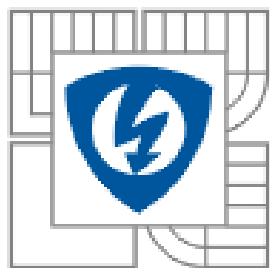


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ROZTÉKAVOST BEZOLOVNATÝCH PÁJEK NA KERAMICKÝCH SUBSTRÁTECH

WETTING OF LEAD-FREE SOLDERS ON CERAMIC SUBSTRATES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUBOMÍR LIPAVSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARTIN ADÁMEK, Ph.D.

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student: Bc. Lubomír Lipavský
Ročník: 2

ID: 125523
Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Roztékavost bezolovnatých pájek na keramických substrátech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s technologií bezolovnatého pájení v ochranné atmosféře a testováním pájených spojů se zaměřením na test roztékavosti. Teoreticky porovnejte vlastnosti keramického substrátu a substrátu pro výrobu plošných spojů typu FR 4 v souvislosti s roztékavostí pájky. Navrhněte testovací motiv na keramický substrát pro testování roztékavosti bezolovnatých pájek. Otestujte roztékavost vybrané bezolovnaté pájky na dvou površích keramického substrátu (Ag a AgPd) při různých koncentracích kyslíku v pracovní ochranné atmosféře a porovnejte je.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 29.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Martin Adámek, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.
Předseda oborové rady

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 zabývá problematikou bezolovnatého pájení v ochranné atmosféře se zaměřením na test roztékavosti. Teoretická část je zaměřena na druhy bezolovnatých pájek, zkoušky smáčivosti prováděné na pájených spojích, různé metody pájení přetavením, nebo na porovnání vlivu základního materiálu v závislosti na roztékavosti pájky. Cílem praktické části je otestování a porovnání roztékavosti vybrané bezolovnaté pájky na dvou vodivých površích při různých koncentracích kyslíku v ochranné dusíkové atmosféře. Testování se provádí na keramickém substrátu, čímž se odlišuje od prací, které jsou prováděné na organickém substrátu. U přetavené pájky je dále ukázán růst krystalů na povrchu v závislosti na koncentraci ochranné atmosféry.

Klíčová slova:

Bezolovnaté pájky, roztékavost, pájení přetavením, keramický substrát, dusíková atmosféra.

Abstract:

This master's thesis deals with issue of lead-free soldering in protective atmosphere with focus on wetting test. Theoretical part is focused on the types of lead-free solders, wettability tests performed on solder joints, different types of soldering or comparison of influence of the base material in regards to the wetting of the solder. The goal of practical part is testing and comparison of spreadability of selected lead-free solder on two conductive surfaces with different concentration of oxygen in protective nitrogen atmosphere. Testing has been performed on ceramic substrate which differs this method from others, performed on organic substrate. For an over-melted solder, the crystal-growth on surface in regards to protective atmosphere concentration is shown.

Keywords:

Lead – free solder, spreadability, reflow soldering, ceramic substrate, nitrogen atmosphere.

Bibliografická citace díla:

LIPAŤSKÝ, L. *Roztěkavost bezolovnatých pájek na keramických substrátech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Adámek, Ph.D..

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne:

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Adámkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc při plnění úkolů realizovaných v mé diplomové práci. Dále děkuji Ing. Alexandru Otáhalovi za pomoc v laboratořích a za cenné rady a náměty, které mi poskytl při zpracování mé diplomové práce.

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

Obsah

ÚVOD.....	11
1 BEZOLOVNNATÉ PÁJKY	13
1.1 ÚVOD DO BEZOLOVNNATÝCH PÁJEK.....	13
1.2 PÁJKA SN/AG/CU.....	14
1.3 PÁJKA SN/AG.....	15
1.4 PÁJKA SN/CU.....	15
1.5 PÁJKA SN/SB.....	15
1.6 ČISTOTA PÁJECÍ SLITINY	15
1.7 TAVIDLA.....	16
2 ANORGANICKÉ ZÁKLADNÍ MATERIÁLY	19
2.1 TYPY ANORGANICKÝCH MATERIÁLŮ	19
3 VLIV ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU NA ROZTÉKAVOST	21
3.1 POROVNÁNÍ ZÁKLADNÍCH MATERIÁLŮ	21
3.1.1 <i>Drsnost povrchu</i>	23
4 METODY NANÁŠENÍ PÁJECÍCH PAST	24
4.1 DISPENZER.....	24
4.2 SÍTOTISK.....	24
4.3 ŠABLONOVÝ TISK.....	25
5 TESTOVÁNÍ PÁJENÝCH SPOJŮ	26
5.1 ÚVOD DO TESTOVÁNÍ PÁJENÝCH SPOJŮ	26
5.2 ZKOUŠKY SMÁČIVOSTI	27
5.2.1 <i>Test roztékavosti</i>	27
5.2.2 <i>Metoda smáčecích vah</i>	28
5.2.3 <i>Zkouška pájecí lázni</i>	29
5.2.4 <i>Metoda SSBA a SBSA</i>	29
6 PÁJENÍ PŘETAVENÍM	31
6.1 OCHRANNÁ ATMOSFÉRA.....	35
6.1.1 <i>Dusíková atmosféra</i>	36
6.1.2 <i>Defekty pájení</i>	37
6.1.3 <i>Jiné typy atmosfér</i>	37
7 PRAKTICKÁ ČÁST.....	38
7.1 NÁVRH A VÝROBA TESTOVACÍCH DESEK	38
7.2 MĚŘENÍ ROZTÉKAVOSTI PÁJECÍ PASTY	42
7.2.1 <i>Porovnání vodivých povrchů v závislosti na velikosti roztečení pájky</i>	43
7.2.2 <i>Porovnání velikosti krystalů v pájce v závislosti na koncentraci kyslíku O₂</i> ...	44
7.2.3 <i>EDX materiálová analýza</i>	45
7.3 NAMĚŘENÉ HODNOTY ROZTÉKAVOSTI PÁJECÍ PASTY	45
7.3.1 <i>Porovnání roztečení pájecí pasty v závislosti na použitém vodivém povrchu, měřeno s prstencem</i>	45

7.3.2 Porovnání roztečení pájecí pasty v závislosti na použitém vodivém povrchu, měřeno bez prstence	48
7.3.3 Porovnání roztečení tavidla v závislosti na použitém vodivém povrchu	50
7.3.4 Porovnání výšky přetaveného vrchlíku v závislosti na koncentraci kyslíku O_2	52
7.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	53
ZÁVĚR	55
POUŽITÁ LITERATURA	57
PŘÍLOHY	60
PŘÍLOHA A: FOTODOKUMENTACE VRCHLÍKŮ PRO AG VODIVÝ POVRCH	61
PŘÍLOHA B: FOTODOKUMENTACE VRCHLÍKŮ PRO AGPd VODIVÝ POVRCH	63
PŘÍLOHA C: EDX MATERIÁLOVÁ ANALÝZA	65

Seznam obrázků

OBR. 3.1: POVRCH VODIVÉ VRSTVY AG.	23
OBR. 3.2: POVRCH VODIVÉ VRSTVY AGPd.	23
OBR. 3.3: CU + POVRCHOVÁ ÚPRAVA ENIG.....	23
OBR. 3.4: CU + POVRCHOVÁ ÚPRAVA IMERZNÍ SN.	23
OBR. 4.1: TVAR APERTURY U RŮZNĚ ZHOTOVENÝCH ŠABLON DLE [1].	25
OBR. 5.1: TEST ROZTEKAVOSTI, A) IDEÁLNÍ NESMÁČENÍ – VYTVOŘÍ SE KULIČKA PÁJKY, B) ROZTEČENÁ PÁJECÍ PASTA DLE [7].	28
OBR. 5.2: METODA MĚŘENÍ SMÁČECÍ SÍLY DLE [25].	28
OBR. 5.3: PRŮBĚHY SMÁČECÍCH SIL DLE [25].	29
OBR. 5.4: HODNOCENÍ SMÁČIVOSTI PÁJENÉHO SPOJE PODLE SMÁČECÍHO ÚHLU DLE [11].	30
OBR. 6.1: TEPLOTNÍ PROFIL PRO PÁJENÍ PŘETAVENÍM DLE [11].	31
OBR. 6.2: ISHIKAWŮV DIAGRAM PRO PROCES PÁJENÍ PŘETAVENÍM [27].	32
OBR. 6.3: KONVEKČNÍ PEC ERS A DETAIL TRYSEK [11].	33
OBR. 6.4: KONDENZAČNÍ PÁJENÍ, A) PRINCIP PÁJENÍ PŘETAVENÍM KONDENZACÍ PAR, B) TEPLOTNÍ PROFIL PŘI PÁJENÍ V PARÁCH DLE [11].	34
OBR. 6.5: PŘETAVOVACÍ PEC S INFRAČERVENÝM OHŘEVEM [11].	34
OBR. 6.6: SROVNÁNÍ DUSÍKOVÉ ATMOSFÉRY SE VZDUCHEM DLE [1].	36
OBR. 7.1: VÍCENÁSOBNÝ TESTOVACÍ MOTIV.	38
OBR. 7.2: VYPÁLENÝ SUBSTRÁT S VÍCENÁSOBNÝM TESTOVACÍM MOTIVEM.	39
OBR. 7.3: VÝSLEDNÁ TESTOVACÍ DESKA.....	39
OBR. 7.4: ZAŘÍZENÍ UNIPRINT – PM – Go3 – V PRO ŠABLONOVÝ TISK.....	40
OBR. 7.5: PRACOVÍŠTĚ PÁJENÍ.	40
OBR. 7.6: DOPORUČENÝ TEPLOTNÍ PROFIL PRO PASTU SAC305 DLE VÝROBCE.	41
OBR. 7.7: NATISKNUTÁ PÁJECÍ PASTA.....	41
OBR. 7.8: ZAPÁJENÁ TESTOVACÍ DESKA.....	41
OBR. 7.9: PRINCIP MĚŘENÍ ŠÍŘKY ROZTEČENÍ.	42
OBR. 7.10: PRACOVÍŠTĚ PRO MĚŘENÍ ŠÍŘKY ROZTEČENÍ.	42
OBR. 7.11: STOJAN S ÚCHYLKOMĚREM.	42
OBR. 7.12: UKÁZKA MĚŘENÍ JEDNOTLIVÝCH VZDÁLENOSTÍ U TESTOVACÍCH BODŮ (J – ŠÍŘKA VRCHLÍKU, K – ŠÍŘKA VRCHLÍKU S PRSTENCEM, L – ŠÍŘKA TAVIDLA).	43
OBR. 7.13: PRSTENEC U KONCENTRACE 20 PPM, POVRCH AG.....	44
OBR. 7.14: PRSTENEC U KONCENTRACE 20 PPM, POVRCH AGPd.....	44
OBR. 7.15: VZDUCH, AG VODIVÝ POVRCH.	44
OBR. 7.16: 50 PPM, AG VODIVÝ POVRCH.....	44
OBR. 7.17: VZDUCH, AGPd VODIVÝ POVRCH.	45
OBR. 7.18: 50 PPM, AGPd VODIVÝ POVRCH.....	45
OBR. 7.19: GRAF ROZTEČENÍ PÁJECÍ PASTY PRO AG VODIVÝ POVRCH, MĚŘENO S PRSTENCEM.....	46
OBR. 7.20: GRAF ROZTEČENÍ PÁJECÍ PASTY PRO AGPd VODIVÝ POVRCH, MĚŘENO S PRSTENCEM.....	47
OBR. 7.21: GRAF ROZTEČENÍ PÁJECÍ PASTY PRO AG VODIVÝ POVRCH, MĚŘENO BEZ PRSTENCE.	49
OBR. 7.22: GRAF ROZTEČENÍ PÁJECÍ PASTY PRO AGPd VODIVÝ POVRCH, MĚŘENO BEZ PRSTENCE.	50
OBR. 7.23: GRAF ROZTEČENÍ TAVIDLA PRO AG VODIVÝ POVRCH.	51
OBR. 7.24: GRAF ROZTEČENÍ TAVIDLA PRO AGPd VODIVÝ POVRCH.....	52
OBR. 7.25: GRAF NAMĚŘENÝCH HODNOT VÝŠKY PŘETAVENÉHO VRCHLÍKU PRO AG VODIVÝ POVRCH.	52

Seznam tabulek

TAB. 1.1: PŘEHLED BEZOLOVNATÝCH PÁJECÍCH PAST DLE [6].	14
TAB. 1.2: ROZDĚLENÍ TAVIDEL PODLE NORMY ČSN EN ISO 9454 – 1 DLE [6].	17
TAB. 1.3: ROZDĚLENÍ TAVIDEL PODLE NORMY ČSN EN 61190 – 1 – 1:2002 DLE [1].	18
TAB. 2.1: VLASTNOSTI KERAMICKÝCH SUBSTRÁTŮ DLE [15].	20
TAB. 3.1: VYBRANÉ VLASTNOSTI POVRCHOVÝCH ÚPRAV [1].	22
TAB. 3.2: SKLADOVATELNOST VYBRANÝCH VODIVÝCH PAST [18].	22
TAB. 3.3: TEPELNÉ VLASTNOSTI VYBRANÝCH MATERIÁLŮ [1], [13].	23
TAB. 7.1: PARAMETRY TESTOVACÍCH DESEK.	39
TAB. 7.2: POUŽITÁ PÁJECÍ PASTA.	41
TAB. 7.3: STATISTICKY VYPOČTENÉ HODNOTY ROZTEČENÍ PÁJECÍ PASTY PRO AG VODIVÝ POVRCH, MĚŘENO S PRSTENCEM.	46
TAB. 7.4: STATISTICKY VYPOČTENÉ HODNOTY ROZTEČENÍ PÁJECÍ PASTY PRO AGPD VODIVÝ POVRCH, MĚŘENO S PRSTENCEM.	47
TAB. 7.5: STATISTICKY VYPOČTENÉ HODNOTY ROZTEČENÍ PÁJECÍ PASTY PRO AG VODIVÝ POVRCH, MĚŘENO BEZ PRSTENCE.	48
TAB. 7.6: STATISTICKY VYPOČTENÉ HODNOTY ROZTEČENÍ PÁJECÍ PASTY PRO AGPD VODIVÝ POVRCH, MĚŘENO BEZ PRSTENCE.	49
TAB. 7.7: STATISTICKY VYPOČTENÉ HODNOTY ROZTEČENÍ TAVIDLA PRO AG VODIVÝ POVRCH.	50
TAB. 7.8: STATISTICKY VYPOČTENÉ HODNOTY ROZTEČENÍ TAVIDLA PRO AGPD VODIVÝ POVRCH.	51

Seznam použitých zkratek

BGA	Ball Grid Array – typ pouzdra součástky
Flip-chip	Typ pouzdra součástky
FR4	Fire Resistant 4 – organický substrát
QFP	Quad Flat Package – typ pouzdra součástky
RMA	Rosin Mildly Activated – mírně aktivovaná pryskyřice
SAC	Pájecí slitina na bázi cínu, stříbra a mědi
SAC305	Pájecí slitina Sn96,5Ag3Cu0,5
SnPb	Pájecí slitina na bázi cínu a olova
SOIC	Small Outline Integrated Circuit – typ pouzdra součástky
TSOP	Thin Small Outline Package – typ pouzdra součástky
YAG	Yttrito hlinitý granát
TCE	Tepelný součinitel délkové roztažnosti
DPS	Deska plošného spoje
ENIG	Electroless Nickel Immersion Gold – typ povrchové úpravy
SMD	Surface Mount device – součástka pro povrchovou montáž
Leaching	Odsmačeni
Void	Dutina
Tombstoning	Vztyčení součástky (jev “náhrobní kámen”)
Whisker	Vláknový krystal
EDX	Energy Dispersive X-ray
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop (Scanning Electron Microscope)
AOI	Automatická optická inspekce (Automatic Optical Inspection)

Úvod

Pájení je definováno jako metalurgické spojování kovů roztavenou pájkou. Proces pájení znali již obyvatelé starověké Mezopotámie kolem roku 2000 př. n. l. U nás proces pájení rozšířili Keltové v 5. století př. n. l. Pájení patří stále k nejrozšířenější a nejspolehlivější metodě spojování součástek s vodivým motivem. Pro pájení součástek se používá tzv. měkké pájení s pracovními teplotami do 450 °C. Při procesu pájení dochází k difúzi a rozpouštění některých prvků pájky a spojovaných materiálů. Pro spojení je potřeba dobrá adheze a čistota spojovaných materiálů. Existuje dále kategorie tzv. tvrdého pájení s pracovními teplotami nad 450 °C. Při tomto typu pájení se pro spojování kovů nejčastěji používá stříbro a měď. [1], [2]

V minulosti, byly nejvíce používány eutektické a téměř eutektické pájky SnPb pro jejich výborné fyzikální a chemické vlastnosti, dobrou spolehlivost a příznivou cenu. Avšak kolem roku 2000, se začala řešit toxicita používaných materiálů pro elektroniku. Z tohoto důvodu vstoupila v platnost k 1.7.2006 směrnice EU, která omezuje používání nebezpečných látek v elektronickém průmyslu. Za nebezpečné látky byly označeny olovo (Pb), kadmium (Cd), rtuť (Hg), šestimocný chrom (Cr^{+6}), polybromované bifenyly (PBB) a polybromované difenylethery (PBDE). Směrnice byla dále aktualizována 16.2.2011. [3], [4]

Elektronický průmysl musel proto začít hledat vhodné náhrady k pájkám s obsahem olova. Základem pro bezolovnaté pájky zůstal cín a k němu se hledají vhodné příměsi k docílení stejných nebo lepších vlastností jako u pájek typu SnPb. Bezolovnaté pájky obsahují vzhledem k olovnatým vyšší množství cínu a k přetavení potřebují vyšší teplotu. Mají horší smáčivost a větší tendenci k oxidaci. Dobré smáčivosti se dosahuje použitím ochranné atmosféry, která ale zvyšuje náklady použitím inertního plynu. [3]

Pro používání olovnatých pájek jsou uděleny i výjimky a to z důvodu málo ověřených změn vlastností bezolovnatých pájek v čase. Výjimky jsou uděleny např.: v lékařském, vojenském nebo leteckém průmyslu.

