplota, která je mnohonásobně vyšší než teplota tavení pájky zapříčiní, že teplo páry se přeneše a zahřeje DPS spolu se součástkami na teplotu pájení => tvorba pájeného spoje. V tomto druhu pájení se používají fluórouhlíky, které mají bod varu v rozmezí 215 – 250 °C. Bod varu kapaliny nám určuje pájecí teplotu. Pára, která se nasytí, neobsahuje kyslík, a proto nedochází k oxidaci. [28], [29]

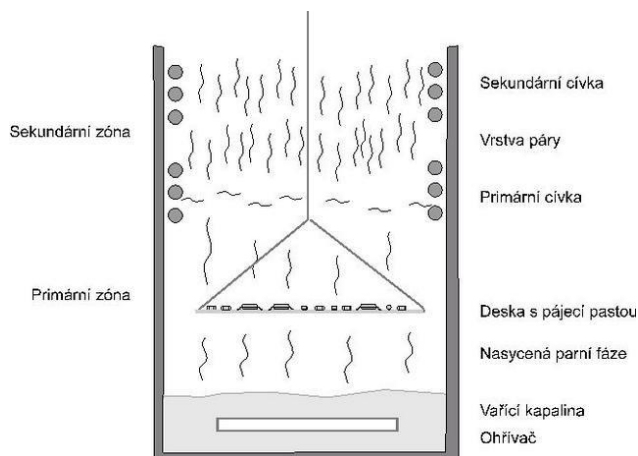
Kapaliny musí mít vysoký bod vzplanutí, definovaný bod varu, tepelnou stabilitu a především hustota páry musí být větší než je hustota vzduchu [28], [29]

Výhody:

- *Rovnoměrné zahřívání, rozložení tepla*
- *Rychlý ohřev*
- *Nepřítomnost oxidace*
- *Hromadné pájení*
- *Minimalizace „tombstoning“ efektu*

Nevýhody:

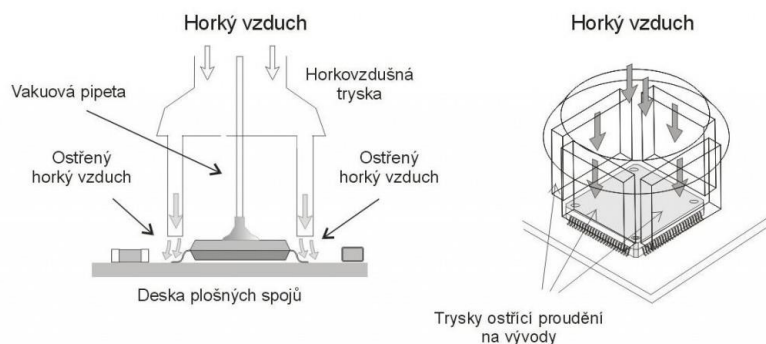
- *Ztráta kapaliny během procesu*
- *Poměrně vysoká cena kapaliny*



Obr. 16: Princip pájení v parách, (převzato z [28]).

2.2.4 Pájení horkým vzduchem

Tato metoda spočívá v jednoduchém principu. Proud horkého vzduchu proudí na místo, které obsahuje pájecí pastu (viz Obr. 17). Proudění probíhá tak dlouho, dokud nedojde k zahřátí a následnému přetavení. Používá se zejména u větších pouzder integrovaných obvodů a BGA. Tento typ pájení je vhodný zejména při opravách DPS. [30], [31]

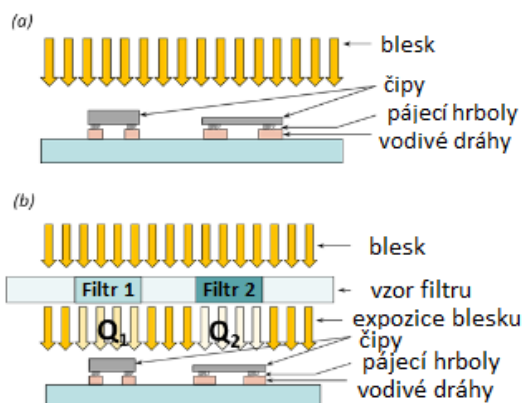


Obr. 17: Ostřený proud horkého vzduchu proudí na vývody pouzdra integrovaného obvodu, (převzato z [30]).

2.3 Fotonické pájení

Jedná se o poměrně novou pájecí techniku. Tato technologie je založena na principu světla. Umožňuje nám rychlou integraci převážně křemíkových komponentů na flexibilní fólie. Hlavní princip spočívá ve využití intenzivního světelného impulsu bleskové lampy z pokročilých světelných systémů (viz Obr. 18). Substrát a součásti, které mají různé absorpční koeficienty, vedou k zahřívání prvků a poté k velmi rychlému pájení komponent na průhledné substráty. Krátké časové prodlevy omezují difúzní ohřev substrátu a to vede k pájení složek při teplotách, které jsou vyšší než maximální teplota zpracování fólií. Při této technologii se zahřívá pouze pasta, nikoliv substrát. Její efektivní využití je spíše pro velkoobjemovou výrobu. [32], [33]

Nabízí také lepší mechanickou stabilitu a v současné době se jedná o jediný prostředek pro použití bezolovnaté pájky na plastech, který má nízký bod tání. [32], [33]



Obr. 18: Fotonické pájení (a) stejnoměrné (b) přizpůsobené pro tepelnou kapacitu komponentu prostřednictvím filtru nasměrovaného na čip umístěný na tištěné pájecí pastě, (převzato z [33]).

3 Tiskové pasty a inkousty

V dnešní době se elektronický tiskový průmysl velmi rychle mění. Počítá se, že v budoucnu budou moci být vytištěny elektronické systémy pomocí různých technických inkoustů. Existuje několik společností, které se zabývají výrobou inkoustů či past. Jedna taková se jmenuje Applied Nanotech. Ta se zabývá výrobou nanočásticových past a inkoustů. Společnost se nezabývá pouze distribucí inkoustových a pastovitých materiálů, ale také poskytuje služby v oblasti vývoje a výzkumu. Optimalizuje se spíše pro sériovou výrobu. [34]

Další významnou společností v tomto odvětví je společnost DuPont. Ta produkuje vodivé inkousty a pasty pro různé tištěné elektronické aplikace. Produkty musí splňovat určité nároky na výkon mnoha aplikací, včetně antén, dotykových obrazovek, spínačů atd.

DuPont technologie lze použít na mnoho substrátových povrchů. Patří sem například sklo, keramika, polyester atd. [35]

Další společnost, která se zabývá výrobou tiskových past je společnost ESL (ElectroScience). Zabývá se výrobou sítotiskových past, jako jsou pastovité vodiče pro film, rezistory, dielektrika atd. Využívá i substráty pro SOFC a MEA, které jsou podporované elektrolytem a anodou. Použití těchto materiálů je poměrně složité. Najdou uplatnění ve vícevrstvé mikroelektronice (kondenzátory, transformátory, induktory, ...) nebo hybridních mikroobvodech. [36]

Poslední společností je společnost Gwent Group. Ta nabízí celou škálu materiálů pro elektroniku, od senzorů až po pasty. V posledních letech zaznamenala prudký nárůst zájmu. [37]

Níže budou uvedeny jednotlivé inkousty a pasty, které spadají pod uvedené výrobce.

3.1 Přehled inkoustů

V této části kapitoly je uveden seznam jednotlivých inkoustů od společností Applied Nanotech a DuPont. Přehled je zpracován do tabulky, která obsahuje potřebné parametry inkoustu.

Tab. 1: Přehled inkoustů, (převzato z [34], [35], [37]).

Typ inkoustu	Cu-IJ70	Cu-OC70	Ni-IJ70-30	Ni-OC70	Ag-IJ10	PE410	EMD5730
Výrobce	Applied Nanotech	Applied Nanotech	Applied Nanotech	Applied Nanotech	Applied Nanotech	DuPont	Gwent
Materiál	Měď	Měď	Nikl	Nikl	Stříbro	Stříbro	Stříbro
Velikost částic [nm]	10 – 200	20 – 100	20 – 100	20 – 100	3 – 10	Není uvedena	Není uvedena
Rezistivita [$\mu\Omega\text{-cm}$]	5 - 7	20 - 50	20 - 50	20 - 50	10 - 50	Není uvedena	5 - 30
Obsah pevných částic [wt%]	30-50	50	30	60	45	45,2	40
Viskozita [cP]	10 – 20	100 – 200	16 – 25	100 – 200	4 – 5	20 – 40	10 – 13 cPs
Sušení	100 °C (30 minut)	< 30 minut	100 °C (30 minut)	< 30 minut	100 °C (10 minut)	130 °C (20 minut)	Není přesně specifikováno
Tloušťka zasušené vrstvy [μm]	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena
Tloušťka vypálené vrstvy [μm]	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena
Substrát	PET, polyimid	PET, polyimid	Keramika Kapton	Polyimid	PET	PET	Několik druhů, není přesně specifikován
Použití	Různé aplikace tištěné elektroniky	Různé aplikace tištěné elektroniky	Tisk vodivých elektrod	Různé aplikace tištěné elektroniky	Vhodný pro tisk pomocí inkoustových technologií	Solární články, OLED, tištěné antény	RFID antény, senzory, různé aplikace tištěné elektroniky

3.2 Přehled past

Zde je uveden seznam jednotlivých past od společností Applied Nanotech, DuPont, ESL a Gwent Group. Přehled je zpracován do dvou samostatných tabulek, které obsahují potřebné parametry past.