S příchodem bezolovnatých pájek jsou spojeny i zvýšené nároky na pájecí zařízení. Je vyžadována mnohem vyšší přesnost nastavení pájecích vln a pecí pro pájení přetavením. Doporučuje se používání ochranné dusíkové atmosféry, která redukuje oxidaci, zlepšuje vzhled a výrazně zlepšuje smáčivost pájeného spoje. Zavádění ochranné atmosféry snižuje používání tavidel, což vede ke zvýšení spolehlivosti a životnosti pájeného spoje. Omezení používání tavidel vede dále hlavně ke snížení ekonomických nákladů na jejich použití a na čištění. [5]

Problematika pájení je stále více aktuální vzhledem ke stále se zmenšujícím pájeným spojům a součástkám. Zmenšováním pájených spojů se musí také zvýšit přesnost při výrobě desek plošných spojů, jejich osazování a pájení. Nedodržením výrobního postupu a přesnosti, může dojít ke snížení nejen životnosti pájeného spoje, ale i celého elektronického systému. [5]

Tato diplomová práce se zabývá bezolovnatým pájením v ochranné atmosféře a testováním pájených spojů se zaměřením na test roztékavosti. V praktické části byl zkoumán vliv ochranné dusíkové atmosféry na roztékavost pájených spojů. Testování probíhalo na keramických testovacích deskách s dvěma typy vodivých povrchů (Ag a AgPd). Pro pájení byla použita bezolovnatá pájecí pasta typu SAC305. Jednotlivé testovací desky byly pájeny při různých koncentracích ochranné dusíkové atmosféry. Výsledkem této práce jsou grafy závislosti roztékavosti pájecí pasty pro různé vodivé povrchy v závislosti na různé koncentraci ochranné dusíkové atmosféry. V práci je dále porovnána roztékavost tavidla na různých vodivých površích a při různé koncentraci O_2 a zkoumán vliv růstu krystalů v přetavené pájecí pastě v závislosti na koncentraci ochranné dusíkové atmosféry.

1 Bezolovnaté pájky

1.1 Úvod do bezolovnatých pájek

Hlavní problém v nahrazování olova drahými kovy v bezolovnatém pájení je nárůst ceny pájecích slitin. Další problémy souvisí se spolehlivostí, kde se výrobci snaží napodobit vlastnosti pájky SnPb. Každá z těchto slitin má své výhody a nevýhody. Jako nejvíce aplikované náhrady za olovnaté pájky jsou pro většinu aplikací používány pájky Sn95,5Ag4Cu0,5 (Sn95,5 %, Ag4 %, Cu0,5 %), Sn96,5Ag3,5, Sn99,3Cu0,7 a Sn95Sb5. [6]

Základem bezolovnatých pájek je cín. K němu se přidávají různé příměsi, jež ovlivňují teplotu tavení, smáčivost, elektrické vlastnosti, mechanické vlastnosti a řadu dalších. Cín má vynikající schopnost smáčet pájený povrch, je měkký a dobře tvárný, má dobré elektrické i tepelné vlastnosti. Nevýhodou Sn je jeho nízká mechanická pevnost v tahu a střihu. Mechanická pevnost se zvyšuje příměsemi např.: Cu, Sb, které ale mohou mít jiné negativní vlastnosti působící na výslednou slitinu.

Bezolovnaté pájky se většinou vyznačují vyšší teplotou tavení a výrazně užším teplotním pracovním oknem, než je tomu u pájek olovnatých. Jako vhodné náhrady olova v SnPb pájkách se osvědčily prvky bismut, stříbro, měď, zlato, zinek, antimon a další. [6]

Rozdíl bezolovnatých pájek oproti olovnatým je také ve zvýšené reaktivitě a s tím spojeném kratším čase pro tvorbu spoje. Kvůli zvýšené reaktivitě se musí také zvyšovat nároky na kontrolu procesu pájení a na zařízení, které musí být dostatečně přesné, aby se mohl co nejlépe nastavit teplotní profil. Vyšší chemická agresivita bezolovnatých pájek musí být brána na zřetel také při konstrukci pájecích zařízení a to z toho důvodu, aby nedocházelo k rozpouštění pájecího zařízení do pájecí lázně. K této kontaminaci dochází pouze u pájení vlnou. Orientační teploty tavení různých bezolovnatých pájecích past jsou uvedeny v tab. 1.1. [6]

Vyloučení olova z bezolovnatých pájek přináší řadu dalších problémů z důvodů nahrazení téměř celého množství olova cínem. Cín například oproti olovu snadněji oxiduje a navíc se jeho oxidy i hůře odstraňují. Dále má daleko vyšší povrchové napětí, což má nepříznivý vliv na rovnováhu sil při pájení. [7]

Vlastnosti některých prvků, které se přidávají k základnímu materiálu [6]:

- Antimon (Sb) – zlepšuje smáčivost, mechanickou pevnost a odolnost pájeného spoje. Snižuje povrchové napětí a pravděpodobnost tombstoningu. Částečně vykazuje toxické působení na lidský organismus, proto se jeho rozšíření v ekologicky nezávadných pájkách neočekává.
- Stříbro (Ag) – má dobré elektrické vlastnosti, snižuje bod tání, zlepšuje smáčivost a pevnost spoje, na povrchu se vytváří zrnitost a důlky.
- Měď (Cu) – zlepšuje smáčivost povrchu, mechanickou pevnost, dochází k rozpouštění v cínu.

- Bismut (Bi) – snižuje teplotu tavení, zlepšuje vzhled pájeného spoje, obtížné získávání.
- Indium (In) – snižuje teplotu tavení, dobrá smáčivost, vysoká cena.

Tab. 1.1: Přehled bezolovnatých pájecích past dle [6].

Teplota tavení (°C)			
< 180	180 - 200	200 - 230	> 230
Sn42Bi58	Sn89Zn8Bi3	Sn	Sn99Sb1
Sn58Bi42	Sn90Bi9,5Cu0,5	Sn97,5Ag2,5	Sn95Sb5
Sn50Bi50	Sn77,2In20Ag2,8	Sn96,5Ag3,5	Sn97Cu3
Sn48Bi52	Sn63,6In8,8Zn27,6	Sn96Ag4	Sn65Ag25Sb10
		Sn95,4Ag3,4Cu1,2	
		Sn92,1Ag3,4Cu1,2Bi3,3	
		Sn95,5Ag4Cu0,5	
		Sn93,6Ag4,7Cu1,7	
		Sn96,2Ag2,5Cu0,8Sb0,5	
		Sn99,3Cu0,7	
		Sn96Ag1,5Bi2Cu0,5	
		Sn91,8Ag3,4Bi4,8	
		Sn95Ag3Bi2	

1.2 Pájka Sn/Ag/Cu

Tato slitina se skládá z cínu, stříbra a mědi. Jednotlivé slitiny SAC se liší různým procentním zastoupením jednotlivých příměsí. Nejpoužívanější slitiny pájek jsou Sn95,5Ag4Cu0,5 (216 – 219 °C), Sn95,5Ag3,8Cu0,7 (217 – 219 °C), Sn95Ag4Cu1 (216 – 219 °C) a Sn93,6Ag4,7Cu1,7 (216 – 218 °C). Obecně se mechanická stabilita pájeného spoje zhoršuje při přibližování provozní teploty k bodu tání. Se vzrůstajícími teplotními cykly by to pro pájky SnPb s bodem tání 183 °C způsobovalo větší degradace, než u pájek s vyšším bodem tání. Teplota tání SAC pájek umožňuje, aby se mohly použít při vysokých provozních teplotách do 175 °C. Tyto pájky smáčí měď hůře, než pájky SnPb s použitím tavidel. Lepší smáčení je dosahováno tavidly navrženými pro použití při vyšších teplotách. Pro další zlepšení smáčivosti se může použít ochranná dusíková atmosféra. Měď se do této skupiny pájek přidává pro snížení rozpouštění měděného povrchu do pájky, dále pro snížení teploty tavení, zlepšení smáčivosti, snížení tepelné únavy a pro lepší charakteristiky tečení. Vysoký obsah mědi ve slitině Sn93,6Ag4,7Cu1,7 brání v rozpouštění mědi do spoje. [7], [8]

1.3 Pájka Sn/Ag

Představitelem této skupiny je Sn96,5Ag3,5 s bodem tání 221 °C. Tato slitina vykazuje dostatečnou pevnost a smáčivost pro použití v elektronice, stejně jako při pájení vodovodních trubek. Má dobrou tepelnou únavovou vlastnost ve srovnání s SnPb. Slitina SnAg má omezenou rozpustnost stříbra v cínu, čímž je odolnější vůči zhrubnutí na rozdíl od pájky SnPb, kde dochází k rozpouštění olova do cínu zejména při zvýšených teplotách. Ke zpomalení difúzního růstu se mohou použít povrchové úpravy NiAu. Povlak Au na Ni slouží jako difúzní bariéra k omezení pronikání mědi do pájky a vytváření intermetalické vrstvy Cu₆Sn₅. [8]

1.4 Pájka Sn/Cu

Nejpoužívanějším typem slitiny této skupiny je pájka Sn99,3Cu0,7 s bodem tání 227 °C. Je vhodná pro vysokoteplotní aplikace např. v automobilovém průmyslu. Vykazuje dobré únavové vlastnosti. [8]

Dalším typem Sn/Cu slitiny je eutektická slitina Sn100C s bodem tání 227 °C. Skládá se ze stejného procentuálního zastoupení mědi a cínu jako Sn99,3Cu0,7, ale navíc obsahuje nepatrné množství Ni a Ge. Výhodou této slitiny je nižší agresivita vůči nerezové oceli a jiným materiálům, ze kterých je vyrobena pájecí lázeň ve srovnání se slitinami SAC. Vytváří hladké, lesklé a dobře tvarované spoje. Intermetalická vrstva se vytváří pomalu a rovnoměrně. [9]

1.5 Pájka Sn/Sb

Představitelem této slitiny je Sn95Sb5 s bodem tání 232 – 240 °C. Tato slitina je vhodná pro vysokoteplotní aplikace pro její relativně vysoký bod tání. Antimon zvyšuje pevnost a tvrdost této slitiny. Vznikající intermetalická sloučenina má kubickou strukturu s vysokou tvrdostí. Při použití standardního RMA tavidla bez ochranné atmosféry je smáčivost u této slitiny podstatně lepší než u Sn63Pb37 a Sn96,5Ag3,5. Nevýhodou Sb je, že vykazuje částečnou toxicitu a při obsahu většího množství (4 %) zhoršuje pevnost v tahu. Antimon stejně jako Bismut jsou vedlejší produkty při výrobě olova. [8]

1.6 Čistota pájecí slitiny

Čistota bezolovnatých pájecích slitin je ovlivněna kontaminací z různých zdrojů. Mezi nejvíce problémové kontaminace patří znečištění mědí. Měď kontaminuje pájecí slitinu z měděné fólie na deskách plošných spojů. V dnešní době díky různým povrchovým úpravám a nepájivým maskám se pájecí slitina dostává do kontaktu pouze s pájenými body upravenými povrchovou úpravou pro zlepšení pájitelnosti a ne s čistou mědí jak tomu bývalo v minulosti. Při pájení vlnou, může také docházet ke kontaminaci pájecí slitiny železem. Železo se do pájecí slitiny dostává prostřednictvím pájecích van. V pájecí slitině

vytváří intermetalickou sloučeninu FeSn_2 , která je tvořena jehličkami. Tato sloučenina výrazně ovlivňuje kvalitu pájeného spoje. Při návrhu pájecích van je proto nutné se vyhnout materiálům na bázi železa a nahradit je například titanovými slitinami, nebo použít vhodnou povrchovou úpravu jako jsou smalt a kompozity pro zabránění kontaminace pájecí slitiny.

Ke kritické kontaminaci mědi dochází například při použití pájecí slitiny Sn/Cu, kde zvýšení koncentrace mědi prudce zvyšuje teplotu liquidu pájecí slitiny. Při zvýšení koncentrace mědi na 2 % dochází k vzrůstu teploty liquidu přibližně na 300 °C. U pájecích slitin Sn/Ag dochází vlivem kontaminace mědi k neřízeným změnám vlastností. Méně výrazně působí kontaminace mědi na SAC pájky, protože již určité malé množství mědi obsahují a to zabraňuje dalšímu pronikání mědi do pájecí slitiny. [7]

1.7 Tavidla

Důležitou složkou při vytváření pájeného spoje jsou tavidla. Tavidla se skládají z tavidlového nosiče, aktivátoru, aditiva a rozpouštědla. Při zahřátí urychlují a podporují smáčení pájených materiálů pájkou. Dále také pomáhají za působení tepla odstraňovat oxidy a nečistoty z povrchu pájeného materiálu a chrání je i proti oxidaci při pájení. Nanášejí se buď v tekutém stavu při pájení vlnou, nebo jsou přímo obsažena v pájecí pastě při pájení přetavením.

Tavidlo má celou řadu dalších funkcí [1], [6]:

- odstraňuje povrchové oxidy a další nečistoty z pájeného povrchu a případně i ze samostatné pájky,
- odstraňuje reakční produkty z pájeného spoje a umožňuje pájce dostat se na kovové plochy,
- snižuje povrchové napětí pájecí slitiny a umožňuje tak pájce aby se dobře roztekla,
- chrání očištěné kovové plochy před vznikem oxidů až do okamžiku vytvoření pájeného spoje,
- zlepšuje přenos tepla na celé ploše pájeného spoje,
- řídí tixotropní a reologické vlastnosti.

S použitím tavidla nastává problém čištění. Zbytky tavidla mohou nepříznivě působit z několika důvodů [6]:

- mohou snížit životnost a spolehlivost pájeného spoje,
- mohou zhoršit elektrické vlastnosti,
- mohou způsobit korozi,
- mohou omezovat elektrické testování.

Z tohoto výčtu vyplývá, že snižování tavidla v pájce je jedním ze základních požadavků v technologii pájení. Nesmí obsahovat zdraví a životnímu prostředí škodlivé látky, což je pochopitelné už z důvodu přechodu na bezolovnaté pájky. Musí být chemicky

stále, mít inertní charakter, nebo musí být snadno odstranitelné. Tavidla používaná v bezolovnatých pájkách musí být navíc oproti tavidlům používaných v olovnatých pájkách aktivnější, musí být aktivní po delší dobu i při vyšší teplotě. Obecně se ale také hůře odstraňují, proto je nutné použít chemicky aktivnější proces čištění. [1], [6], [10]

V bezolovnatém pájení převažují dva druhy používaných tavidel. Mezi první patří tavidla kategorie no – clean. Tyto tavidla neobsahují korozivní zbytky a z toho důvodu není ve většině případů nutné jejich čištění. Pokud je například výrobcem nebo zákazníkem požadováno čištění, lze tyto tavidla standardně odstranit rozpouštědly, nebo vodním roztokem se saponifikátory. Druhým typem jsou tavidla na vodní bázi bez organických rozpouštědel a s různou mírou aktivace. Pro čištění těchto tavidel se používají vodné roztoky. Mezi hlavní výhodu těchto tavidel patří požární bezpečnost. Nevýhodou těchto tavidel je potřeba vyšší teploty přehřevu z důvodu odpaření vody ještě před vstupem do vlny nebo pájecí zóny. Tyto tavidla vyžadují k odpaření vody přibližně o 40 % více energie. [7]

Tab. 1.2: Rozdělení tavidel podle normy ČSN EN ISO 9454 – 1 dle [6].

Typ tavidla	Základní složka	Aktivátor	Forma tavidla
pryskyřicové	kalafuna (přírodní) syntetická pryskyřice	bez aktivátoru	tekuté
organické	vodou rozpustné vodou nerozpustné	halogenové bezhalogenové	
anorganické	solí	chlorid amonný bez chloridu amonného	tuhé
	kyseliny	fosforečná jiné kyseliny	pasta
	zásady	aminy nebo amoniaky	

V tabulce 1.3 je rozdělení tavidel podle normy ČSN EN 61190 – 1 – 1:2002. Tato norma rozděluje tavidla na přírodní, syntetická, organická a anorganická. Jednotlivá tavidla jsou dále dělena podle úrovně aktivace tavidla. Tato tabulka dále zahrnuje i rozdělení podle působení zbytků tavidla na L (nízká aktivita), M (mírná aktivita) a H (vysoká aktivita). Pro přiblížení například symbol A označuje přírodní bezhalogenovou pryskyřici s nízkou aktivitou zbytků tavidla. [6]

Tab. 1.3: Rozdělení tavidel podle normy ČSN EN 61190 – 1 – 1:2002 dle [1].

Základ tavidla	Zkratka	Úroveň aktivace [% halidů]					
		L0	L1	M0	M1	H0	H1
		0	< 0,5	0	0,5 - 2	0	> 2
přírodní pryskyřice	Rosin RO	A	B	C	D	E	F
syntetické pryskyřice	Resin RE	G	H	I	J	K	L
organické kyseliny	Organic OR	M	N	P	Q	R	S
anorganické kyseliny	Inorganic IN	T	U	V	W	X	Y

Smáčivost je důležitou vlastností při hodnocení pájených povrchů. Je to schopnost tekuté pájecí slitiny přilnout k povrchu spojovaného materiálu za určité teploty. Během smáčení začínají působit meziatomové síly, které vytvářejí vazby mezi pájkou a spojovaným povrchem. Tyto vazby se rychle šíří po celé ploše styku. Dalším předpokladem pro dobré smáčení a vznik kvalitního pájeného spoje je vytvoření intermetalické sloučeniny na rozhraní mezi pájkou a spojovaným povrchem. Se smáčivostí je úzce spojeno i povrchové napětí působící mezi pájkou a povrchem spojovaného materiálu. Při smáčení se pájecí slitina ustálí v takovém tvaru, při kterém zaujímá minimální povrchovou energii. Pro zjištění stupně smáčivosti se využívá metoda smáčecích vah. [10]

Hlavními faktory při posuzování kvality jsou [11]:

- stupeň smáčivosti (je udáván úhlem smáčení),
- rychlost smáčení (je to doba, za kterou se pájka rozprostře po pájeném povrchu).

Na smáčivost má vliv celá řada faktorů jako jsou například složení pájecí pasty a obsah nečistot, znečištění nebo nadměrná oxidace kontaktů součástek, drsnost pájených povrchů, nevhodná atmosféra (složení, vlhkost) nebo míra oxidace a znečištění pájených ploch. Za zhoršenou pájitelnost může v mnoha případech vlivem špatného skladování právě výše uvedená oxidace pájených povrchů, proto je nutné pečlivě dodržovat předepsané skladovací podmínky. Smáčivost dále ovlivňuje špatně zvolené parametry procesu, jako jsou teplota nebo doba pájení. Horší smáčecí vlastnosti bezolovnatých pájek lze vylepšit použitím ochranné atmosféry. [6]

2 Anorganické základní materiály

Tyto základní materiály se používají především jako elektroizolační nosné podložky, na kterých se vytvářejí různé typy vrstev, jako jsou například vodivé, odporové nebo dielektrické. Nejčastěji se na nich vytvářejí hybridní integrované obvody (HIO). Tyto obvody se nejčastěji vytvářejí tlustovrstvou nebo tenkovrstvou technologií. U tlustovrstvé technologie se nejčastěji využívá síťotisku nebo šablonového tisku. U tenkovrstvé technologie se využívá napařování nebo katodového naprašování.

Anorganické substráty musí také splňovat dobré mechanické vlastnosti, aby byla zaručena dobrá mechanická odolnost součástek a celého realizovaného obvodu. Dále dobré tepelné vlastnosti k odvedení přebytečného tepla vytvořeného součástkami a v neposlední řadě také dobré elektroizolační vlastnosti k odizolování natisknutých vrstev.

Důvodem použití keramických substrátů jsou vyšší kladené nároky na spolehlivost realizovaného obvodu. Tyto zvýšené nároky souvisí například s použitím v lékařství, leteckém, kosmickém nebo automobilovém průmyslu. Dalším důvodem použití je splnění určitých vlastností obvodu (výkonové zatížení, mikrovlnné aplikace nebo dodatečné trimování rezistorů). Keramické substráty se dodávají v různých velikostech. Za standardní rozměr je považována velikost 50 x 50 mm a 100 x 100 mm. [12]

2.1 Typy anorganických materiálů

Korundový substrát je tvořen polykrystalickým oxidem hlinitým s malým množstvím kovových oxidů. V široké míře se používá pro vysokofrekvenční, mikrovlnou techniku a v multičipových modulech. Se změnou obsahu oxidu hlinitého dochází ke změnám vlastností korundového substrátu. S rostoucím obsahem vrůstá tepelná vodivost, mechanická pevnost, koeficient teplotní délkové roztažnosti a klesá ztrátový činitel. Pro tlustovrstvou technologii se nejčastěji používá 96 % Al_2O_3 . Pro tenkovrstvou technologii se musí použít substrát s dostatečně kvalitním leštěným povrchem. Může se použít například jemnozrnná korundová keramika s nejméně 98 % Al_2O_3 . Mezi jeho nevýhody patří křehkost a rozměrová limitace. [13], [14]

Beryliový substrát je tvořen polykrystalickým oxidem berylnatým s malým množstvím kovových oxidů. Oproti korundové keramice má tepelnou vodivost až desetinásobně vyšší. Nevýhodou je jeho vyšší cena a to nejen z důvodu dražší suroviny, ale také nutností zpracování ve speciálních podmínkách z důvodu jeho toxicity. Jeho toxicita je prakticky potlačena u slinuté keramiky. [13], [14]

Ovrstvené kovové jádro se používá v aplikacích, kde je potřeba zabezpečit co nejmenší rozdíl TCE mezi součástkami a substrátem. Jádrem může být slitina invar (36 % Ni) plátovaná mědí, na kterou se nanese například laminát na bázi epoxidu s vodivým měděným motivem. Vnitřní vodivé vrstvy se používají k zemnicím účelům i k ochraně

proti vysokofrekvenčnímu a elektromagnetickému rušení. Jeho výhodou jsou výborné mechanické vlastnosti a dobrý odvod tepla. [13]

LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic) je to keramický materiál s nízkou teplotou zpracování. Uplatnění nachází zejména v mikrovlnných aplikacích realizované 3D strukturou. Tato technologie umožňuje výrobu robustních, hermeticky uzavřených pouzder a díky zaintegrování pasivních prvků do substrátu i značnou miniaturizaci. LTCC lze charakterizovat jako vícevrstvý keramický substrát, kde na každou vrstvu lze vytvořit různé vodivé propojení a pasivní prvky. Z důvodu možnosti použití jednotlivých vrstev s různou relativní permitivitou lze vytvářet integrované kapacitory s různým rozsahem jmenovitých hodnot při zachování stejných rozměrů. Pro natisknutí vodivých propojení a pasivních prvků se používá klasické tlustovrstvé technologie.

Výhody této technologie jsou [6]:

- rovnováha mezi jednotlivými parametry,
- výborná tepelná vodivost,
- nízké dielektrické ztráty,
- přesně definovaná relativní permitivita, neměnná s frekvencí,
- stabilní rozměry,
- integrace pasivních prvků,
- nízká cena.

Tab. 2.1: Vlastnosti keramických substrátů dle [15].

	91 % Al ₂ O ₃	96 % Al ₂ O ₃	99,5 % Al ₂ O ₃	99,6 % Al ₂ O ₃	99,5 % BeO
hustota [g/cm ³]	3,72	3,75	3,86	3,85	2,88
modul pružnosti [kg/cm ² x 10 ⁶]	3,16	3,09	3,80	3,80	3,16
rezistivita [Ωcm] (25 °C)	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	10 ¹⁵
relativní permitivita 1 MHz 1 GHz	10,3 9,3	9,5 9,3	9,9 9,8	9,9 9,8	6,6
ztrátový činitel 1 MHz 1 GHz	0,005 0,0003	0,0004 0,0003	0,0001 0,0001	0,0001 0,00004	0,0004
součinitel teplotní délkové roztlačnosti (25 - 500 °C) [1/°C x 10 ⁻⁶]	7,3	7,1	7,5	7,5	7,8
tepelná vodivost [W/m°C] 20 °C 100 °C 400 °C	13,0 12,0 8,0	26,0 20,0 12,0	33,5 25,5 12,0	35,0 27,0	259,0 191,0 80,0

3 Vliv základního materiálu na roztékavost

Hlavní rozdíl mezi keramickým substrátem a organický substrátem typu FR4 je v jejich složení. Keramické substráty, jako například korundová keramika, se řadí do skupiny anorganických základních materiálů. Substrát pro výrobu plošných spojů typu FR4 spadá do skupiny organických základních materiálů, který se skládá z organické pryskyřice a výztuže.

Mezi hlavní výhody anorganických substrátů oproti organickým patří podle [13]:

- velmi dobrá tepelná vodivost,
- malá hodnota TCE,
- mechanická integrita,
- dobrá chemická odolnost.

Nevýhody:

- vyšší cena,
- vyšší hmotnost,
- křehkost materiálu,
- rozměrová limitace,
- toxicita některých typů.

Na výslednou roztékavost pájecí pasty z hlediska volby základního materiálu má vliv řada faktorů. Jedním z hlavních faktorů, který ovlivňuje roztékavost na jednotlivých základních materiálech, je použitá povrchová úprava na základním materiálu typu FR4 a použitá vodivá pasta na keramickém substrátu. Dalšími faktory jsou drsnost povrchu, leaching (odsmáčení) nebo základní tepelné, mechanické a chemické vlastnosti daných materiálů.

3.1 Porovnání základních materiálů

Základní vlastnosti organického substrátu typu FR4 jsou dány především jeho složením. Základem je výztuž, která je tvořena skelnou tkaninou a dále pojivem u tohoto typu realizovaným epoxidovou pryskyřicí. Výroba měděné fólie pro organický základní materiál probíhá elektrolyticky na nerezový pomalu rotující válec. Standardní tloušťky měděné fólie jsou 18 a 35 μm s čistotou minimálně 99,85 %. Roztékavost je na tomto typu substrátu ovlivněna především vlastnostmi plátované měděné fólie a jejími povrchovými úpravami. U povrchové úpravy ENIG ovlivňuje roztékavost především tloušťka vrstvy zlata. Důvodem je její velmi malá tloušťka a rozlišná hodnota v závislosti na výrobci. Vybrané vlastnosti povrchových úprav jsou v tab. 3.1. [1]

Korundová keramika se skládá z různého procentuálního množství polykrystalického oxidu hlinitého a malého množství kovových oxidů, které slouží k upravení fyzikálních vlastností. Vlastnosti keramických substrátů jsou uvedeny v tab. 2.1. Výsledná roztékavost je stejně jako u organického substrátu ovlivněna vodivou vrstvou. Na keramický substrát se nanáší různé vodivé vrstvy odlišující se podle složení. Vodivá vrstva může být například složena ze stříbra nebo ze stříbra a paládia. Doby skladovatelnosti dvou typů past použitých v praktické části jsou uvedeny v tab. 3.2. [13]

Skladovatelnost povrchových úprav a vodivých past může dále ovlivnit roztékavost vlivem oxidace. Rozdílné doby skladovatelnosti při porovnání povrchových úprav na organickém substrátu typu FR4 a vodivých past na keramickém substrátu, ovlivňují dobu, při které dochází k oxidaci povrchů. Jak už bylo zmíněno, roztékavost pájecí pasty ovlivňuje samotná pájecí pasta. Pro zaručení dobrých tiskových vlastností je potřeba pájecí pasty skladovat v definovaných podmínkách a spotřebovat do určité doby definované výrobcem. Například pro pájecí pastu SAC305 (LFM – 48W TM – HP(L)) [16] je výrobcem udávána použitelnost 6 měsíců od data výroby za současného skladování v chladničce při teplotě 0 – 10 °C. Odlišné skladování má například pájecí pasta SN100C (Cobar – OT2 – SN100C) [17]. U této pasty výrobce udává použitelnost minimálně 2 roky za současného skladování při pokojové teplotě. Na roztékavost pájecí pasty má vliv i její vysychání, ke kterému dochází po natisknutí až do doby, kdy je pasta přetavena. Výrobce u pasty Sn100C doporučuje přetavit pájecí pastu nejpozději do 24 hodin po natisknutí. U pasty SAC305 výrobce doporučuje pájecí pastu ihned po natisknutí a osazení přetavit.

Roztékavost pájecí pasty můžou ovlivnit i tepelné vlastnosti základních materiálů a vodivých povrchů. Vybrané tepelné vlastnosti těchto materiálů jsou uvedeny v tab. 3.3.

Dalšími parametry, které můžou ovlivnit roztékavost jsou materiálová kompatibilita povrchů s pájecí pastou. U nekompatibilních materiálů může docházet k výraznému rozpouštění vodivé vrstvy do pájky a tím k ovlivnění roztečení pájecí pasty po povrchu.

Tab. 3.1: Vybrané vlastnosti povrchových úprav [1].

	HAL	NiAu	OSP	chem. Ag	chem. Sn
Rovinnost povrchu	ne	ano	ano	ano	ano
Tloušťka vrstvy (μm)	1 - 20	5	0,5	0,16	0,1
Kompatibilita s SnAgCu	ano	ano	ano	ano	ano
Skladovatelnost	min. 12 měs.	min. 12 měs.	min. 3 měs.	-	min. 1 měs.

Tab. 3.2: Skladovatelnost vybraných vodivých past [18].

	AgPd (ESL (9695 - G))	Ag (ESL (9912 - K FL))
Skladovatelnost	6 měs.	6 měs.

Tab. 3.3: Tepelné vlastnosti vybraných materiálů [1], [13].

	FR4	Cu	Korundová keramika
TCE xy/z (pro T menší Tg) (ppmK⁻¹)	13/60	18	7,5 - 8
Tepelná vodivost λ (Wm⁻¹K⁻¹)	0,23	400	35

3.1.1 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu patří mezi jeden z hlavních faktorů, který ovlivňuje výslednou roztékavost pájecí pasty. Při porovnání vodivých past na keramickém substrátu (obr. 3.1, 3.2) a povrchových úprav na substrátu typu FR4 (obr. 3.3, 3.4) lze pozorovat rozdíl ve výsledné drsnosti vodivých povrchů na jednotlivých základních materiálech. Povrchy byly foceny na mikroskopu se 40 násobným zvětšením. Drsnost testovacích desek byla změřena na profiloměru. Pro vodivý povrch složený ze stříbra byla naměřena drsnost 0,57 μm a pro povrch složený ze stříbra a platiny 0,75 μm. Drsnost změřená na plátované měděné fólii byla 0,43 μm. Pro tloušťku měděné fólie 5 μm je požadována drsnost přibližně 0,1 μm. [1]



Obr. 3.1: Povrch vodivé vrstvy Ag.



Obr. 3.2: Povrch vodivé vrstvy AgPd.



Obr. 3.3: Cu + povrchová úprava ENIG.



Obr. 3.4: Cu + povrchová úprava imerzní Sn.

4 Metody nanášení pájecích past

Pro nanesení pájecí pasty na požadované pájecí plošky se používají tři různé způsoby. Nanesení pájecí pasty pomocí disperzeru, sítotisku nebo pomocí šablonového tisku.

4.1 Disperzer

Nanášení pájecí pasty pomocí ručního dávkování se používá především pro malé série nebo při opravách. Pomocí dávkování lze nanášet i lepidlo pro přilepení součástek. Dávkovací jsou různého typu od nejjednoduššího hrotového až po přesnější založené na rozdílném způsobu nanášení. Mezi přesnější dávkovače patří například tlakový s časovým omezením, dávkovač s rotační pumpou, s pístovou pumpou, dávkovač pracující na principu nástřiku kapek nebo odtržení sloupce média.

Mezi výhody ručního dávkování patří: pájecí pasta se nanáší v definovaném poměru na požadovaná místa, levné, rychlé (pro malé množství pájecích bodů).

Alternativou pro ruční dávkování je strojní, které lze využít i při vyšších sériích, při kterých by nebylo ekonomické vyrobit šablony. [6], [7]

4.2 Sítotisk

Je to tisk viskózní pasty přes kovové nebo polyesterové síto upnuté v kovovém rámu. Pro zvýšení životnosti síta a přesnosti natisknuté pasty se volí orientace upnutí síťoviny ke směru pohybu těrky pod úhlem 45° . Při sítotisku se dále musí nastavit nenulová velikost odtrhu síta od substrátu. Obvykle se volí kolem 0,8 mm. Jakost natisknuté pasty je dále ovlivňována zvolenými parametry síta. Mezi základní parametry patří hustota tkaniny, která ovlivňuje přesnost a tloušťku natisknuté pasty. S rostoucím počtem ok na jednotku délky klesá průměr vlákna a tím i tloušťka natisknuté pasty. Dalším parametrem je světlost síta, která udává, jak velké je procentuální zastoupení otevřené plochy ku ploše celkové. S tímto parametrem souvisí také teoretický objem protlačené pasty a velikost ok. [6]

Výhody této technologie tisku oproti šablonovému tisku jsou [1]:

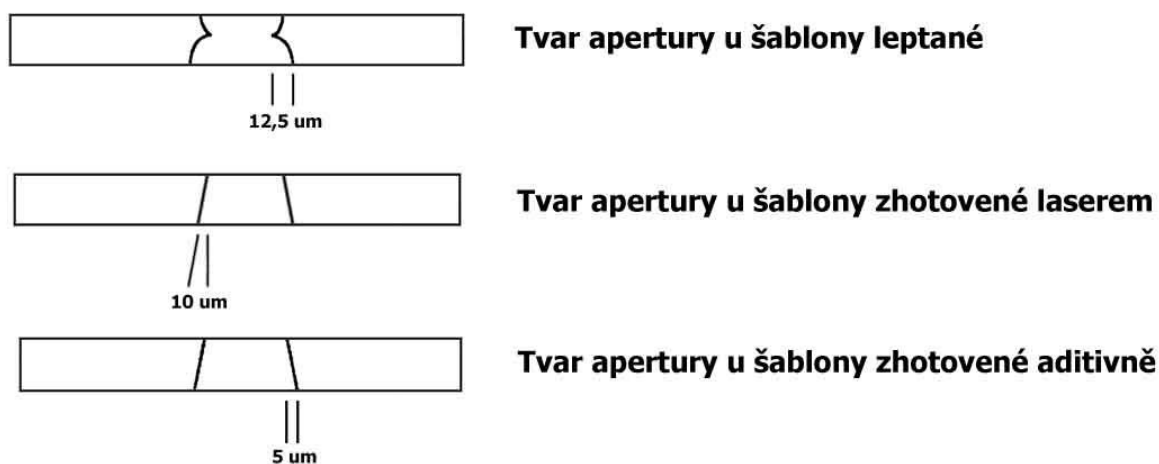
- menší náklady na výrobu síta a motivu,
- větší rychlost tisku,
- síto lépe kompenzuje nerovnosti povrchu,
- levné odstranění motivu

Mezi nevýhody patří:

- horší ostrost natisknuté vrstvy,
- horší soutisk,
- menší životnost síta.