Tab. 2: Přehled past, (převzato z [34], [35], [37]).

Typ pasty	Cu-PM530	Cu-PS70	Al-PS1000	Al-PS4020	Ag-PM100	PE827	PE828	C208041 5P2
Výrobce	Applied Nanotech	Applied Nanotech	Applied Nanotech	Applied Nanotech	Applied Nanotech	DuPont	DuPont	Gwent
Materiál	Měď	Měď	Hliník	Hliník	Stříbro	Stříbro	Stříbro	Stříbro
Velikost částic [nm]	Není uvedena	40 – 100	Není uvedena	Není uvedena	80 nm – 10 μ m	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena
Rezistivita [$\mu\Omega$ -cm] Plošná rezis. [$m\Omega$ /sq /25 μ m]	50	7 - 60	Není uvedena (pouze malá)	Není uvedena (pouze malá)	5-30	<60	<25	15 – 20
Obsah pevných částic [wt%]	50	60	Není uveden	Není uveden	60 - 80	76 - 80	74 – 78	44,75 – 45,25
Viskozita	50 - 70 cP	30 – 40 cP	20 – 50 cP	100 – 200 cP	8 – 10 cP	15 – 50 PaS	15 – 50 Pas	0,72 – 1,78 Pas
Sušení	100°C (30 minut)	100°C (30 minut)	Průběžná pec (230°C) konvekcí pec (100°C) (30 minut)	Průběžná pec (230°C) konvekcí pec (100°C) (30 minut)	100°C (10 minut)	60 - 100°C (větraný box) (10 – 20 minut)	60 - 100°C (větraný box) (10 – 20 minut)	130 - 150°C (10 – 30 minut)
Tloušťka zasušené vrstvy [μ m]	3 - 4	Není uvedena	20 – 30	7 – 25	Není uvedena	10 – 15	10 – 15	Není uvedena
Tloušťka vypálené vrstvy [μ m]	3	Není uvedena	20 – 25	5 – 20	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena
Substrát	PET, papír, ...	Keramika, Kapton	Není uveden	Není uveden	PET, polyimid	PVC, ...	PVC, ...	PET, ...
Použití	Různé aplikace tištěné elektroniky	Různé aplikace tištěné elektroniky	Vodivé aplikace ve fotovol. průmyslu	Nízkoteplotní zpracování fotovol. zařízení	Různé aplikace tištěné elektroniky	Tištěné antény, senzory	Tištěné antény, senzory	Membrá nové aplikace

Tab. 3: Přehled past, (převzato z [35], [36], [37]).

Typ pasty	PE873	Kapton KA801	1901-S	1901-SB	1107-S	1109-S	1120	C212091 8PI
Výrobce	DuPont	DuPont	ESL	ESL	ESL	ESL	ESL	Gwent
Materiál	Stříbro	Stříbro	Stříbro	Stříbro	Stříbro	Stříbro	Stříbro	Stříbro
Velikost částic	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena
Plošná rezist. [mΩ/sq/25 μm]	<75	Není uvedena	<20	<100	≤40	<50	≤20	15 - 25
Rezistivita [mΩ/sq]								
Obsah pevných částic [wt%]	60 - 65	71 - 77	Není uveden	Není uveden	Není uveden	Není uveden	Není uveden	64,5 - 65,5
Viskozita [Pas]	50 - 80	20 - 50	170 ± 10	25 ± 10	60 - 100	150 ± 25	4,5 ± 1	3 - 5
Sušení	100 - 160 °C (větraná trouba) (2 - 10 minut)	130 - 200 °C (trouba) (10 - 30 minut)	Není uvedeno	Není uvedeno	125 °C (10 - 15 minut)	125 °C (10 - 15 minut)	125 °C (1 - 2 minuty)	130 - 150 °C (trouba) (10 - 30 minut)
Tloušťka zasušené vrstvy [μm]	8 - 12	8 - 10	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena	Není uvedena
Substrát	Flexibilní, textilní	Kapton, FR4	Mylar, FR4	Mylar, FR4	Mylar, FR4	Mylar	Mylar, FR4	PET
Použití	Nízkona pětové obvody	Aplikace vyžadují cí vysoké provozní teploty či náročné prostředí	Flexibilní displeje, RFID, solární články	Solární články, tištěná elektronika, RFID	Flexibilní displeje, tištěná elektronika	Různé aplikace tištěné elektroniky	Flexibilní displeje	Senzory

4 Pájecí slitiny

V této kapitole jsou popsány nízkoteplotní slitiny, které mají v této problematice své zastoupení. V dnešní době je k dispozici téměř 200 kovových slitin, které mají nižší teplotu tavení než tradiční slitina Sn63/Pb37. Například prvek indium (In) má mnohočetné zastoupení v těchto slitinách. Další zástupce tvoří bismut (Bi), gallium (Ga), cín (Sn) atd. Skupiny slitin, které se považují za nízkoteplotní, budou popsány níže. [38]

4.1 Tekuté kovové slitiny

V tomto případě existuje šest slitin, které se taví při 30 °C. Tyto slitiny neobsahují rtuť a mezi hlavní složku patří gallium spolu s indiem a cínem. Některé mohou obsahovat stopy zinku, který je vhodný na úpravu bodu tání gallia. [38]

Tab. 4: Tekuté kovové slitiny, (převzato z [38]).

Označení	Složení pájky hmotnostní %				Solidus °C	Likvidus °C
	Ga	In	Sn	Zn		
46L	61	25	13	1	7	8
51E	66,5	20,5	13	-	11	11
60	75,5	24,5	-	-	16	16
77	95	5	-	-	16	25
14	100	-	-	-	30	30
51	62,5	21,5	16	-	11	17

4.2 Nízkoteplotní slitiny

Tyto slitiny jsou velice často používány. Ve všech těchto slitinách je zastoupen bismut. Většina těchto slitin má i zastoupení v podobě olova a kadmia. Existují ale i varianty v tomto teplotním rozsahu, které neobsahují Pb ani Cd: [38]

- 51%In / 32,5%Bi / 16,5%Sn (60 °C eutektická) – Ind 19
- 57%Bi / 26%In / 17%Sn (79 °C eutektická) – Ind 174
- 66,3%In / 33,7%Bi (72 °C eutektická) – Ind 162
- 54%Bi / 29,7%In / 16,3%Sn (81 °C eutektická) – Ind 27

4.3 Nízkoteplotní pájecí slitiny

Nízkoteplotní slitiny můžeme ještě rozdělit do následujících podskupin:

- **Sn/Pb/Ag** – Tyto slitiny jsou velice podobné tradiční slitině (Sn63/Pb37). Jediný rozdíl spočívá ve využití malého množství stříbra, které snižuje teplotu tání, zvyšuje smykovou pevnost a odolnost proti únavě.
- **Slitiny na bázi india** – Mezi největší přednost těchto slitin se řadí výborná tepelná vodivost. Jsou také poměrně měkké. Právě tato kombinace je činí ideálními.
- **Slitiny na bázi bismutu** – Hodí se zejména jako alternativa nízkoteplotních pájek, které obsahují olovo. [38]

Tab. 5: Příklady nízkoteplotních pájecích slitin, (převzato z [38]).