4.3 Šablonový tisk

Je to obdoba sítotisku v těch rozdílech, že místo síta je použita pevná ocelová nebo bronzová planžeta a odtrh šablony od substrátu je při tisku pasty nulový. Vlastní odtrh je proveden až po ukončení tisku. Tato technologie tisku je vhodná pro nanášení souvislých ploch, například pájecích past a lepidel, z důvodu zachování tuhosti použité šablony. Pro šablonový tisk můžeme použít šablony z různých materiálů podle způsobu jejich výroby. Šablony z bronzu, nerez oceli nebo niklové mosazi se zhotovují převážně laserem nebo leptáním. Šablony z galvanického niklu se vyrábějí galvanicky a šablony z plastu vrtáním. [1], [6]



Obr. 4.1: Tvar apertury u různě zhotovených šablon dle [1].

Při návrhu šablony je nutné dodržet některá pravidla, pro zaručení dobrého přenosu pasty na substrát. Prvním parametrem, který se musí dodržet, je že nejmenší rozměr (šířka volné plochy) v motivu musí být o 0,66 krát větší než tloušťka šablony. Dalším parametrem, který ovlivňuje množství nanesené pasty, je orientace obdélníkových motivů ke směru pohybu těrky. Při podélné orientaci je pasta se substrátem ve styku delší dobu a s tím je obvykle spojeno i větší množství nanesené pasty.

Pro zaručení dobrého přenosu pasty je dále nutné zvolit vhodný typ pájecí pasty. U pasty se sleduje především viskozita a velikost zrn. Velikost zrn se volí podle nejmenší šířky volné plochy v šabloně. Minimálně je definováno 5 částic na daný rozměr motivu. Při nedodržení minimálního počtu by docházelo k ucpávání šablony. [6]

5 Testování pájených spojů

5.1 Úvod do testování pájených spojů

Pájené spoje lze testovat pomocí různých druhů zkoušek a testů, jako jsou například zkoušky mechanické, tepelné, optické nebo elektrické. Tepelné změny a mechanické vibrace mají vliv na selhání pájeného spoje (kritické např. u flip-chip, které mají malé vývody a tím i pájené spoje). Tyto změny jsou většinou cyklické, což vede k únavě materiálu v provozu. [19]

Rozdělení testů:

A) Zkoušky mechanické: Mechanické zkoušky se používají pro znázornění deformace pájky v závislosti na čase při působení vnějších zatěžovacích sil. Testování se provádí vibracemi, stříhem, tahem, krutem, ohybem atd. Pájené spoje jsou mechanicky omezené na rozhraní mezi substrátem a pájkou, protože substrát se deformuje pružně na rozdíl od pájky, která se deformuje nepružně. [20]

- Zkouška stříhem – je osvědčená destruktivní metoda pro hodnocení nejen stupně trhlin a poškození pájeného spoje, ale i pevnosti spoje, [20]
- Zkouška odolnosti proti odtržení – používá se pro součástky pro povrchovou montáž s vývody typu gull wing (racčího křídla), [21]
- Zkouška cyklickým padáním – používá se pro povrchově montované součástky a je určena především pro větší součástky s více vývody. Používá se například u mobilních zařízení, [22]
- Zkouška cyklickým ohybem – používá se pro povrchově montované součástky typu QFP a BGA. Dále se může použít například pro sledování mechanického namáhání tlačítek mobilních telefonů, [23]
- Mechanická únavová zkouška smykem – používá se pro povrchově montované součástky typu BGA. Provádí se mechanickým nebo teplotním cyklováním, [24]
- Vibrační zkoušky – testování pájeného spoje pomocí vibrací patří mezi nejrozšířenější mechanické zkoušky. Používá se především v automobilovém a leteckém průmyslu. [20]

B) Zkoušky tepelné:

- Zkouška teplotním cyklováním – hodnotí schopnost testovaného objektu odolat teplotnímu namáhání, únavě materiálu a dalším stresům, které jsou vyvolány opakující se teplotou,
- Zkouška tepelným stárnutím – stárnutí je urychleno zvýšenou nebo sníženou teplotou. Například zrychlený růst intermetalické vrstvy v pájeném spoji.

C) Zkoušky elektrické:

- Vnitroobvodový (In Circuit Test) – ICT testování se provádí pro každou součástku samostatně pomocí testovacích hrotů,
- Funkční – připojení testované DPS k testeru pomocí konektoru, ověření funkčnosti celé DPS. [1]

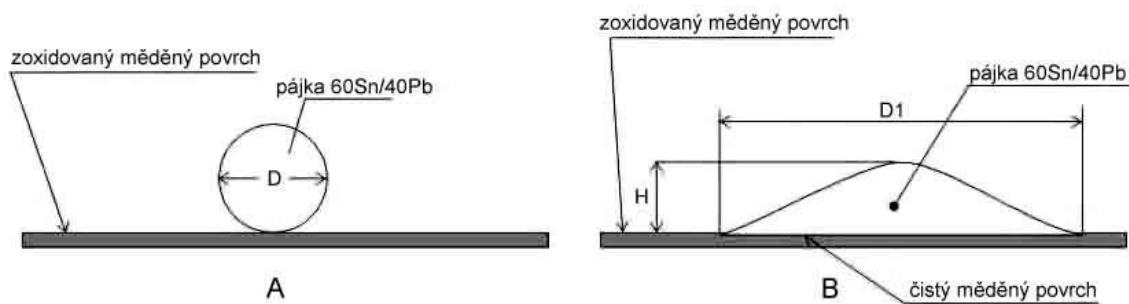
D) Zkoušky optické: Požadavky na kvalitu pájených spojů se určují pomocí norem. Nejčastěji podle mezinárodní normy IPC – A – 610. Pro strojní hodnocení pájených spojů se používá AOI (automatická optická inspekce). Pomocí tohoto kontrolního zařízení lze hodnotit přesnost osazení součástek, kvalitu zapájených součástek, kvalitu nanesení pájecí pasty nebo lepidla. Do kategorie optických zkoušek je možné zařadit zkoušky smáčivosti, které jsou detailněji popsány níže. [1]

5.2 Zkoušky smáčivosti

Tyto metody slouží k definování míry smáčení, roztečení pájky a k posouzení s definovanými kritérii. Vlastní měření může probíhat kvalitativně, kde je výsledná smáčivost sledována pouze vizuálně, nebo kvantitativně, kdy se měří charakteristiky působící síly na povrchové napětí v závislosti na čase. Pro zjištění míry smáčení a roztečení vlastní pájky existuje řada různých zkoušek. Například test roztékavosti, zkouška metodou smáčecích vah nebo zkouška pájecí lázni (ponořovací test). [25]

5.2.1 Test roztékavosti

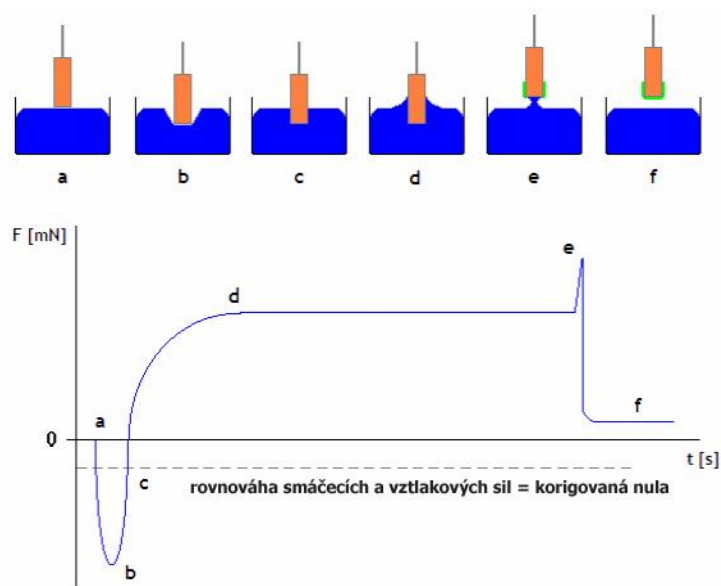
Test roztékavosti se používá při potřebě zhodnotit aktivitu tavidla, nebo roztékavost pájecí pasty. Při testu se na měděný povrch s definovanou tloušťkou oxidu nanese definované množství pájecí pasty. Po nanesení se pájecí pasta přetaví. Pro zjištění míry aktivity tavidla nebo roztékavosti pájecí pasty se sleduje buď plocha do které se pájecí pasta rozteče, nebo její výška. Princip vyhodnocování závisí na druhu použité normy. Výsledný faktor roztékavosti (pro normu MIL) je dán podílem výšky po roztečení a výšky při ideálním nesmáčení, kdy se neodstraní žádný oxid z měděného povrchu a vytvoří se ideální kulička pájky. [7]



Obr. 5.1: Test roztékavosti, a) ideální nesmáčení – vytvoří se kulička pájky, b) roztečená pájecí pasta dle [7].

5.2.2 Metoda smáčecích vah

Metoda smáčecích vah slouží k určení smáčivosti vývodů libovolného tvaru. Tato metoda spočívá v ponoření a následném vytažení vzorku z roztavené pájky. V průběhu testu se měří vertikální síly působící na vzorek. Výsledkem testu je časová závislost působící vertikální síly na vzorek. Princip této metody je znázorněn na obr. 5.2.



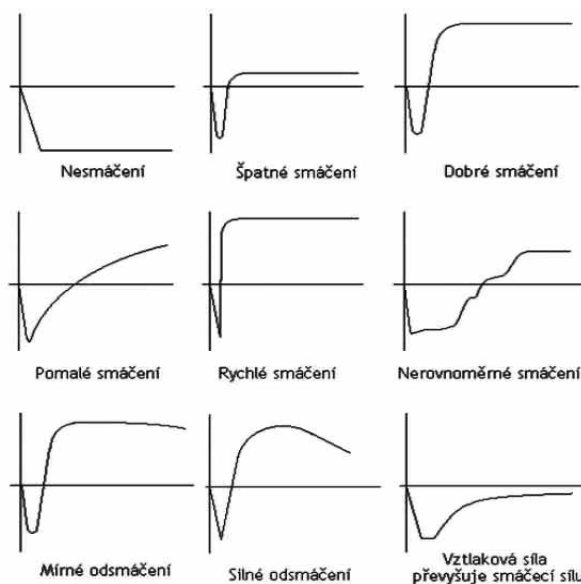
Obr. 5.2: Metoda měření smáčecí síly dle [25].

Před vlastním testem se musí nejprve upevnit vzorek do měřícího zařízení. Po ustálení teploty roztavené pájky na definované teplotě dochází k pomalému ponořování vzorku svisle do roztavené pájky. V bodě *a* dochází ke kontaktu vzorku s roztavenou pájkou. Po překonání síly vlivem rozdílných teplot se začíná v bodě *b* vzorek smáčet a tím se i postupně měnit působící síla. V bodě *c* je povrch pájky kolmý k povrchu vzorku. Vlastní kvalita smáčení se určuje mezi body *b* a *d*, kde tvar křivky udává rychlost smáčení. V bodě *e* je vzorek zcela vytažen z roztavené pájky. Bod *f* je konečný stav. Smáčecí sílu lze

vypočítat podle rovnice (1). Výsledná síla se skládá ze dvou sil. Ze vztahové síly, která je dána vztahem $g\rho V$ a smáčecí síly, která je dána vztahem $\gamma p \cos \Theta$. Na obr. 5.3 je ukázka různých smáčecích charakteristik.

$$F = \gamma \cdot p \cdot \cos \Theta - g \cdot \rho \cdot V \quad (1)$$

Kde F je rovnovážná smáčecí síla, γ je povrchové napětí, p je obvod vzorku, Θ je smáčecí úhel, g je gravitační zrychlení, ρ je hustota pájky, V je objem ponořené části vzorku. [25]



Obr. 5.3: Průběhy smáčecích sil dle [25].

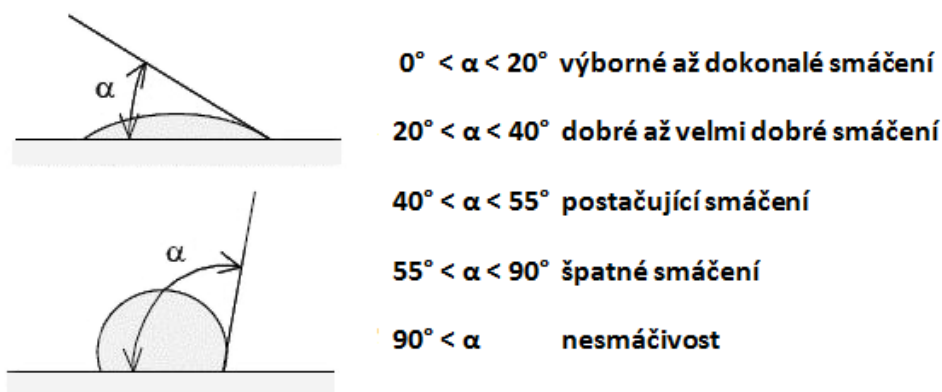
5.2.3 Zkouška pájecí lázní

Zkouška pájecí lázní, též ponořovací test, patří mezi rychlé a levné metody pro hodnocení pájitelnosti kontaktů součástek. Metoda spočívá v ponoření testovaného vzorku do nádoby s roztavenou pájkou a následného určení plochy smáčení, stupně odsmáčení nebo rozpouštění a rozsah znečištění vývodů. Tuto metodu lze použít i pro hodnocení smáčení u desek plošných spojů. Mezi hlavní nevýhodu této metody patří nereprodukovatelná interpretace výsledků, která je závislá na vizuálně subjektivní interpretaci výsledků pověřeného pracovníka. [7]

5.2.4 Metoda SSBA a SBSA

Metoda SSBA (Sessile Solder Ball Alignment) slouží k jednoduchému určení smáčivosti pájeného povrchu. Smáčivost pájeného povrchu se určuje pomocí pájecí kuličky, která se umístí na pájenou plochu. Pájecí plocha musí být dostatečných rozměrů, aby se pájka nebo tavidlo po přetavení nedostalo až k okraji pájeného povrchu. Výsledná smáčivost je dána velikostí statického smáčecího úhlu a jakostí přetavené pájky. Jakost

přetavené pájky se sleduje pomocí průměru přetavené pájky, čistoty spoje a zbytků tavidla. Naměřené hodnoty smáčecích úhlů se poté porovnají a vyhodnotí. [26] Na obr. 5.4 podle [11] je ukázka hodnocení smáčení podle statického smáčecího úhlu.



Obr. 5.4: Hodnocení smáčivosti pájeného spoje podle smáčecího úhlu dle [11].

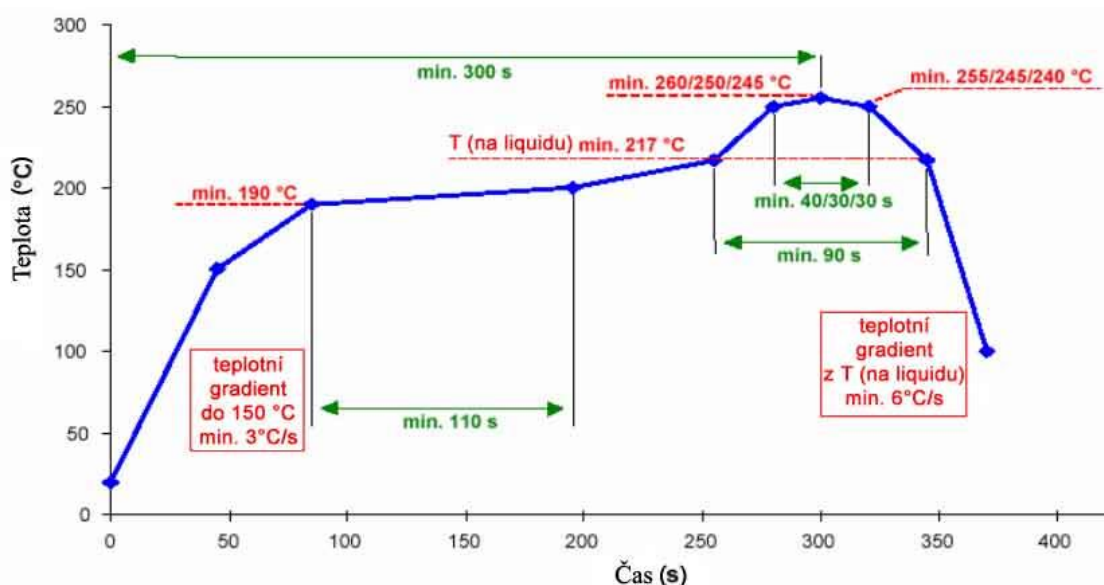
Další metodou je metoda SBSA (Sessile Ball Shape Analyzing). U této metody se kromě statického smáčecího úhlu sleduje především dynamika smáčení a jevy související. Hodnoticími parametry je především změna velikosti smáčecího úhlu v závislosti na čase, teplotě a rychlosti smáčení, která je dána gradientem smáčecího úhlu. Tyto tvarové změny jsou horizontálně zaznamenávány a následně vyhodnoceny. [26]

6 Pájení přetavením

Pájení přetavením je způsob pájení, při němž dochází k přetavení pájecí pasty nanesené na kontaktních ploškách. Nanášení pájecí pasty se provádí šablonovým tiskem, sítotiskem nebo dispenzerem, při kterém je pájecí pasta nanesena na příslušné kontaktní plošky. Pro osazení součástek se používají různé osazovací automaty, které musí součástku uchopit, vystředit a umístit na požadované místo. Osazovací automat odebírá součástky z různých druhů zásobníků. Zásobníky mohou být páskové (kotoučové), vibrační, tyčové, ploché atd. Pájecí pasta má navíc funkci lepidla, jež slouží k přidržení součástek do okamžiku, než dojde k přetavení pájecí pasty. Přetavení pájecí pasty se provádí různými metodami popsanými níže. Pájecí pasta se přetavuje teplotou o několik desítek stupňů vyšší, než je bod tání pájky, z důvodu rozšíření procesního okna. Při pájení přetavením se musí dodržovat optimální podélný teplotní profil, protože ovlivňuje spolehlivost a životnost pájeného spoje. [6], [11]

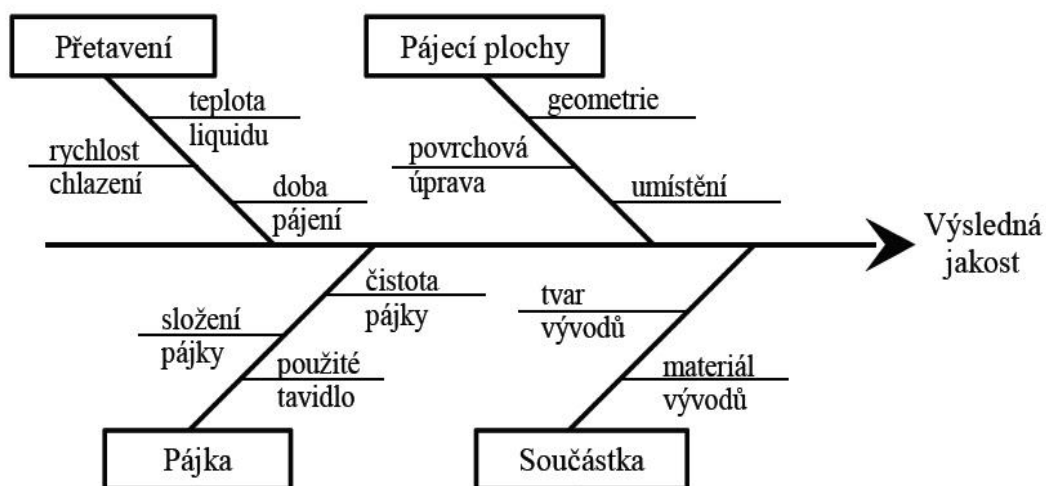
V podélném teplotním profilu jsou důležité 4 základní oblasti [1]:

1. predehřev,
2. vyrovnání teploty (aktivace tavidla),
3. přetavení,
4. chlazení.



Obr. 6.1: Teplotní profil pro pájení přetavením dle [11].

Nejdůležitější technologické faktory působící při pájení přetavením na jakost a životnost pájeného spoje jsou znázorněny v Ishikawově diagramu na obr. 6.2.



Obr. 6.2: Ishikawův diagram pro proces pájení přetavením [27].

Při pájení přetavením můžeme použít různé druhy pájecích zařízení podle druhu přenosu tepla [1]:

- vedením (kondukcí),
- prouděním (konvekcí),
- zářením (radiací).

Pájení přetavením má vůči pájení vlnou následující výhody [1]:

- pájka a tavidlo se nanášejí pouze na definovaná místa,
- úspora pájky a tavidla,
- pájka a tavidlo se nanášejí v přesně definovaném poměru,
- omezení nečistot,
- pájení probíhá bez teplotních rázů,
- vyšší hustota montáže,
- oboustranná montáž SMD.

Metody pájení přetavením [6]:

- konvekční pájení (horkým vzduchem nebo plynem),
- kondenzační pájení (pájení v kondenzovaných parách),
- pájení infračerveným zářením,
- pájení laserem,
- pájení vyhřívaným nástrojem (impulsní),
- pájení na horké desce nebo pásu.

V současné době je nejrozšířenější metodou konvekční pájení. Substrát s osazenými součástkami v pájecí pastě je přetaven horkým vzduchem nebo plynem. Tento způsob přetavení se osvědčil při pájení různě velkých součástek umístěných na substrátu. Do budoucna by se mohlo rozšířit pájení v kondenzovaných parách, kde hlavní výhodou je

přesně definovaná teplota, nebo také pájení laserem (především pro součástky Fine Pitch a malé rozměry vývodů). [1], [6]

Konvekční pájení může probíhat jak s přirozenou nebo také s rozšířenější nucenou konvekcí. Konvekční pece jsou obvykle rozděleny na 3 až 4 oddělené zóny. Horký vzduch nebo plyn proudí z trysek umístěných pod nebo i nad procházejícím substrátem. Trysky jsou konstruovány jako „dvojité“, kde horký vzduch je vháněn vnitřními tryskami do prostoru pece a současně je štěrbinami kolem nich odsáván. Tím je tak zabráněno příčnému proudění a ovlivňování jednotlivých zón. Detail těchto trysek spolu s konvekční pecí ERSA je na obr. 6.3. Optimální podélný teplotní profil se nastavuje buď pomocí změny rychlosti dopravníku, nebo změnou teploty v jednotlivých zónách.

Výhody: Vyhovují pájení vícevrstvých DPS s vyšší zástavbovou hustotou, jednodušší nastavení teplotního profilu, malý příčný teplotní gradient ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$).

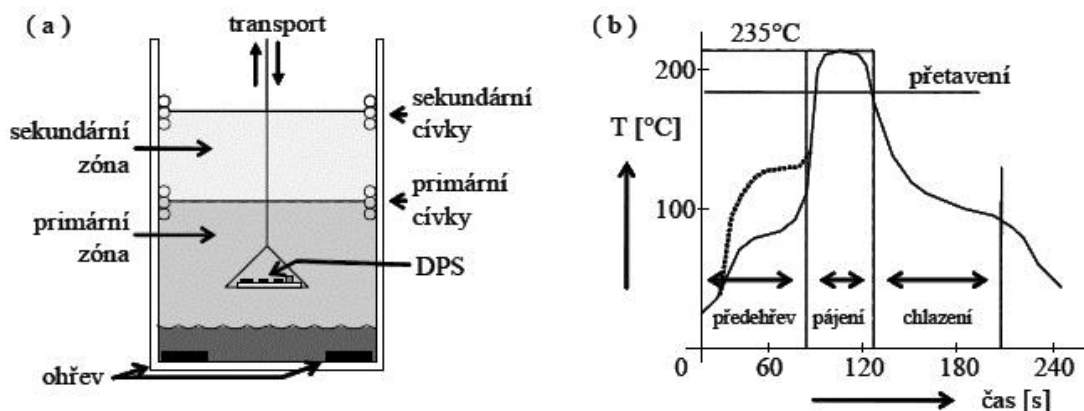
Nevýhody: Na vzduchu více oxiduje. To se dá vyřešit ochrannou atmosférou, což je ale spojeno s vyššími náklady. Dále má menší účinnost (20 až 30 %) a větší energetickou spotřebu. [1], [6]



Obr. 6.3: Konvekční pec ERSA a detail trysek [11].

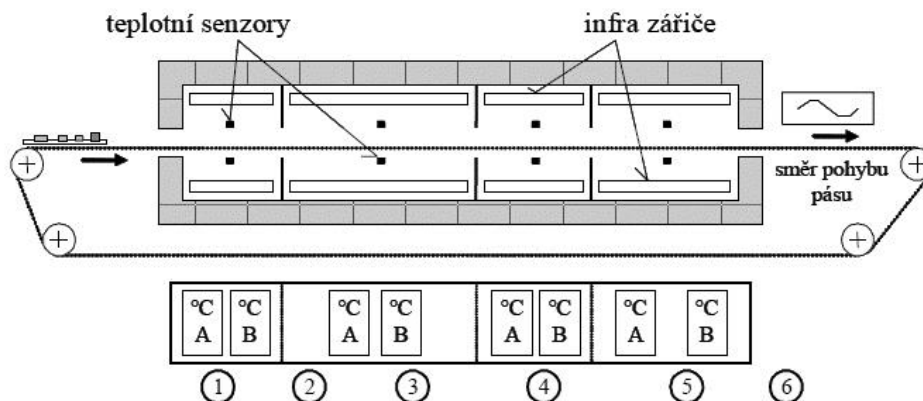
Kondenzační pájení (tzv. pájení v parách) probíhá v uzavřené nádobě obsahující inertní kapalinu s přesně definovaným bodem varu. To zaručuje konstantní teplotu v celém prostoru. Nasycené páry inertní kapaliny neobsahují kyslík, proto nedochází k oxidaci pájených spojů. Kondenzační pece se skládají z nádoby, která má vyhřívané dno inertní kapaliny a vertikálně pohyblivého roštu na kterém je umístěn substrát. Substrát se součástkami je umístěn nad kapalinou v kondenzovaných parách. Nasycené horké páry jim předávají teplotu (kondenzují na nich), dokud nedosáhnou teploty par. Po přetavení pájecí pasty je spuštěno chlazení a pára se změní na kapalinu. Pece mohou být konstruovány jako vsázkové nebo v provedení in-line. Princip kondenzačního pájení spolu s teplotním profilem je ukázán na obr. 6.4. U bezolovnatého pájení se používají kapaliny nejčastěji s teplotou varu $230\text{ }^{\circ}\text{C}$. Používané kapaliny jsou například perfluoropolyether nebo

perfluoramin. Hlavní výhodou pájení v parách je přesně definovaný bod varu kapaliny, který určuje mezní hodnotu teploty přetavení a nižší tlak par v součástkách vlivem nižší pracovní teploty. Vlivem vysoké pracovní teploty dochází v součástkách ke zvýšení tlaku par, což může vést až k delaminaci a následné nefunkčnosti součástky. Tento jev se označuje jako „popcorn effect“. Nevýhodou pájení v parách je delší pájecí proces a vysoká cena kapaliny. Pro různé teplotní profily musí být odlišná kapalina. [1], [6]



Obr. 6.4: Kondenzační pájení, a) princip pájení přetavením kondenzací par, b) teplotní profil při pájení v parách dle [11].

Pájení infračerveným zářením probíhá v pecích, které obsahují infra zářiče upravené pod i nad procházející deskou umístěnou na pohyblivém pásu. Zářiče jsou umístěny v jednotlivých sekcích, jež zajišťují požadovaný teplotní profil. Ukázka přetavovací pece s infračerveným ohřevem je na obr. 6.5. Nevýhodou infraohřevu je nehomogenita ohřevu, kdy tmavší součástky absorbují teplo lépe než pájené spoje. Na substrátu dochází k teplotním rozdílům, které mohou ovlivnit jakost pájeného spoje. Teplotní rozdíly jsou také způsobovány různými velikostmi součástek. Výhodou je vysoká účinnost (60 až 70 %). Pro svoji relativní jednoduchost a snadnou obsluhu se u některých zařízení kombinují s ohřevem nucenou konvekcí. [1], [6]



Obr. 6.5: Přetavovací pec s infračerveným ohřevem [11].

Pájení laserem se provádí řízeným laserovým paprskem, který je přes optický systém směřován na požadované místo pod úhlem 30 % od kolmice na substrát. Jako zdroje paprsku se užívá YAG laseru vhodného pro pájení vývodů součástek Fine Pitch s roztečí vývodů menší než 0,5 mm. V dnešní době se začíná stále více rozšiřovat použití výkonových diodových laserů, které mají téměř konstantní rozdělení intenzity záření. Pájení laserem se používá pro selektivní pájení součástek s malými roztečemi vývodů. Dále se může použít jako doplňkové pájení k pájení vlnou nebo přetavením, z důvodu technické limitace těchto dvou typů pájení. Výhodou je minimální teplotní ovlivňování sousedních součástek. Nevýhodou je nízká produktivita a vysoká cena. [1], [6], [10]

Pájení vyhříváním nástrojem se používá zejména při opravách. Používá se pro pájení pouzder s páskovými vývody (QFP, SOIC). Nástroj je přizpůsoben tvaru součástky a je vyhříván krátkými proudovými impulsy. Po roztavení pájky je součástka přidržena buď vakuovou pipetou, nebo povrchovým napětím k vyhřívánému nástroji. Nevýhodou této metody je malá produktivita. [1], [6]

Pájení na horké desce nebo pásu je rozšířené pro opravy v laboratorním prostředí. Používá se zejména pro keramické substráty z důvodu jejich dobré tepelné vodivosti. Výhodou je rovnoměrné rozložení teploty na substrátu, jednoduchá obsluha a optická kontrola během přetavení pájky. [6]

6.1 Ochranná atmosféra

Hlavním účelem použití ochranné atmosféry je zamezení přístupu kyslíku, který způsobuje oxidaci kovových povrchů. Pro zajištění co nejmenší oxidace pájeného spoje je potřeba redukovat obsah kyslíku na minimum. Při nízkém obsahu kyslíku lze také snížit objem tavidla, což je hlavní důvod při použití ochranné atmosféry. K oxidaci dochází například u pájecích plošek, v pokovených otvorech nebo mezi pájkou a tavidlem. Nepříznivým projevem oxidace je zvýšení teploty tavení v pájecí slitině, která je způsobena velkou stabilitou a teplotou tavení těchto oxidů. Tloušťka oxidů je přímo úměrná parciálnímu tlaku kyslíku. Na vzduchu je tloušťka těchto oxidů na pájeném spoji přibližně kolem 13 nm, ale při použití ochranné dusíkové atmosféry je tato tloušťka přibližně stokrát menší. Vzniklé oxidy lze relativně snadno odstranit použitím tavidel. Větší problém při odstranění těchto oxidů nastává, pokud se vytvoří na hranicích zrn, což vede až k odsmačení.

Jako ochranný plyn můžeme použít např.: dusík (N_2) nebo argon (Ar). Častěji se používá dusík, protože je levnější a nehoří. [1], [27]

Hlavní výhody použití ochranné atmosféry [7]:

- omezení množství tavidla (ochrana životního prostředí),
- lepší smáčivost,
- vzhlednost pájeného spoje,

- lze pájet na nepocínované povrchy,
- umožňuje zvětšení procesního okna,
- omezení tvorby zkratů, krápníků.

Nevýhodou použití ochranné atmosféry při pájení přetavením jsou provozní a pořizovací náklady. [1]

6.1.1 Dusíková atmosféra

Dusík (N_2) je bezbarvý plyn bez chuti a bez zápachu s malou reaktivitou. Nachází se v páté skupině periodické soustavy prvků. Dusík tvoří hlavní složku zemské atmosféry a z celkového objemu zaujímá přibližně 75 %. Díky tomu, že nereaguje s běžnými kovy, je označován jako inertní plyn. Této vlastnosti je využíváno při pájení k zabránění oxidace kovových povrchů.

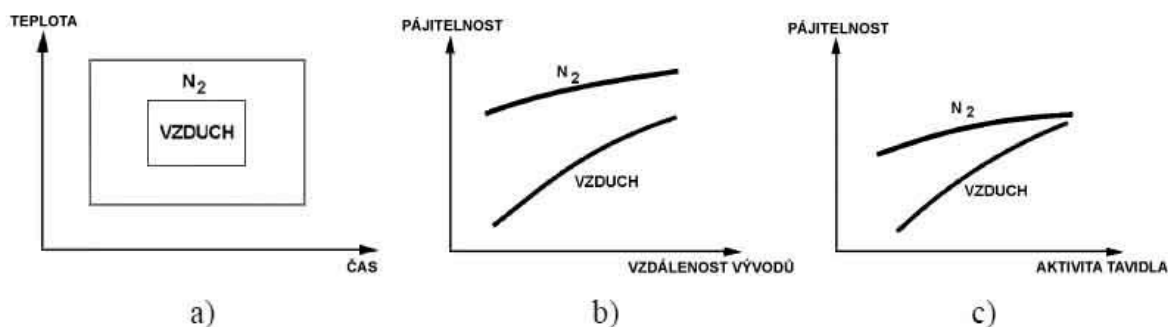
Hlavním důvodem použití dusíku je jeho netečnost a malá reaktivita, které jsou využívány v procesu pájení. Použití ochranné dusíkové atmosféry je dále výhodné v tom, že obsahuje velmi malé množství vodních par, proto také dobře vysušuje. Větší rozšíření používání ochranné dusíkové atmosféry přišlo s nástupem integrovaných obvodů s malou roztečí (Fine Pitch) a s příchodem bezolovnatého pájení. [7], [28]

Získávání dusíku se provádí extrakcí ze vzduchu. Jednou z nejpoužívanějších metod je proces zmrazování. Mezi metody získávání dusíku na stanovišti patří například systémy Liquid-Assist, membránový proces nebo proces pohlcování výkyvů tlaku. Těmito procesy je možné získat čistotu dusíku někde mezi 95 až 99,99999 %.