Označení Ind	Složení pájky hmotnostní %						Solidus °C	Likvidus °C
	Bi	Pb	In	Sn	Cd	Zn		
41	50	28	-	22	-	-	100	100
64	55	44	1	-	-	-	120	121
224	-	-	52,2	46	-	1,8	108	108
56	54,4	43,6	-	1	1	-	104	113
45	54	-	-	26	20	-	102	103
61	53,7	43,1	-	3,2	-	-	108	119
52	54,5	39,5	-	6	-	-	102	108
53	67	-	33	-	-	-	109	109
62	55	44	-	1	-	-	117	120
1	-	-	50	50	-	-	118	125

Hlavní důvod, proč se vlastně nízkoteplotní pájení používá, spočívá v elektrickém propojení. To se samozřejmě týká i vysokoteplotního pájení, ale při použití nižších teplot jsme schopni předejít poruchám. Lze ho využít pro aplikace, jako jsou krystalové oscilátory, nízko-tající obvody v telefonech, velké množství zařízení pro IoT atd. [39]

Co se týká použití nízkotavných pájek, mohou se použít i jako indikátory teploty. Další uplatnění najdou v teploměrech nebo v hlásičích požáru. Dokonce i speciální elektrické pojistky využívají těchto slitin. [39]

Použití nízkoteplotní pájky je výhodné, protože může snížit tepelné poškození. Při použití těchto pájek odpadá mnoho závad, například delaminace či „pop-corning“. Velké množství elektronických součástí je náchylných k poškození díky vlhkosti, a proto musí být skladovány tak, aby byly chráněny před samotnou vlhkostí. Tento jev je způsoben

rychlým vzestupem teploty, ta zapříčiní, že se absorbovaná voda odpaří a tím dojde k vytvoření velkého tlaku uvnitř obalu. Následkem toho pak může dojít k tvorbě trhlin či roztržení obalu. Právě toto roztržení je označováno jako „pop-corn“ efekt. Nízkoteplotní slitiny najdou také uplatnění pro komponenty, které jsou citlivé na teplotu. [40], [41], [42]

V poslední době byl zaznamenán prudký nárůst zájmu o slitiny na bázi bismutu. Pájky, které obsahují bismut (Bi) s nízkým bodem tání jsou nyní hodně využívány. Hlavní příčina spočívá v nízké teplotě tání. Vezmeme příklad 58Bi/42Sn. Jedná se o eutektickou slitinu, která má teplotu tání 138 °C. Další variantou může být 57Bi/42Sn/1Ag, ta taje při 137 – 139 °C. V obou příkladech nejsou obsaženy stopy olova. [40], [41]

Slitina BiSnAg dosahuje nižší teploty tání než je tomu u standardní pájky Sn63/Pb37. Přesto je určena k tomu, aby vydržela provozní teplotu výrobků. Mechanické vlastnosti má zcela podobné jako SnPb, pouze neobsahuje stopy olova. Maximální teplota zpracování této slitiny je okolo 180 °C a to z důvodu zpětného toku, který se pohybuje v rozmezí 20 – 40 °C nad likvidem. Společnost HP se zabývala testováním této slitiny. Byly provedeny testy na základě pevnosti ve smyku, odolnosti proti tečení atd. Z výsledků bylo prokázáno, že ve většině podmínek má tato slitina stejné, ba dokonce lepší vlastnosti než Sn63. [40], [41]

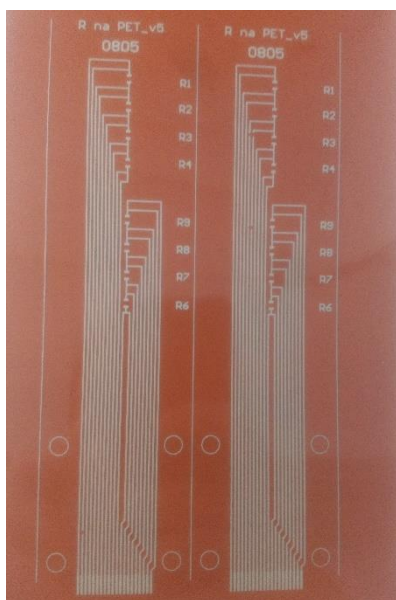
Základním stavebním kamenem pro větší množství pájek je cín. Teplota tavení se pohybuje okolo 232 °C. Použití legujících prvků nám proto umožní snížit teplotu. Mezi tyto prvky můžeme řadit In (Indium), Ga (Gallium), Bi (Bismut) a Cd (Kadmium). Obecně se moc nedoporučuje použití Cd, kvůli jeho toxicitě. Co se týká slitin na bázi gallia, ty nemají zcela praktické využití, jsou totiž likvidní i při pokojové teplotě. Z praktického hlediska se jeví bismut a indium jako nejlepší kandidáti pro nízkoteplotní slitiny. Navíc dosahují jedinečných fyzikálních vlastností. Indium v některých případech dosahuje jedinečných vlastností, na druhou stranu je o dost dražší než ostatní legující prvky. Bismut se tedy stává nejvhodnějším prvkem jak svými vlastnostmi, tak i cenou. [40], [41]

Slitiny obsahující bismut mají bohužel i svoje nevýhody. Mezi hlavní nevýhodu patří křehkost. Slitiny na bázi bismutu mají také jedinečnou vlastnost, rozpínají se po ochlazení. Další problém může nastat v přítomnosti olova. Tento problém byl koncipován už v předešlých letech. Postupně byl tento nedostatek odstraněn a dnes už jsou materiály na bázi bismutu konkurenceschopné. [40], [41]

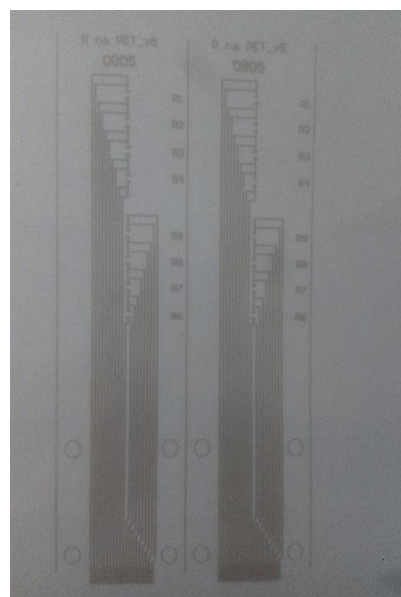
5 Praktická část

Praktická část se zabývá ověřováním vhodných úprav tištěných vrstev pro zvýšení pájitelnosti. Dále byla ověřena pájitelnost pomocí různých metod pájení.

Byl použit jeden motiv na dvou různých substrátech. Jednalo se o Kapton (viz Obr. 19) a PET (viz Obr. 20). Co se týká Kaptonu, jedná se o polyimidní substrát vytvořený společností DuPont. Oplývá velmi vysokou kvalitou a výbornými tepelnými vlastnostmi. V porovnání s ostatními polyimidovými filmy má nejvyšší tepelný odpor [43]. Oba tyto motivy byly vytištěny pomocí síťotiskového zařízení Ekra E2. Motiv byl natištěn pastou DuPont PE873. Tloušťka natištěné vrstvy síťotiskem = 120 μm .



Obr. 19: Testovací motiv – Kapton



Obr. 20: Testovací motiv – PET

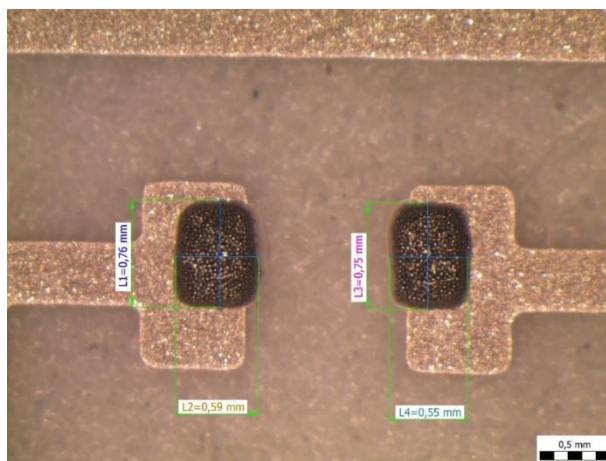
5.1 Příprava vzorků

V našem experimentu bylo vyzkoušeno několik metod pájení na výše zmíněných testovacích motivech. Byla testována metoda pájení přetavením (dusíková atmosféra při 145 °C), metoda pájení v horkých parách (230 °C) a také metoda ručního pájení přímo na testovací motivy. Při tomto pokusu byla zvolena pájka Sn60/Pb40. Samotné pájení pak probíhalo při teplotě 250 °C. Posléze byla opět vyzkoušena metoda ručního pájení, tentokrát ale bylo pájeno na papír. Bylo pájeno při teplotách 250 °C, 280 °C, 300 °C a 305 °C.

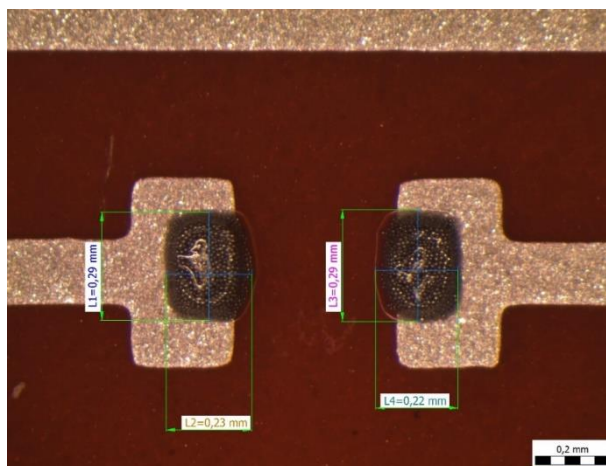
5.1.1 První vzorek – Pájení přetavením

V tomto experimentu byla v první fázi nanášena pájecí pasta přes šablonu. Byly použity oba dva substráty. Zvolila se pasta L20-LT142ZH se složením pájky Sn42/Bi58.

V druhé fázi byly motivy již s nanášenou pastou přesunuty pod mikroskop se zvětšením 30x. Nastavilo se požadované měřítko, vybrala se kalibrace a posléze byly snímky vyfoceny (viz Obr. 21, 22).