Mezi výhody dusíku patří jeho nízká cena oproti ostatním plynům této skupiny, je nehořlavý, nevýbušný a zdravotně nezávadný. [7]

Přednosti dusíkové ochranné atmosféry [1]:

- širší technologické okno (obr.6.6 a),
- lepší pájitelnost při menší vzdálenosti vývodů (obr.6.6 b),
- lepší smáčivost při menší aktivitě tavidla než u vzduchu (obr.6.6 c).



Obr. 6.6: Srovnání dusíkové atmosféry se vzduchem dle [1].

Nevýhodou použití ochranné dusíkové atmosféry je zvyšování nákladů na použití tohoto plynu, které ale v celkových nákladech nemusí být tak zřetelné, díky sníženému počtu defektů a s nimi spojené náklady na opravy. U průběžných systémů pájení se spotřeba dusíku pohybuje přibližně v rozmezí 15 až 25 m³ za hodinu. [28]

6.1.2 Defekty pájení

Při použití ochranné dusíkové atmosféry je v některých případech možné odstranit až 75% defektů, které vznikají při procesu pájení. Mezi tyto defekty patří například kuličky pájky, whiskery (vláknové krystaly) nebo voidy (dutiny). Důvodem snížení těchto defektů může být rychlejší a kvalitnější přetavení jednotlivých zrn pájky v celém objemu pájecí pasty a sníženou oxidací těchto jednotlivých zrn pájky.

V ochranné dusíkové atmosféře je pravděpodobné omezení vzniku kuliček pájky způsobeno sníženou oxidací, z důvodu absence kyslíku a rychlejšího přetavení jednotlivých zrn pájky. Vznik whiskerů je pravděpodobně omezen také snížením oxidace, protože je omezen růst oxidových vrstev, který vyvolává mechanické pnutí na sousední fáze cínu. Toto povrchové pnutí je jednou z hlavních příčin vzniku whiskerů. U voidů je pravděpodobné omezení způsobeno rychlejším smáčením, protože plyny vznikající při procesu pájení se lépe rozptýlí. Neplatí to ale vždy pro všechny typy pájených spojů. U některých typů BGA vede přemíra smáčení spíše ke zvýšení množství dutin v pájeném spoji.

Použití ochranné atmosféry může v některých případech vést až k přemíře smáčení. Tím že se zmenší výška navzlínané pájky, což nemusí odpovídat normám a může vést ke snížení jakosti pájeného spoje. Dalším defektem, který je spíše více pozorován u ochranné dusíkové atmosféry, je tombstoning (jev "náhrobní kámen"). Tento defekt je způsoben lepší smáčivostí a různými časy smáčení mezi dvěma kontakty součástky. Zvýšením koncentrace kyslíku od 500 do 1000 ppm, lze tento defekt minimalizovat. [28], [29]

6.1.3 Jiné typy atmosfér

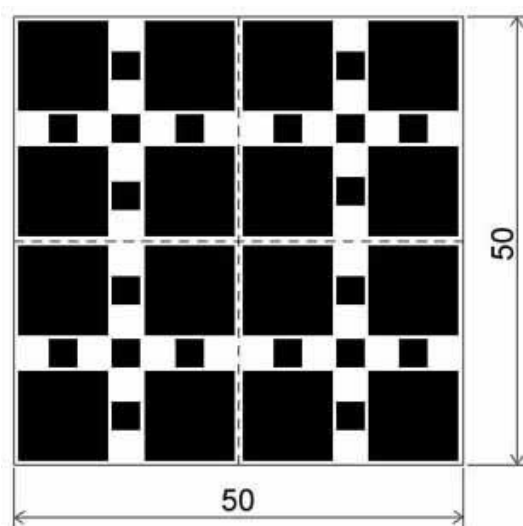
Ochrannou atmosféru je možné vytvořit i pomocí inertních plynů, mezi které patří Argon, Xenon, Krypton, Neon a Radon. Jejich nízká reaktivita je zapříčiněna plně obsazenou poslední hladinou valenčními elektrony. Výskyt těchto plynů je na Zemi poměrně vzácný a jejich zavedení v elektrotechnickém průmyslu, především v procesu pájení, by bylo zřejmě finančně neúnosné. [28]

7 Praktická část

7.1 Návrh a výroba testovacích desek

Cílem praktické části bylo navrhnout testovací motiv pro testy roztékavosti a otestovat roztékavost bezolovnaté pájky na dvou různých vodivých površích (Ag a AgPd) vyrobených na keramickém substrátu.

Testovací motiv byl navržen v programu EAGLE 5.11.0. Motiv byl navržen jako vícenásobný na keramický substrát o rozměrech 50 x 50 mm. Motiv je ukázán na obr. 7.1. Tento substrát byl poté rozdělen na čtyři jednotlivé testovací desky. Velikost pájecích ploch a otvorů v šabloně je navržena tak, aby odpovídala normě IPC – TM – 650. Velikost pájecích ploch je podle normy navržena na 10 x 10 mm. Otvor v šabloně je kruhový a má pro větší plošky průměr 3 mm. Menší plošky vyplňují zbytek plochy na keramickém substrátu a mají rozměr 3 x 3 mm. Otvor v šabloně má pro menší plošku průměr 1 mm.



Obr. 7.1: Vícenásobný testovací motiv.

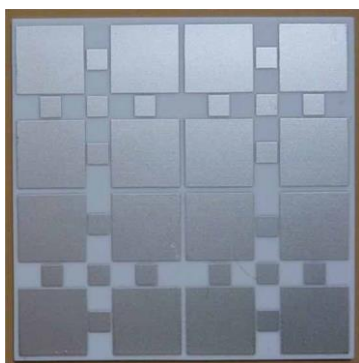
Prvním krokem při výrobě testovacích desek bylo vytvoření testovacího motivu na síto. Poté byl pomocí sítotiskového poloautomatu AUREL C880 natisknut vodivý motiv na očištěný keramický substrát. Před natisknutím byl nastaven tlak těrky, odtrh a sesouhlasení testovacího motivu s keramikou. Po natisknutí vodivé vrstvy byly testovací desky zasušeny v sušičce Chirana HS 62A a vypáleny v průběžné vypalovací peci BTU TFF51 při teplotě výpalu 850 °C. Vypálený substrát s vícenásobným motivem je ukázán na obr. 7.2.

Pro větší možnost porovnání roztékavosti pájecí pasty byly natisknuty dva druhy tlustovrstvých vodivých past. První typ vodivé pasty je ESL (9695 - G), jejímž materiálovým základem je stříbro s přídavkem paládia. Druhým typem vodivé pasty je pasta ESL (9912 - K FL), která obsahuje pouze stříbrné vodivé částice.

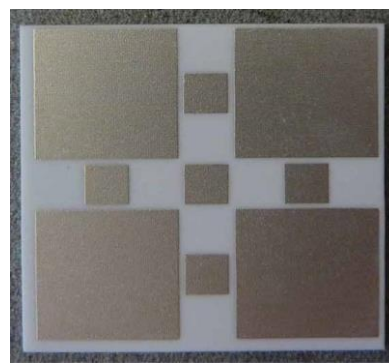
Po vypálení vodivých vrstev byly jednotlivé desky naryhované na laseru Aurel ALS300 a rozlomeny na čtyři výsledné testovací desky. Parametry testovacích desek jsou v tab. 7.1. Výsledná testovací deska po naryhování a rozlomení je na obr. 7.3.

Tab. 7.1: Parametry testovacích desek.

Parametr	Hodnota
Základní materiál	Keramika Al_2O_3
Tloušťka základního materiálu	0,635 mm
Rozměr základního materiálu	50 x 50 mm
Vodivá vrstva	
1. materiál (označení a tloušťka vypálené vrstvy)	AgPd (ESL 9695 - G, 16 μm)
2. materiál (označení a tloušťka vypálené vrstvy)	Ag (ESL 9912 - K FL, 12 μm)



Obr. 7.2: Vypálený substrát s vícenásobným testovacím motivem.



Obr. 7.3: Výsledná testovací deska.

Před tiskem pájecí pasty byly jednotlivé desky očištěny od prachu a mastnoty pomocí isopropylalkoholu. Tisk pájecí pasty byl proveden na poloautomatickém šablonovém zařízení UNIPRINT – PM – Go3 – V. Šablona o tloušťce 150 μm byla zhotovena z nerezového plechu pomocí laseru firmou PBT Rožnov pod Radhoštěm, s.r.o. Před započetím tisku pájecí pasty bylo nejprve nutné správně nastavit jednotlivé parametry šablonového tisku. Průměrná výška natisknuté pájecí pasty byla 158 μm . Zařízení pro šablonový tisk je ukázáno na obr. 7.4.

Po natisknutí pájecí pasty byl pro jednotlivé testovací body změřen jejich průměr. Průměr se vždy měřil na jednom testovacím bodě dvakrát – jednou horizontálně a jednou vertikálně.



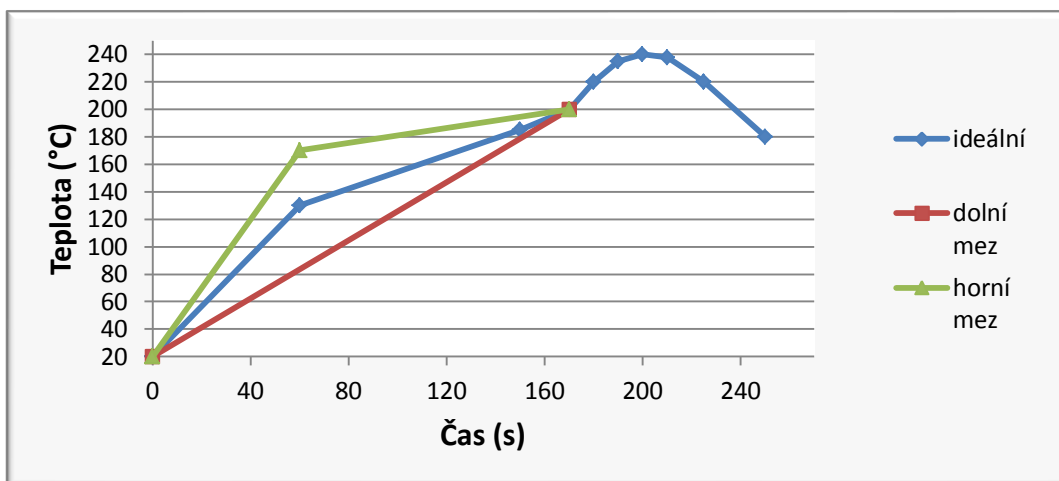
Obr. 7.4: Zařízení Uniprint – PM – Go3 – V pro šablonový tisk.

Pájení testovacích desek probíhalo v exsikátoru. Exsikátor se skládal z ohřevné desky, vodního chlazení, ventilu pro přívod dusíku a pro odsávání vzduchu. Pro měření teploty na testovací desce byly použity dva termočlánky typu K. Jeden termočlánek byl připojen k regulátoru Smart R500, který sloužil k regulaci teploty ohřevné desky. Druhý termočlánek byl použit jako kontrolní, pro sledování teploty na testovací desce. Tento termočlánek byl připojen pomocí měřicího zařízení OMEGA TC-08 k počítači, kde byla sledována okamžitá teplota. Pájení probíhalo při různých koncentracích kyslíku. Pracoviště pájení je na obr. 7.5.



Obr. 7.5: Pracoviště pájení.

Teplotní profil byl vytvořen podle doporučeného teplotního profilu dle výrobce. Na obr. 7.6 je doporučený teplotní profil s definovaným teplotním rozptylem. Pro pájení byla použita pájecí pasta SAC305 od firmy Almit. V tab. 7.2 jsou podrobněji popsány vlastnosti této pájecí pasty.

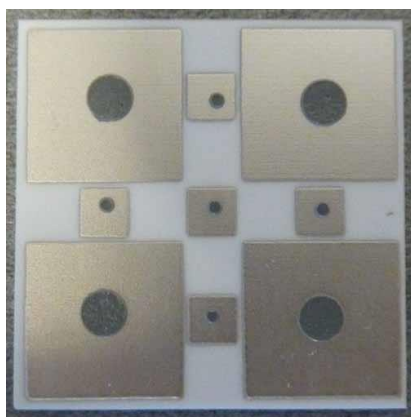


Obr. 7.6: Doporučený teplotní profil pro pastu SAC305 dle výrobce.

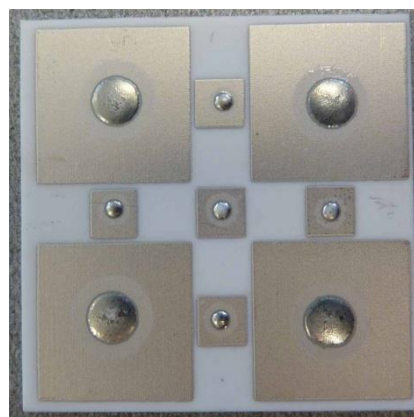
Tab. 7.2: Použitá pájecí pasta.

Výrobce	Almit
Typ	LFM - 48W TM - HP(L)
Složení	Sn96,5Ag3Cu0,5
Velikost zrn	20 - 38 μm
Obsah tavidla	12 %
Tavidlo	R0
Teplota tuhnutí	217 °C
Teplota tání	220 °C
Viskozita	200 $\pm$ 30 Pa*s

Po zapájení byla u testovacích desek změřena šířka roztečení pájecí pasty a porovnána s průměrem pájecího bodu po tisku. Ukázka testovací desky s natisknutou pájecí pastou je na obr. 7.7. Na obr. 7.8 je ukázka zapájené testovací desky při koncentraci kyslíku 50 ppm.



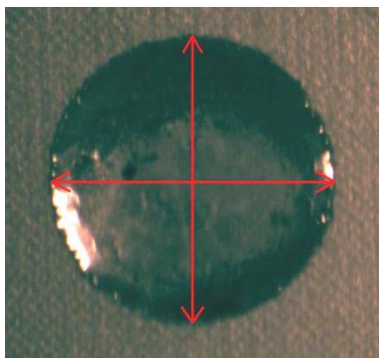
Obr. 7.7: Natisknutá pájecí pasta.



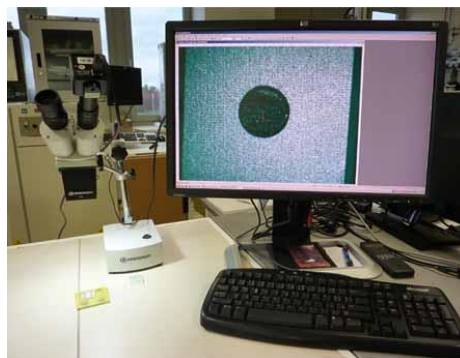
Obr. 7.8: Zapájená testovací deska.

7.2 Měření roztékavosti pájecí pasty

Šířka pájecího bodu byla u každého testovacího bodu měřena vždy po natisknutí a po zapájení. U každého testovacího bodu se šířka měřila jak horizontálně, tak i vertikálně. Princip měření šířky roztečení je znázorněn na obr. 7.9. Pracoviště pro měření šířky roztečení se skládalo ze stereolupy s kamerou a počítače, na kterém byla pomocí programu ScopePhoto měřena šířka roztečení pájecí pasty. Pracoviště se kalibrovalo každý den před započítím měření pomocí skleněného hranolu s měřítkem. Pracoviště pro měření šířky roztečení je na obr. 7.10.



Obr. 7.9: Princip měření šířky roztečení.



Obr. 7.10: Pracoviště pro měření šířky roztečení.

U testovacích bodů byla kromě šířky měřena také jejich výška. Pro měření výšky byl použit úchylkoměr upnutý v kovovém stojanu s přesností $1\mu\text{m}$. Pracoviště pro měření výšky testovacích bodů je na obr. 7.11.



Obr. 7.11: Stojan s úchylkoměrem.