Obr. 21: Pasta před přetavením pod mikroskopem – PET

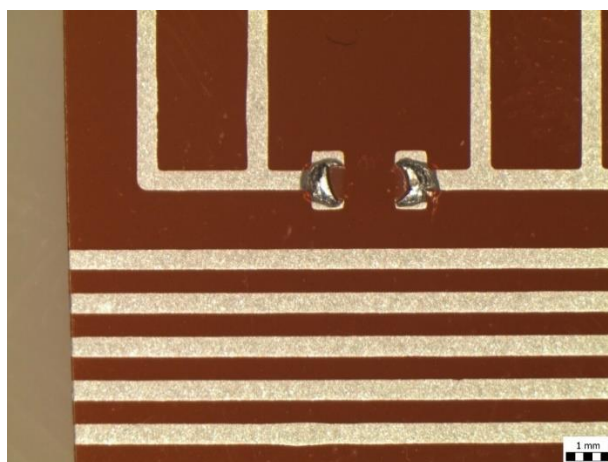


Obr. 22: Pasta před přetavením pod mikroskopem – Kapton

V následujícím kroku byly motivy s nanášenou pastou umístěny do zařízení určeného pro pájení přetavením (viz Obr. 23). Přetavení probíhalo v dusíkové atmosféře při teplotě 145 °C. Celkový čas přetavení se pohyboval okolo 10 minut. Výsledný vzorek byl poté opět přenesen pod mikroskop. (viz Obr. 24).



Obr. 23: VSU20 – pájení přetavením



Obr. 24: Výsledný vzorek po přetavení – Kapton

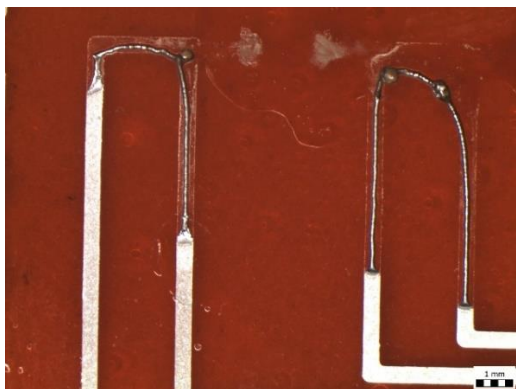
5.1.2 Druhý vzorek – Pájení v horkých parách

V této části pokusu byl použit pouze Kapton. Je to z toho důvodu, že při této metodě dojde k zahřívání substrátu okolo 230 °C. Kdyby byl použit PET, došlo by k poškození substrátu, jelikož PET může být zahříván pouze do 145 – 150 °C.

V prvním kroku byly naneseny kuličky pájky na motiv. Poté byl motiv přenesen do zařízení určeného pro pájení v horkých parách (viz Obr. 25). Celková doba pájení se pohybovala okolo 25 – 30 minut. Po dokončení tohoto procesu byl motiv opět přesunut pod mikroskop (viz Obr. 26).



Obr. 25: Zařízení Asscon Quicky 300 – Pájení v parách



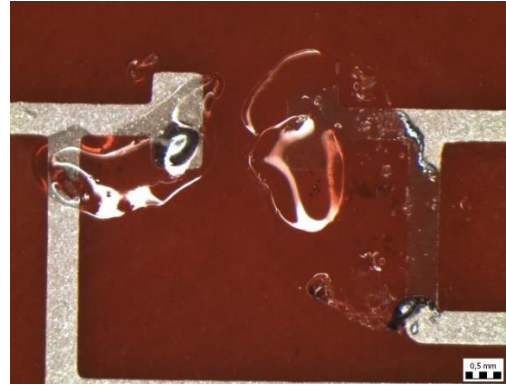
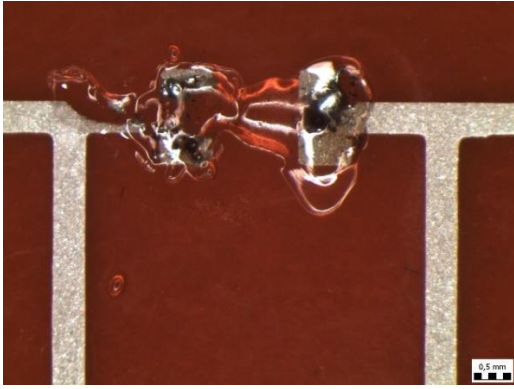
Obr. 26 Výsledné vzorky po pájení v horkých parách

5.1.3 Třetí vzorek – Ruční pájení

V této části byla vyzkoušena metoda ručního pájení přímo na testovací motivy. Byla použita pájka Sn60/Pb40. Samotné pájení poté probíhalo při teplotě 250 °C. Jako pájecí stanice byla využita ERSA Icon 2 (viz Obr. 27). Testování probíhalo jak na PET, tak i na Kaptonu. Snímky byly opět pořízeny pod mikroskopem (viz Obr. 28, 29).



Obr. 27: ERSA Icon 2



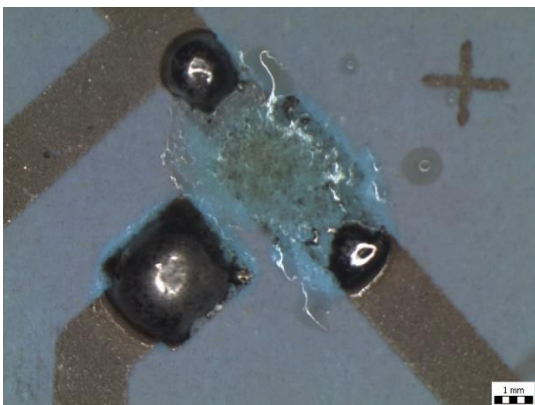
Obr. 28: Výsledné vzorky po ručním pájení – Kapton



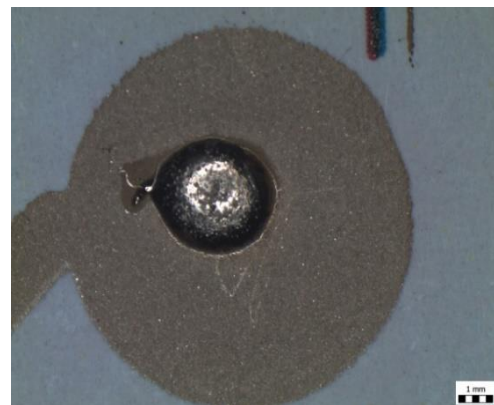
Obr. 29: Výsledné vzorky po ručním pájení – PET

5.1.4 Čtvrtý vzorek – Pájení na papír

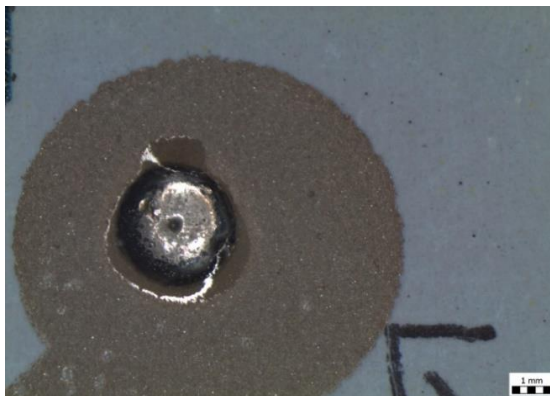
Poslední možnost ručního pájení byla vyzkoušena přímo na papír, kde byl již vtištěn obvod. Pájení probíhalo při teplotách 250 °C, 280 °C a 300 °C. Po dokončení pájení byl každý jednotlivý spoj pájený při různé teplotě přesunut pod mikroskop. (viz Obr. 30, 31, 32).



Obr.30: Výsledný spoj – pájení na papír 250°C

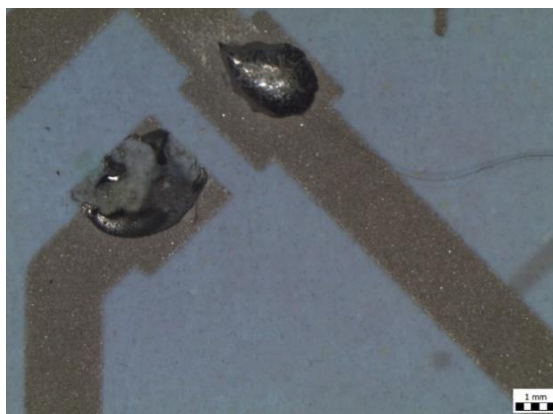


Obr. 31: Výsledný spoj – pájení na papír 280°C



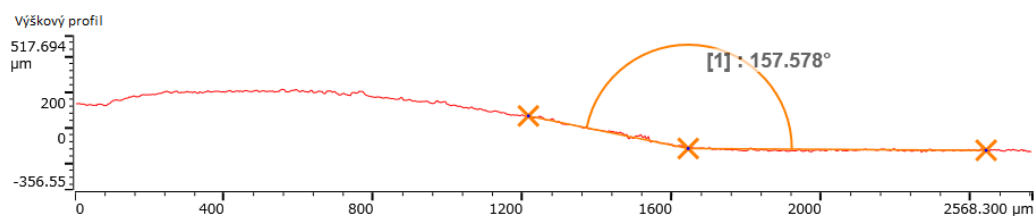
Obr. 32: Výsledný spoj – pájení na papír 300 °C

Bylo také vyzkoušeno použití jiné pájky. Zvolila se tedy pájka SAC305 se složením Sn96,5/Ag3/Cu0,5. Pájení probíhalo při teplotě 305 °C. (viz Obr. 33).