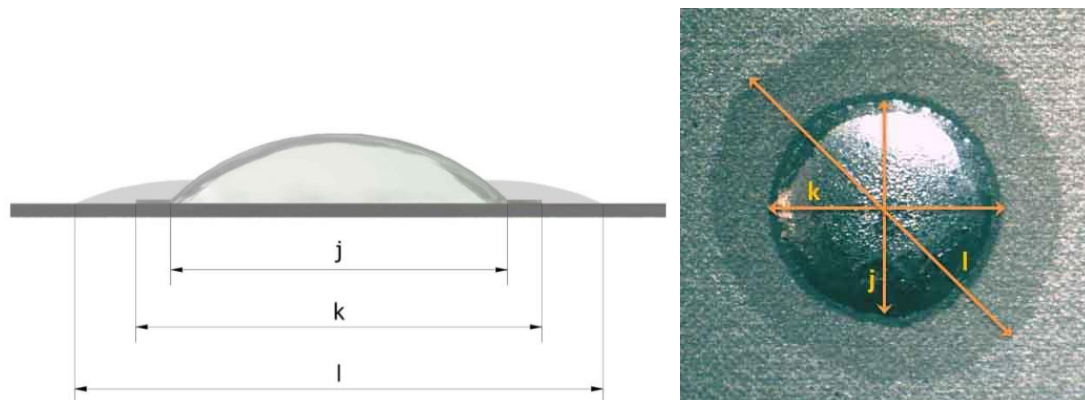
U zapájených desek byla jako doplňková informace měřena také šířka roztečení tavidla (vzdálenost l podle obr. 7.12). Dále byly u testovacích bodů měřeny dvě šířky roztečení (vzdálenost j a k) z důvodu vytváření prstence kolem přetaveného vrchlíku. Šířka

tohoto prstence byla závislá na druhu použité vodivé vrstvy a na koncentraci ochranné dusíkové atmosféry.

Pro výpočet roztečení pájecí pasty byla použita rovnice (2).

$$R = \left(\frac{P_z - V_z}{P_n - V_n} - 1 \right) * 100 \quad (2)$$

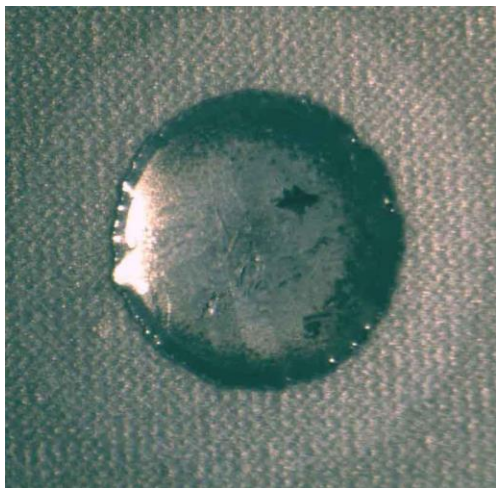
Kde R je procentuální roztečení pájecí pasty, P_z je šířka roztečení pájecí pasty po zapájení, V_z je výška přetaveného vrchlíku, P_n je šířka roztečení pájecí pasty po tisku a V_n je průměrná výška natisknuté pájecí pasty.



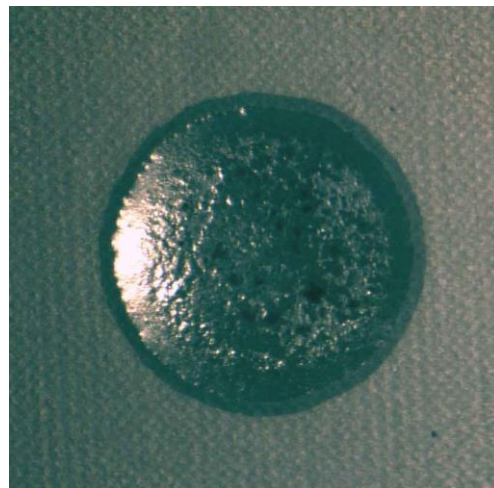
Obr. 7.12: Ukázka měření jednotlivých vzdáleností u testovacích bodů (j – šířka vrchlíku, k – šířka vrchlíku s prstencem, l – šířka tavidla).

7.2.1 Porovnání vodivých povrchů v závislosti na velikosti roztečení pájky

Při pájení bezolovnaté pájecí pasty SAC305 docházelo na různých vodivých površích k vytváření pájkového prstence s různými šířkami. Prstenec vznikl tak, že při přetavení se pájka nejprve roztékala po povrchu a po přetavení se stáhla a vytvořila přetavený vrchlík. Zbylá pájka, která se nestáhla do vrchlíku, vytvořila vlastní prstenec. Velikost tohoto prstence byla závislá na použitém vodivém povrchu. U vodivého povrchu složeného ze stříbra a paládia byl tento prstenec znatelně větší, než pro vodivou vrstvu složenou ze stříbra (obr. 7.13 a 7.14).



Obr. 7.13: Prstenec u koncentrace 20 ppm, povrch Ag.



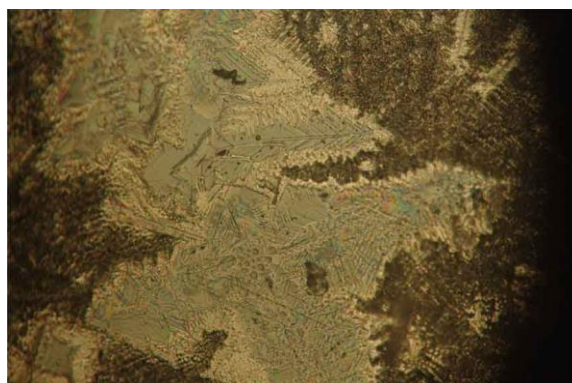
Obr. 7.14: Prstenec u koncentrace 20 ppm, povrch AgPd.

7.2.2 Porovnání velikosti krystalů v pájce v závislosti na koncentraci kyslíku O_2

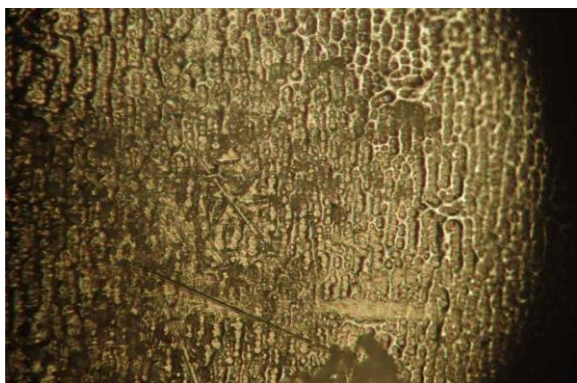
Při měření výšky přetavené pájecí pasty došlo k zajímavému zjištění. Snížením koncentrace kyslíku O_2 při pájení v ochranné dusíkové atmosféře docházelo k nárůstu velikosti zrn v přetavené pájecí pastě. Tento nárůst se projevil na výšce vrchlíku po přetavení. I přestože vlivem nižší koncentrace kyslíku dochází k většímu roztečení pájecí pasty, současně dochází také k nárůstu výšky vrchlíku. Povrchy vrchlíků byly foceny na mikroskopu s 20 násobným zvětšením. Ukázka změny struktury přetavené pájecí pasty zobrazena v celém měřeném rozsahu koncentrací ochranné dusíkové atmosféry je pro stříbrný vodivý povrch na obrázcích v příloze A a pro stříbro – paládiový povrch na obrázcích v příloze B. Na obr. 7.15 a 7.16 je porovnání krystalů na Ag vodivém povrchu pro vzduch a koncentraci kyslíku 50 ppm. Porovnání krystalů na AgPd vodivém povrchu je na obr. 7.17 a 7.18.



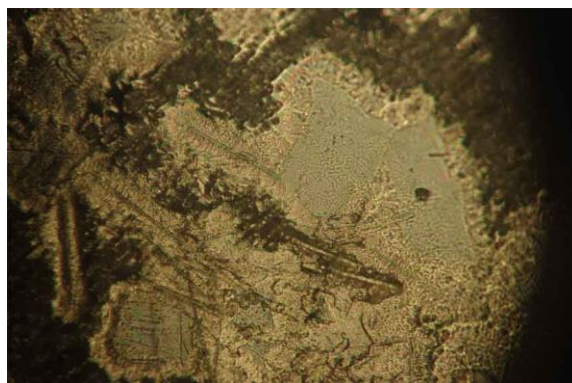
Obr. 7.15: Vzduch, Ag vodivý povrch.



Obr. 7.16: 50 ppm, Ag vodivý povrch.



Obr. 7.17: Vzduch, AgPd vodivý povrch.



Obr. 7.18: 50 ppm, AgPd vodivý povrch.

7.2.3 EDX materiálová analýza

Na testovacích deskách byla pro vybrané testovací body provedena EDX materiálová analýza. Analýza byla provedena na rastrovacím elektronovém mikroskopu (SEM). Cílem materiálové analýzy bylo zjištění materiálového složení přetavených prstenců. V příloze C jsou ukázány informativní naměřené výsledky materiálového složení pro Ag i AgPd vodivý povrch s pájecí pastou SAC305 a pastou SN100C dle [17]. Na výsledných ukázkách je možné pozorovat pouze rozhraní pájkový prstenec – vodivý povrch, z důvodu velkého přiblížení. Obrázky a grafy z prvních měření udávají pouze orientační výsledky, které je nutné v další práci ověřit a podrobněji analyzovat.

7.3 Naměřené hodnoty roztékavosti pájecí pasty

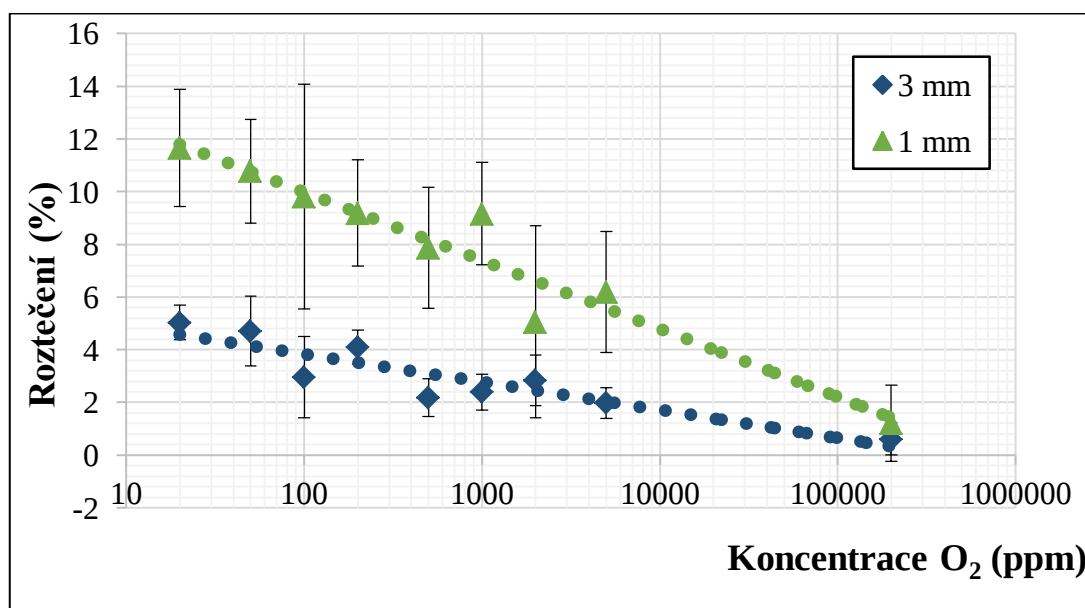
7.3.1 Porovnání roztečení pájecí pasty v závislosti na použitém vodivém povrchu, měřeno s prstencem

V tab. 7.3 jsou statisticky vypočtené hodnoty roztečení pájecí pasty v závislosti na snižující se koncentraci kyslíku O_2 na vodivém povrchu složeného ze stříbra. Z vypočteného průměru a směrodatné odchylky byl sestaven graf, který je na obr. 7.19.

Tab. 7.3: Statisticky vypočtené hodnoty roztečení pájecí pasty pro Ag vodivý povrch, měřeno s prstencem.

c (ppm)	3 mm				1 mm			
	max (%)	min (%)	prům (%)	σ (%)	max (%)	min (%)	prům (%)	σ (%)
20	6,28	3,30	5,03	0,66	15,69	8,03	11,66	2,24
50	6,09	1,67	4,71	1,32	15,22	6,08	10,78	1,97
100	5,14	-0,82	2,97	1,55	15,32	-1,72	9,81	4,27
200	5,75	3,32	4,10	0,64	13,20	4,56	9,19	2,01
500	3,47	0,75	2,19	0,72	11,83	2,83	7,87	2,30
1000	4,13	1,25	2,39	0,69	12,99	5,35	9,16	1,95
2000	4,83	0,95	2,84	0,97	12,69	-0,37	5,06	3,64
5000	3,06	0,83	1,98	0,58	9,88	2,25	6,19	2,31
200000	1,82	-0,47	0,61	0,61	4,50	-1,28	1,22	1,44

Z grafu naměřených hodnot pro pájecí pastu na stříbrném vodivém povrchu je možné pozorovat rostoucí tendenci roztečení pájecí pasty v závislosti na snižující se koncentraci kyslíku O₂. Pro velké body (3 mm) dochází k nárůstu roztečení o 4,42 % při porovnání hodnoty roztečení na vzduchu a při koncentraci 20 ppm O₂. Při porovnání malých bodů (1 mm) je toto roztečení ještě výraznější. Roztečení narůstá o 10,44 %. V grafu je pro jednotlivé body vyznačena i směrodatná odchylka.



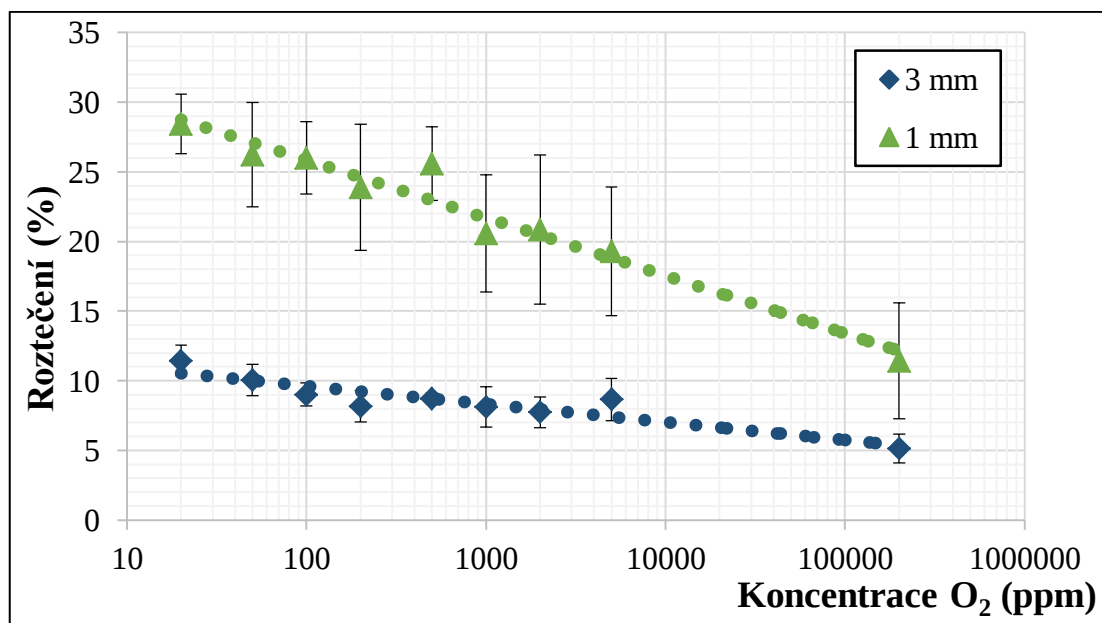
Obr. 7.19: Graf roztečení pájecí pasty pro Ag vodivý povrch, měřeno s prstencem.

V tab. 7.4 jsou statisticky vypočtené hodnoty roztečení pájecí pasty v závislosti na snižující se koncentraci kyslíku O₂ na vodivém povrchu složeného ze stříbra a paládia. Z vypočteného průměru a směrodatné odchylky byl sestaven graf, který je na obr. 7.20.

Tab. 7.4: Statisticky vypočtené hodnoty roztečení pájecí pasty pro AgPd vodivý povrch, měřeno s prstencem.

c (ppm)	3 mm				1 mm			
	max (%)	min (%)	prům (%)	σ (%)	max (%)	min (%)	prům (%)	σ (%)
20	13,40	9,39	11,44	1,10	32,88	25,01	28,44	2,14
50	12,95	8,17	10,06	1,12	35,21	20,02	26,23	3,75
100	10,50	7,66	9,01	0,84	30,87	21,79	26,01	2,60
200	9,96	5,67	8,17	1,14	34,78	13,78	23,88	4,54
500	9,72	7,96	8,73	0,40	30,85	20,72	25,59	2,64
1000	10,60	4,62	8,13	1,46	27,72	11,40	20,59	4,19
2000	10,22	5,21	7,75	1,11	30,64	10,36	20,86	5,35
5000	11,99	6,25	8,65	1,52	31,60	12,63	19,30	4,64
200000	6,92	3,46	5,13	1,05	17,84	4,02	11,42	4,16

Z grafu naměřených hodnot pro pájecí pastu na stříbro – paládiovém vodivém povrchu je možné pozorovat rostoucí tendenci roztečení pájecí pasty v závislosti na snižující se koncentraci kyslíku O_2 . Pro velké body (3 mm) dochází k nárůstu roztečení o 6,31 % při porovnání hodnoty roztečení na vzduchu a při koncentraci 20 ppm O_2 . Při porovnání malých bodů (1 mm) je toto roztečení ještě výraznější. Roztečení narůstá o 17,02 %. U malých bodů je v porovnání s velkými body výrazně větší směrodatná odchylka. Toto zvětšení směrodatné odchylky je způsobeno použitím stejné měřicí metody se stejnou měřicí přesností.



Obr. 7.20: Graf roztečení pájecí pasty pro AgPd vodivý povrch, měřeno s prstencem.