Obr. 33: Výsledný spoj – pájení na papír 305 °C

Z tohoto pokusu bylo vyvozeno, že pájka Sn60/Pb40 byla daleko lépe pájitelná než SAC305, jelikož došlo k rychlému vsáknutí pojiva a stříbra, což zapříčinilo lepší pájitelnost. Smáčecí úhel nám vyšel 22,422°.



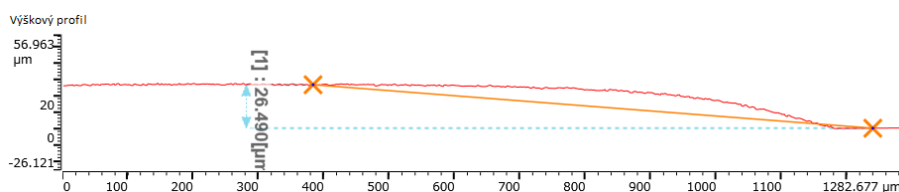
Obr. 34: Smáčecí úhel, změřený pomocí laserového konfokálního mikroskopu

Po použití a vyhodnocení všech těchto experimentů byl vyvozen závěr, že dochází k rozpouštění stříbra v pájce, a to je zcela nežádoucí. Byla tedy zvolena jiná alternativa a to konkrétně šablonový tisk (tloušťka šablony = 80 μm).

5.2 Optimalizace experimentů

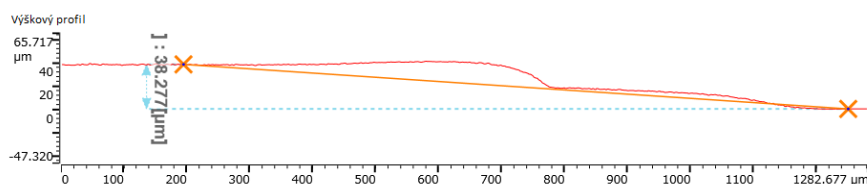
Metody pájení zůstaly stejné, pouze přibyla metoda pájení horkým vzduchem. Tato metoda byla zvolena z důvodu šetrnosti pro vybrané substráty. Měli jsme tedy k dispozici opět dva různé substráty (PET, Kapton), ale s různou tloušťkou vrstvy Ag.

1. Vrstva Ag – 26,490 μm



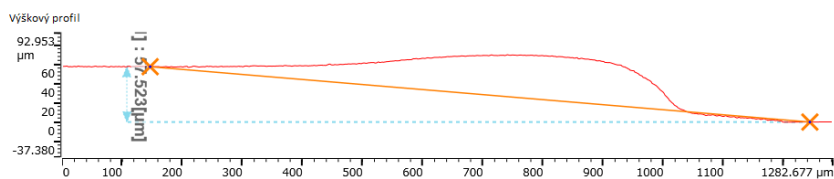
Obr. 35: První vrstva Ag

2. Vrstva Ag – 38,277 μm



Obr. 36: Druhá vrstva Ag

3. Vrstva Ag – 57,523 μm



Obr. 37: Třetí vrstva Ag

5.2.1 Pájení přetavením

Způsob testování probíhal zcela identickým způsobem jako u prvního experimentu. Pasta byla nanesena nejen na vzorky se třemi vrstvami Ag, ale i na druhou či první vrstvu. Výsledné snímky byly opět pořízeny pod mikroskopem.



Obr. 38: První vrstva Ag – PET



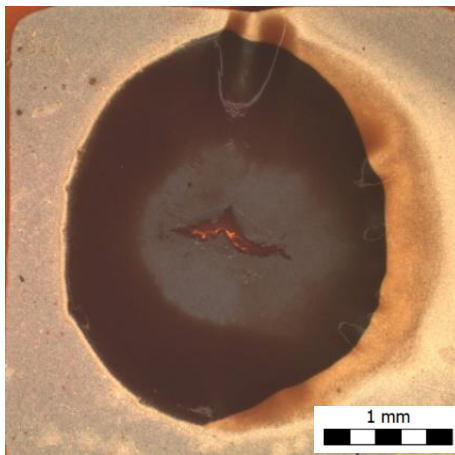
Obr. 39: První vrstva Ag – Kapton

Tab. 6: Smáčecí úhel - pájení přetavením

Počet vrstev Ag	Substrát	Smáčecí úhel [°]
1.	PET	20,933
2.	PET	52,807
3.	PET	25,284
1.	Kapton	17,503
2.	Kapton	25,231
3.	Kapton	54,183

5.2.2 Pájení v horkých parách

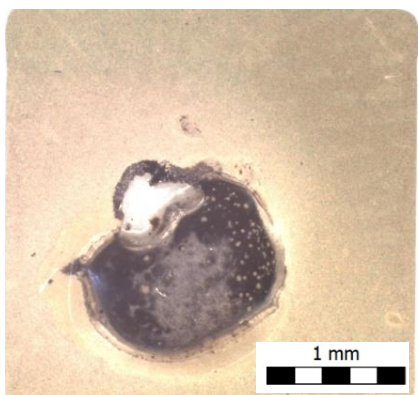
Princip testování opět identický jako u prvního pokusu. Byl testován pouze Kapton.



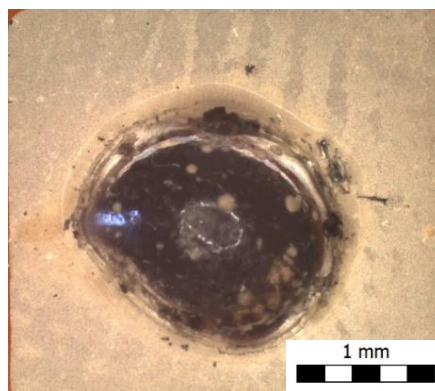
Obr. 40: První vrstva Ag – Kapton

5.2.3 Ruční pájení

Postup opět identický jako při prvním pokusu. Bylo pájeno při teplotách 250 °C, 280 °C, 300 °C a 305 °C. Byla zvolena pájka Sn60/Pb40 a SAC305. Při teplotě 280 °C a 300 °C bylo dosaženo podobných výsledků na druhé i třetí vrstvě (PET, Kapton), jako na vrstvě první. Při použití pájky SAC305 se nám podařilo pájet pouze při teplotě 305 °C. Zvýšením teploty již došlo k poškození spoje.



Obr. 41: První vrstva Ag – PET 250°C - SnPb



Obr. 42: První vrstva Ag – Kapton 250°C - SnPb



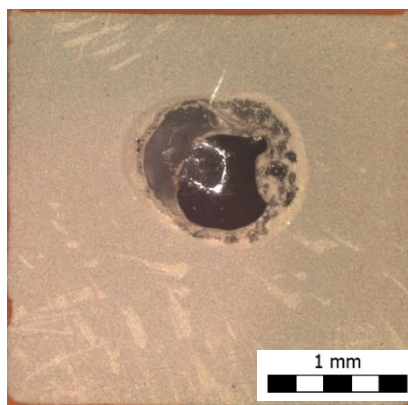
Obr. 43: První vrstva Ag – Kapton 305 °C – SAC305

Tab. 7: Smáčecí úhel - ruční pájení při 250 °C

Počet vrstev Ag	Substrát	Smáčecí úhel [°]
1.	PET	37,843
2.	PET	38,279
3.	PET	23,030

5.2.4 Pájení horkým vzduchem

Tato metoda nebyla při prvním pokusu zvolena. V prvním kroku byla nanášena ta samá pasta jako u metody pájení přetavením. Pro náš účel byl zvolen pouze Kapton. Poté byla šablona přesunuta do zařízení určeného pro toto pájení. Teplota pájení se pohybovala okolo 180 °C. Samotné pájení probíhalo pouze několik vteřin.

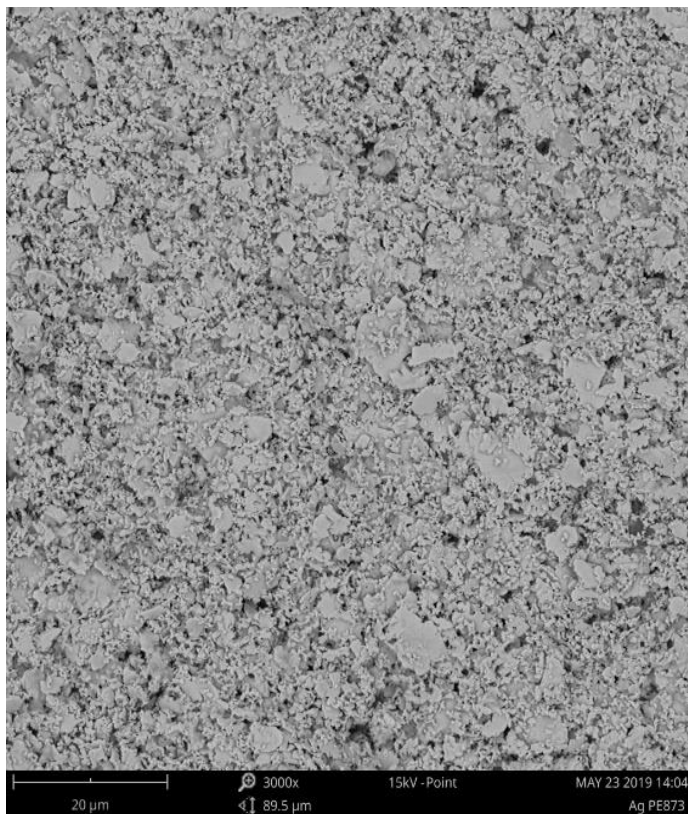


Obr. 44: První vrstva Ag – Kapton

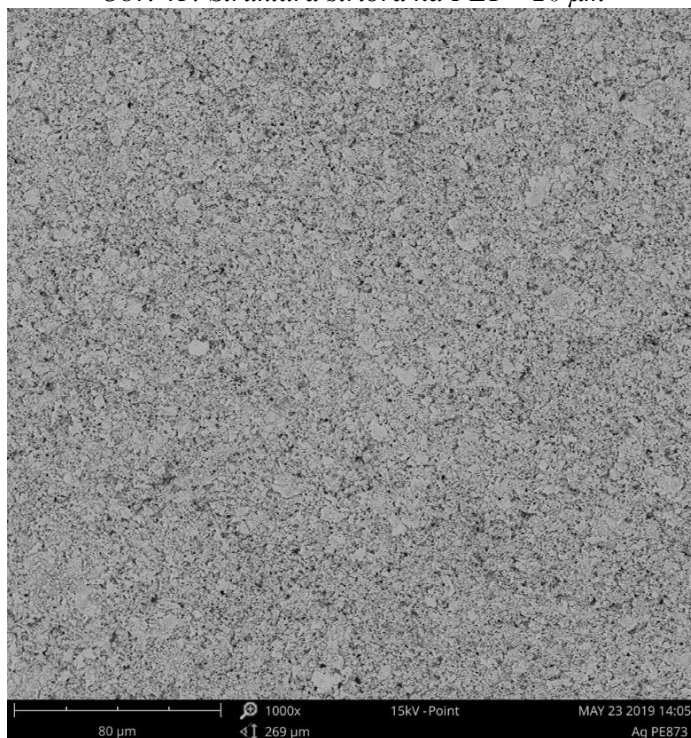
Tab. 8: Smáčecí úhel - pájení horkým vzduchem

Počet vrstev Ag	Substrát	Smáčecí úhel [°]
1.	Kapton	13,394
2.	Kapton	20,74
3.	Kapton	12,123

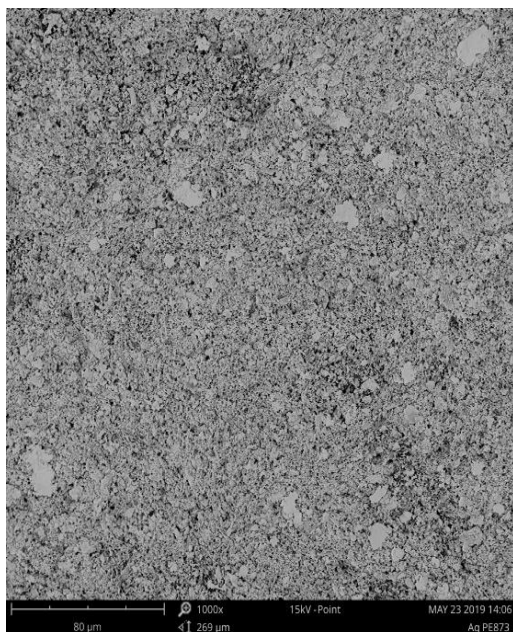
Po dokončení všech těchto experimentů bylo pořízeno několik snímků pomocí SEM. Byly pořízeny snímky struktury stříbra na PET (viz Obr. 45, 46), papíru (viz Obr. 47, 48) a také samotná struktura papíru (viz Obr. 49, 50).



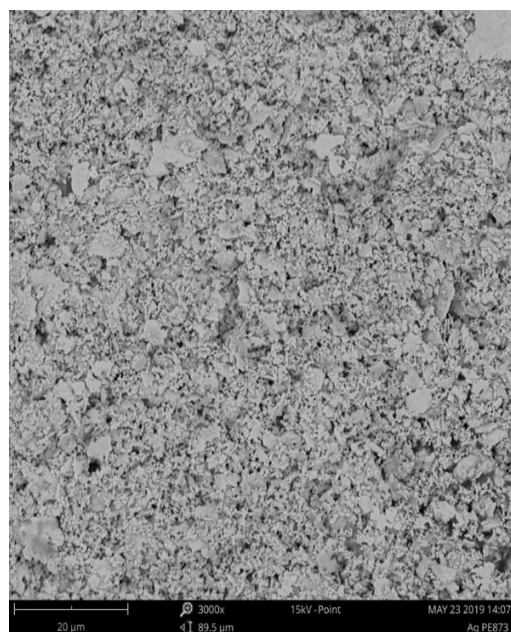
Obr. 45: Struktura stříbra na PET – 20 μm



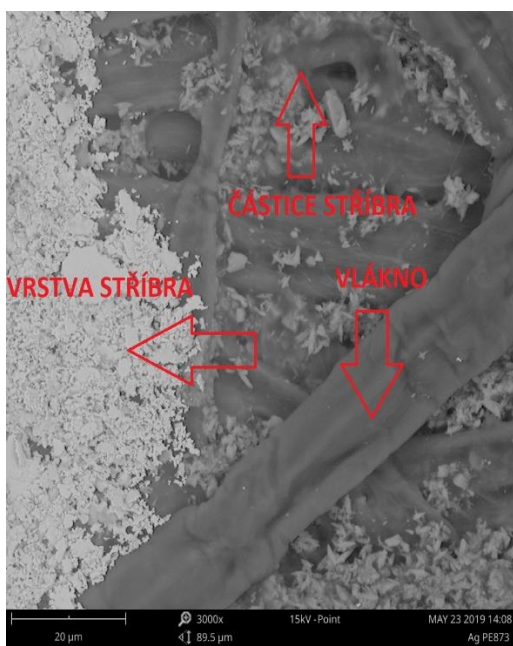
Obr. 46: Struktura stříbra na PET – 80 μm



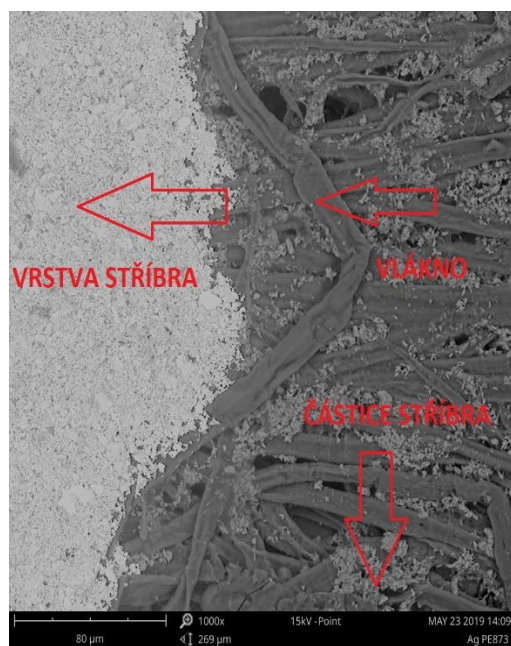
Obr. 47: Struktura stříbra na papíru – 80 μm



Obr. 48: Struktura stříbra na papíru – 20 μm



Obr. 49: Struktura papíru – 20 μm



Obr. 50: Struktura papíru – 80 μm

Závěr

V rámci této práce byla v první a druhé části provedena rešerše na vhodné způsoby tisku a vhodné metody pájení použitelné pro tištěnou elektroniku. Bylo popsáno, co vlastně znamená tištěná elektronika a kde najde svá uplatnění. V první části byly také popsány rozdíly mezi fotonickým a tepelným vytvrzováním. Nebyla opomenuta problematika vodivého inkoustu a výroba tištěného motivu.

Ve druhé části byly uvedeny vhodné metody pájení pro tištěnou elektroniku. Není zde popsána metoda pájení vlnou, jelikož není vhodná pro flexibilní tištěnou elektroniku.

Ve třetí části je uveden seznam vhodných tiskových inkoustů a past do třech samostatných tabulek. Co se týká pájitelných tiskových past a inkoustů, ty nejsou v současné době na trhu k dispozici, proto byly uvedeny vhodné inkousty a pasty, které jistě najdou svá uplatnění.

Ve čtvrté části byla opět provedena rešerše na nízkoteplotní pájecí slitiny. Jsou zde také uvedeny příklady nízkoteplotních pájecích slitin.

V praktické části bylo testováno několik experimentů, díky kterým byla zkoumána pájitelnost na dvou vybraných substrátech. V prvním případě byly motivy vytištěny pomocí sítotiskového zařízení. Poté již byla zkoumána pájitelnost pomocí různých metod pájení. Závěr z tohoto experimentu byl takový, že došlo k rozpuštění stříbra v pájce. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo při pájení na papíře. Struktura papíru je uvedena v příloze. Tento snímek byl pořízen pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu.

Jelikož nám první experiment nepřinesl příliš pozitivní výsledky, byla tedy zvolena jiná alternativa a to šablonový tisk. V tomto pokusu přibyla metoda pájení horkým vzduchem. Tento experiment dopadl o mnoho lépe, což dokládají i hodnoty smáčecího úhlu, které byly změřeny pomocí laserového konfokálního mikroskopu. Zde již nedošlo k rozpuštění stříbra v pájce. Vynikajících výsledků bylo dosaženo u metody pájení horkým vzduchem, naopak u metody pájení v horkých parách, došlo k viditelnému poškození vrstev a substrátu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

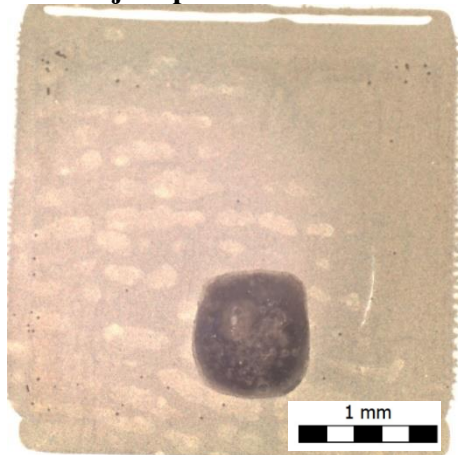
- [1] *Printed Electronics Europe 2019 | 10 - 11 Apr | Estrel Convention Center, Berlin, Germany* [online]. [vid. 2018-11-27]. Dostupné z: <https://www.idtechex.com/printed-electronics-europe/show/en/>
- [2] KLAUZ, Milan. Jak se vyrábí tištěná elektronika. *DPS* [online]. 2013 [vid. 2018-04-05]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:3140/jak-se-vyrabi-tistena-elektronika>
- [3] TRANSFORM, E T D. Progresivní tlustovrstvé technologie v elektronických aplikacích [online]. 2008, 5–7. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36505.pdf>
- [4] Tlusté vrstvy [online]. nedatováno. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/05a_tluste_vrstvy.pdf
- [5] *What Is Photonic Curing | NovaCentrix* [online]. [vid. 2019-03-25]. Dostupné z: https://www.novacentrix.com/tech/photonic_curing
- [6] *Photonic Curing for Printed Electronics* [online]. [vid. 2019-03-25]. Dostupné z: <http://web.aimcal.org/External/WCPages/WCWebContent/WebContentPage.aspx?ContentID=1157>
- [7] *Curing Functional Inks for Printed Electronics* [online]. [vid. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.asme.org/engineering-topics/articles/manufacturing-processing/curing-functional-inks-for-printed-electronics>
- [8] *What Is Thin Film Deposition?* [online]. [vid. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.semicore.com/news/81-what-is-thin-film-deposition>
- [9] *Voltera | Curing conductive ink* [online]. [vid. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://www.voltera.io/docs/curing-conductive-ink/>
- [10] CRUZ, Sílvia Manuela Ferreira, Luís A. ROCHA a Júlio C. VIANA. Printing Technologies on Flexible Substrates for Printed Electronics. In: *Flexible Electronics* [online]. B.m.: InTech, 2018 [vid. 2019-02-26]. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.76161
- [11] SALAM, B. a B.K. LOK. Solderability and reliability of printed electronics. In: *2008 15th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits* [online]. B.m.: IEEE, 2008, s. 1–4. ISBN 978-1-4244-2039-1. Dostupné z: doi:10.1109/IPFA.2008.4588211
- [12] *Printed Electronics | Biomedical Tutorials | Mepits* [online]. [vid. 2019-02-05]. Dostupné z: <https://www.mepits.com/tutorial/354/trending-technologies/printed-electronics-an-innovation-to-printed-circuits>
- [13] *Percolation Threshold - an overview | ScienceDirect Topics* [online]. [vid. 2019-03-31]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/percolation-threshold>
- [14] WILLFAHRT, Andreas. *Screen Printing Technology for Energy Devices* [online]. 2018. ISBN 9789176852743. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=BM11DwAAQBAJ&pg=PR5&lpg=PR5&dq=Screen+Printing+Technology+for+Energy+Devices+Andreas+Willfahrt&source=bl&ots=iYmaqK1qRw&sig=ACfU3U1bzopUQy5yIZ3n_VFdyjvbvTkV7Rw&hl=cs&a=X&ved=2ahUKEwIemJCSybbhAhVP-qQKHZxjCCQQ6AEwCnoECAgQAQ#
- [15] *What is Printed Electronics? What are the Applications? - Pannam* [online]. [vid. 2018-11-27]. Dostupné z: <https://www.pannam.com/blog/what-is-printed-electronics/>
- [16] *How To Solder: A Complete Beginners Guide - Makerspaces.com* [online]. [vid. 2019-02-04]. Dostupné z: <https://www.makerspaces.com/how-to-solder/>

- [17] *7.1.1 Soldering Basics* [online]. [vid. 2019-02-04]. Dostupné z: <http://www.circuitrework.com/guides/7-1-1.html>
- [18] *Pájený spoj | SMTcentrum - služby v oblasti pájení* [online]. [vid. 2019-03-29]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/pajeny-spoj/>
- [19] DUŠEK, Miloš, Ivan SZENDIUCH, Jindrich BULVA a Michal ZELINKA. Wettability – SnPb and Lead-free. *Http://Www.Umel.Feec.Vutbr.Cz/* [online]. 2011, 2–6. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/novinky/wettability.pdf>
- [20] *Kritéria pro pájený spoj | SMTcentrum - služby v oblasti pájení* [online]. [vid. 2019-04-04]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/kriteria-pro-pajeny-spoj/>
- [21] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice, pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [22] *Pájení přetavením | SMTcentrum - služby v oblasti pájení* [online]. [vid. 2019-02-21]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-pretavenim/pajeni-pretavenim/>
- [23] *Reflow Soldering Process - Surface Mount Process* [online]. [vid. 2019-02-21]. Dostupné z: <http://www.surfacemountprocess.com/reflow-soldering-process.html>
- [24] *Přetavení infračerveným zářením | SMTcentrum - služby v oblasti pájení* [online]. [vid. 2019-02-24]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-pretavenim/pretaveni-infracervenym-zarenim/>
- [25] *Infračervené a konvenční pájení - SIAD Società Italiana Acetilene e Derivati* [online]. [vid. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://www.siad.com/cs/odvetvi/elektronicke-sestavy/pouziti/infracervene/konvekcni-natavovaci-pajeni>
- [26] SUENAGA, N., M. NAKAZONO a H. TSUCHIYA. Laser soldering. *Welding International* [online]. 1988, 2(3), 269–276. ISSN 0950-7116. Dostupné z: doi:10.1080/09507118809446540
- [27] *Pájení laserem | SMTcentrum - služby v oblasti pájení* [online]. [vid. 2019-02-24]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-laserem/pajeni-laserem/>
- [28] *Pájení v parách | SMTcentrum - služby v oblasti pájení* [online]. [vid. 2019-02-25]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-v-parach/pajeni-v-parach/>
- [29] *V čem nám může pomoci pájení v parách | PBT* [online]. [vid. 2019-02-25]. Dostupné z: <https://www.pbt.cz/cz/clanky/v-cem-nam-muze-pomoci-pajeni-v-parach>
- [30] *Pájení ostřeným proudem horkého vzduchu | SMTcentrum - služby v oblasti pájení* [online]. [vid. 2019-02-25]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/rucni-pajeni/pajeni-ostrenym-proudem-horkeho-vzduchu/>
- [31] SMT, Pro. Pájení [online]. nedatováno. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/56864/mod_resource/content/1/Pájení.pdf
- [32] *NovaCentrix: Photonic Soldering Enables Flexible Electronics Integration - The Independent Global Source for the Flexible and Printed Electronics Industry*. [online]. [vid. 2019-02-07]. Dostupné z: https://www.printedelectronicsnow.com/contents/view_live-from-shows/2018-11-09/novacentrix-photonic-soldering-enables-flexible-el
- [33] ARUTINOV, Gari, Rob HENDRIKS a Jeroen Van Den BRAND. Photonic Flash Soldering on Flex Foils for Flexible Electronic Systems. In: *2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)* [online]. B.m.: IEEE, 2016, s. 95–100. ISBN 978-1-5090-1204-6. Dostupné z: doi:10.1109/ECTC.2016.179

- [34] *PRINTED ELECTRONICS – Applied Nanotech, Inc.* [online]. [vid. 2019-02-26]. Dostupné z: <http://www.appliednanotech.net/printed-electronics/>
- [35] *Printed Electronic Materials for Biosensors, Switches, Antennas, Sensors | DuPont | DuPont USA* [online]. [vid. 2019-02-26]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/products-and-services/electronic-electrical-materials/printed-electronics.html>
- [36] *Thick-Film Materials and Ceramic Tapes from ESL ElectroScience | ESL Electroscience* [online]. [vid. 2019-03-06]. Dostupné z: <http://electroscience.com/>
- [37] *Gwent Group, Leaders in paste manufacturing, sensor/ biosensor development and Instrumentation .* [online]. [vid. 2019-05-29]. Dostupné z: <http://gwent.org/>
- [38] *A Guide to Low Temperature Solder Alloys | Jim Hisert | Indium Corporation Blogs | Indium | Solder Alloys* [online]. [vid. 2019-03-27]. Dostupné z: <https://www.indium.com/blog/a-guide-to-low-temperature-solder-alloys.php>
- [39] *Low-Temperature Solder by Indium Corporation* [online]. [vid. 2019-03-27]. Dostupné z: <https://www.indium.com/solder-paste-and-powders/low-temperature/>
- [40] *Growing Interest in Bi-Containing Solder Alloys: Bismuth Rocks! | Ed Briggs | Indium Corporation Blogs | Solder Alloys | BGA | Bismuth | Gallium | Indium Corporation | Indium | Indium Alloy | Lead Free Solder | Pb-Free Solder | Pb-Free Soldering | Rewor* [online]. [vid. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.indium.com/blog/growing-interest-in-bi-containing-solder-alloys-bismuth-rocks.php>
- [41] SANDY, Brook, Edward BRIGGS a Ronald LASKY. Indium Corporation Tech Paper Advantages of Bismuth-based Alloys for Low Temperature Pb-Free Soldering and Rework. *Indium Corporation Tech Paper* [online]. 2011, 1–7. Dostupné z: http://www.smtnet.com/library/files/upload/advantages_of_bismuth_based_alloys_for_low_temp_soldering.pdf
- [42] *Pop Corn Effect - Solderlexicon* [online]. [vid. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.kurtzrsa.com/electronics-production-equipment/solderlexicon/begriff/pop-corn-effect.html>
- [43] *Kapton® Film and Kapton® Adhesive Tape | cmc.de* [online]. [vid. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://en.cmc.de/page/kapton-folie-klebeband>

Přílohy

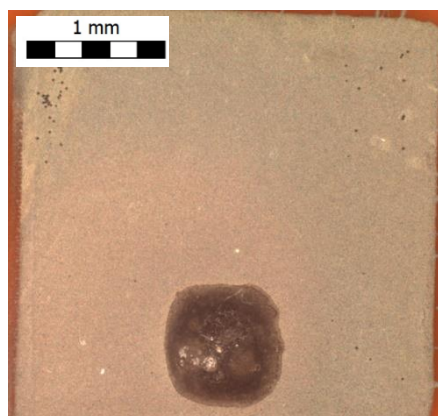
Příloha A – Pájení přetavením



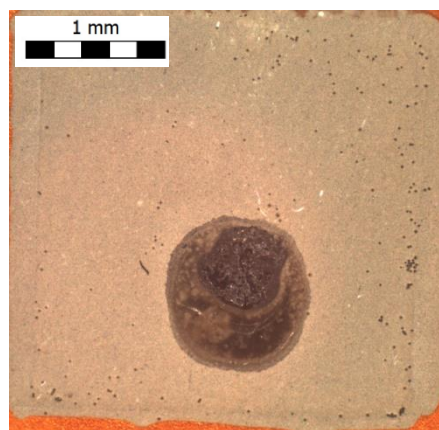
Obr. 51: Druhá vrstva Ag – PET



Obr. 52: Třetí vrstva Ag – PET

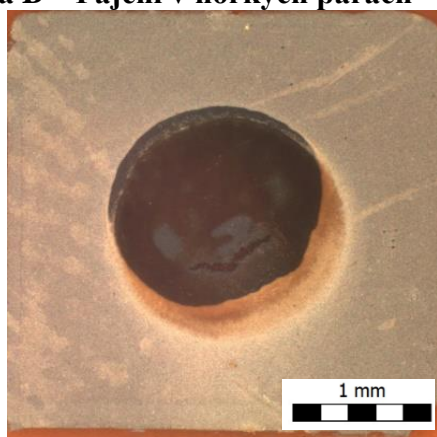


Obr. 53: Druhá vrstva Ag – Kapton

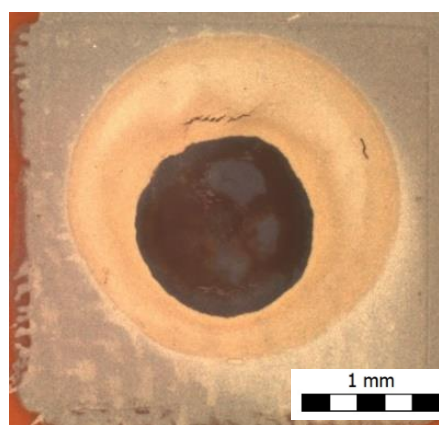


Obr. 54: Třetí vrstva Ag – Kapton

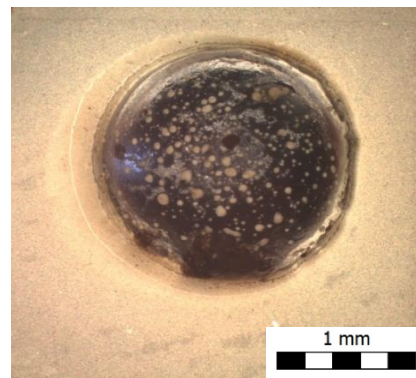
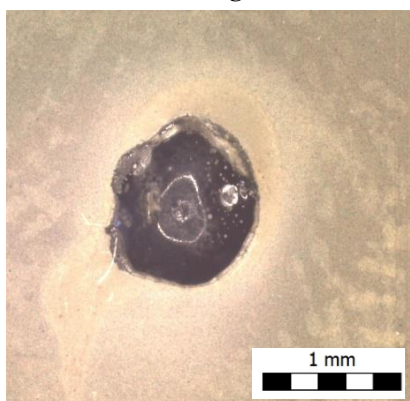
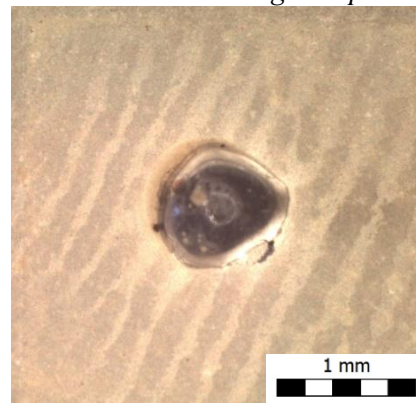
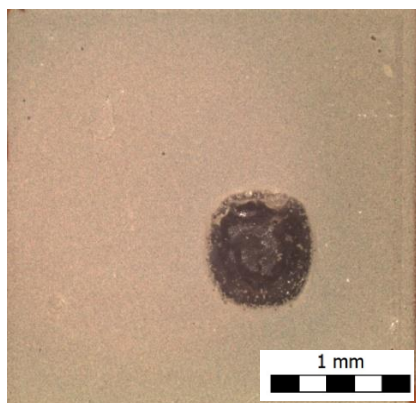
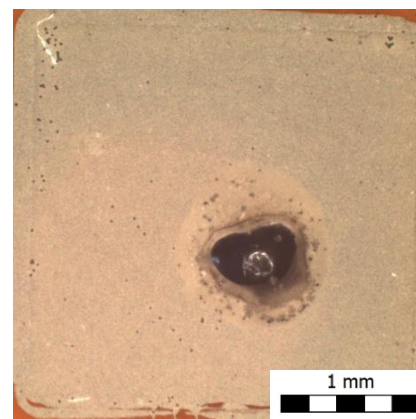
Příloha B – Pájení v horkých parách



Obr. 55: Druhá vrstva Ag – Kapton



Obr. 56: Třetí vrstva Ag – Kapton

Příloha C – Ruční pájení*Obr. 57: Druhá vrstva Ag – PET 250°C**Obr. 58: Druhá vrstva Ag – Kapton 250°C**Obr. 59: Třetí vrstva Ag – PET 250°C**Obr. 60: Třetí vrstva Ag – Kapton 250°C***Příloha D – Pájení horkým vzduchem***Obr. 61: Druhá vrstva Ag – Kapton**Obr. 62: Třetí vrstva Ag – Kapton*