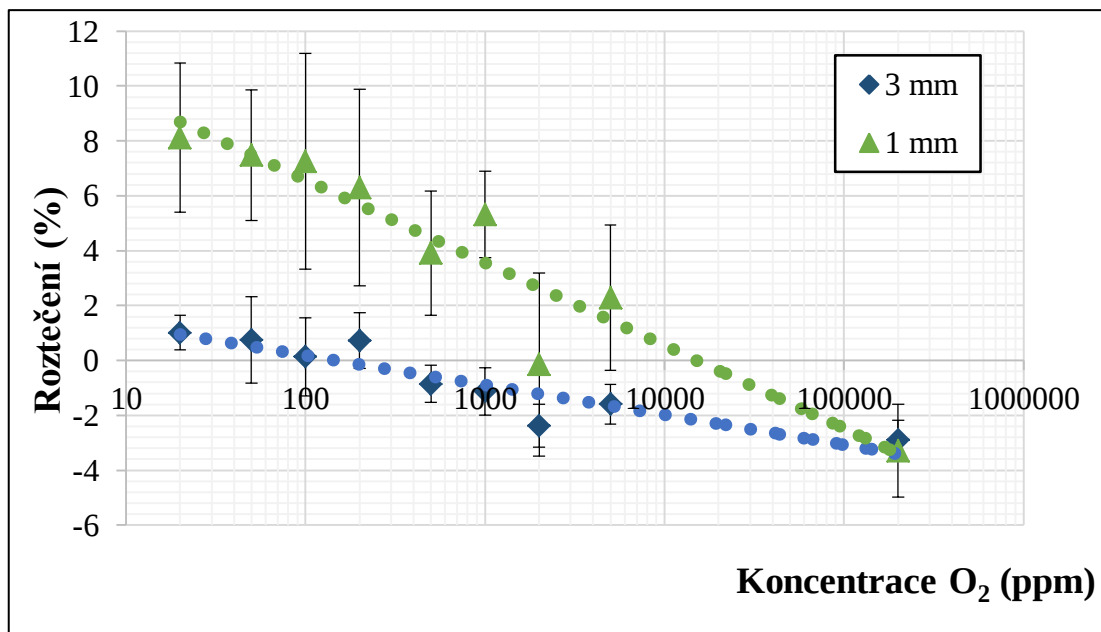
7.3.2 Porovnání roztečení pájecí pasty v závislosti na použitém vodivém povrchu, měřeno bez prstence

V tab. 7.5 jsou statisticky vypočtené hodnoty roztečení pájecí pasty v závislosti na snižující se koncentraci kyslíku O_2 na vodivém povrchu složeného ze stříbra. Z vypočteného průměru a směrodatné odchylky byl sestaven graf, který je na obr. 7.21.

Tab. 7.5: Statisticky vypočtené hodnoty roztečení pájecí pasty pro Ag vodivý povrch, měřeno bez prstence.

c (ppm)	3 mm				1 mm			
	max (%)	min (%)	prům (%)	σ (%)	max (%)	min (%)	prům (%)	σ (%)
20	2,04	-0,23	1,01	0,62	13,48	4,11	8,12	2,71
50	2,80	-2,92	0,75	1,57	13,12	3,18	7,48	2,38
100	2,52	-2,75	0,13	1,42	12,71	-2,22	7,26	3,93
200	3,92	-0,35	0,72	1,01	16,01	-0,13	6,30	3,59
500	0,59	-2,12	-0,85	0,67	8,96	-0,24	3,91	2,27
1000	1,52	-2,29	-1,13	0,86	8,07	0,51	5,33	1,57
2000	-1,02	-3,99	-2,37	0,78	6,65	-5,92	-0,15	3,34
5000	0,01	-2,46	-1,59	0,72	8,34	-1,77	2,28	2,65
200000	-1,53	-4,17	-2,89	0,72	1,33	-5,80	-3,30	1,69

Z grafu naměřených hodnot pro pájecí pastu na stříbrném vodivém povrchu je možné vysledovat rostoucí tendenci roztečení pájecí pasty v závislosti na snižující se koncentrací kyslíku O_2 . Pro velké body (3 mm) dochází k nárůstu roztečení o 3,9 % při porovnání hodnoty roztečení na vzduchu a při koncentraci 20 ppm O_2 . Při porovnání malých bodů (1 mm) je toto roztečení ještě výraznější. Roztečení narůstá o 11,42 %. U velkých bodů docházelo až do hodnoty koncentrace 500 ppm k zápornému roztečení. U malých bodů bylo záporné roztečení pozorováno pouze u zapájených bodů na vzduchu a při koncentraci 2000 ppm O_2 . Hodnota roztečení pro koncentraci 2000 ppm O_2 je značně uskočená od výsledné směrnice. Tato odchylka mohla být způsobena chybou měření.



Obr. 7.21: Graf roztečení pájecí pasty pro Ag vodivý povrch, měřeno bez prstence.

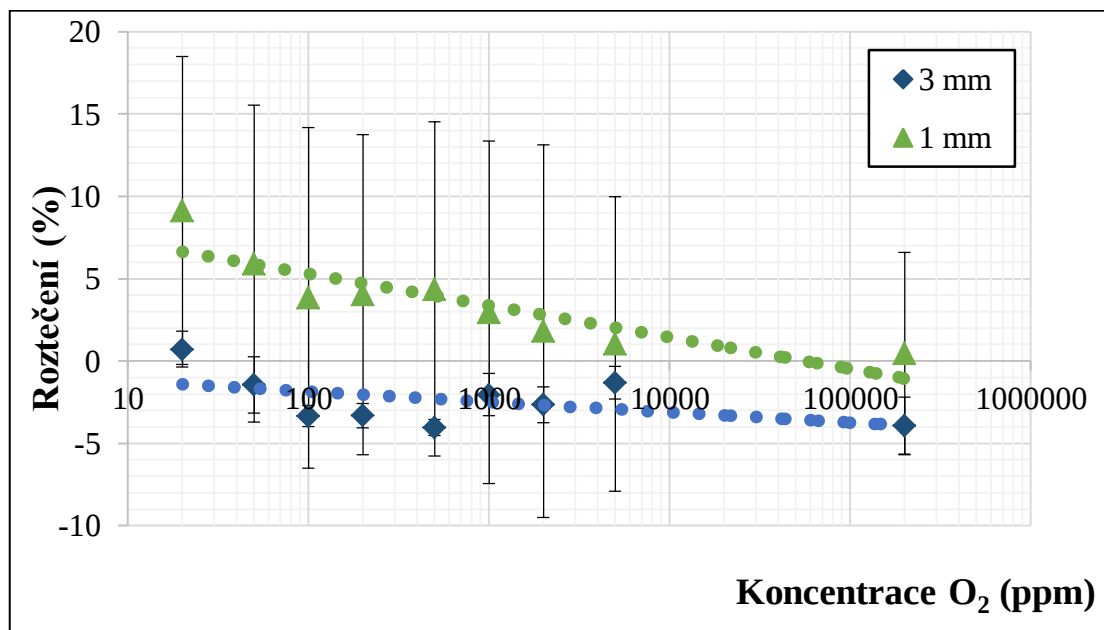
V tab. 7.6 jsou statisticky vypočtené hodnoty roztečení pájecí pasty v závislosti na snižující se koncentraci kyslíku O_2 na vodivém povrchu složeného ze stříbra a paládia. Z vypočteného průměru a směrodatné odchylky byl sestrojen graf, který je na obr. 7.22.

Tab. 7.6: Statisticky vypočtené hodnoty roztečení pájecí pasty pro AgPd vodivý povrch, měřeno bez prstence.

c (ppm)	3 mm				1 mm			
	max (%)	min (%)	prům (%)	σ (%)	max (%)	min (%)	prům (%)	σ (%)
20	2,53	-1,56	0,72	1,09	30,08	0,63	9,15	9,36
50	1,50	-4,21	-1,44	1,71	30,44	-6,86	5,91	9,60
100	-1,86	-4,32	-3,34	0,63	25,72	-4,77	3,84	10,33
200	-1,81	-4,48	-3,31	0,74	24,33	-8,75	4,04	9,72
500	-3,11	-4,76	-4,04	0,47	25,45	-6,24	4,38	10,14
1000	1,89	-3,66	-2,04	1,28	27,72	-8,32	2,97	10,41
2000	0,21	-4,43	-2,65	1,08	30,64	-12,83	1,82	11,32
5000	1,08	-3,29	-1,31	0,99	23,07	-8,30	1,04	8,95
200000	-0,39	-6,57	-3,94	1,73	17,84	-7,44	0,46	6,14

Z grafu naměřených hodnot pro pájecí pastu na stříbro – paládiovém vodivém povrchu je možné pozorovat mírný až zanedbatelný nárůst roztečení pro velké testovací body. Při porovnání roztečení s natisknutou pájecí pastou je toto roztečení záporné, kromě hodnoty při koncentraci 20 ppm O_2 . Pro koncentrace od hodnoty 500 ppm až do 100 ppm O_2 je roztečení v porovnání se vzduchem téměř zanedbatelné. Nárůst je možné pozorovat u koncentrací 2000 ppm, 50 ppm a 20 ppm O_2 . Pro velké body dochází k nárůstu roztečení o 4,66 % při porovnání hodnoty roztečení na vzduchu a při koncentraci 20 ppm O_2 . Při porovnání malých bodů je toto roztečení 8,69 %. U malých bodů lze pozorovat velmi

výrazný rozdíl ve velikosti směrodatné odchyly v porovnání s velkými body. Nárůst směrodatné odchyly může být způsoben chybou měření nebo vlastnostmi povrchu a pájky.



Obr. 7.22: Graf roztečení pájecí pasty pro AgPd vodivý povrch, měřeno bez prstence.

7.3.3 Porovnání roztečení tavidla v závislosti na použitém vodivém povrchu

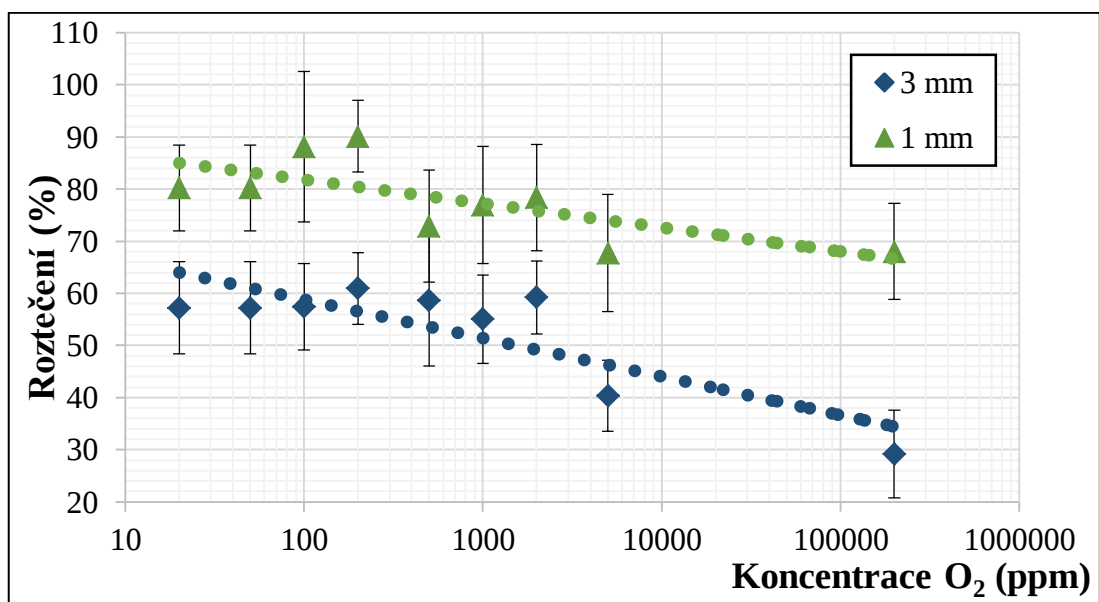
V tab. 7.7 jsou statisticky vypočtené hodnoty roztečení tavidla v závislosti na snižující se koncentraci kyslíku O_2 na vodivém povrchu složeného ze stříbra. Z vypočteného průměru a směrodatné odchyly byl sestaven graf, který je na obr. 7.23.

Tab. 7.7: Statisticky vypočtené hodnoty roztečení tavidla pro Ag vodivý povrch.

c (ppm)	3 mm				1 mm			
	max (%)	min (%)	prům (%)	σ (%)	max (%)	min (%)	prům (%)	σ (%)
20	73,15	47,26	57,24	8,84	95,06	68,90	80,25	8,25
50	73,15	47,26	57,24	8,84	95,06	68,90	80,25	8,25
100	79,17	34,92	57,41	8,27	110,80	47,43	88,12	14,45
200	80,59	50,35	60,98	6,89	103,61	78,54	90,14	6,89
500	85,27	35,41	58,68	12,56	105,94	55,59	72,92	10,74
1000	77,92	37,91	55,05	8,49	110,43	60,42	76,98	11,24
2000	69,76	43,81	59,22	6,99	96,65	50,00	78,38	10,19
5000	60,74	31,67	40,34	6,86	104,47	45,37	67,73	11,26
200000	48,17	12,80	29,19	8,44	89,12	50,60	68,05	9,24

Z grafu naměřených hodnot pro tavidlo na stříbrném vodivém povrchu je možné pozorovat zvýšení roztečení tavidla při porovnání testovacích bodů pájených v ochranné

dusíkové atmosféře a testovacích bodů pájených na vzduchu. Výraznější rozdíl byl naměřen u velkých testovacích bodů (3 mm). Od koncentrace 2000 ppm O₂ byla změna roztečení pro velké testovací body minimální.



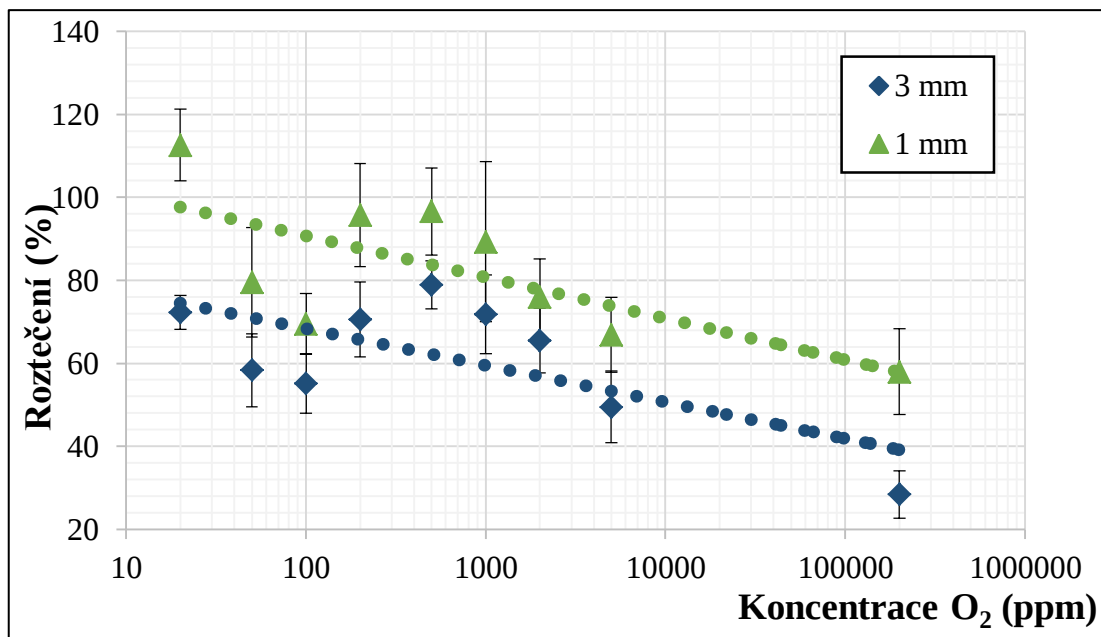
Obr. 7.23: Graf roztečení tavidla pro Ag vodivý povrch.

V tab. 7.8 jsou statisticky vypočtené hodnoty roztečení tavidla v závislosti na snižující se koncentraci kyslíku O₂ na vodivém povrchu složeného ze stříbra a paládia. Z vypočteného průměru a směrodatné odchylky byl sestaven graf, který je na obr. 7.24.

Tab. 7.8: Statisticky vypočtené hodnoty roztečení tavidla pro AgPd vodivý povrch.

c (ppm)	3 mm				1 mm			
	max (%)	min (%)	prům (%)	σ (%)	max (%)	min (%)	prům (%)	σ (%)
20	90,70	66,49	72,22	4,08	130,96	93,94	112,57	8,65
50	77,84	45,06	58,33	8,81	110,20	58,34	79,53	13,19
100	73,33	40,51	55,10	7,15	85,00	52,17	69,50	7,36
200	89,88	46,98	70,56	9,08	123,17	73,10	95,75	12,46
500	92,52	66,32	78,95	5,81	120,21	70,71	96,57	10,42
1000	95,72	52,80	71,76	9,48	176,24	54,01	89,31	19,29
2000	83,02	50,26	65,50	7,77	91,71	56,50	75,94	9,22
5000	74,65	35,81	49,48	8,61	87,76	53,50	66,89	9,08
200000	40,31	16,78	28,44	5,71	72,02	2,63	57,99	10,29

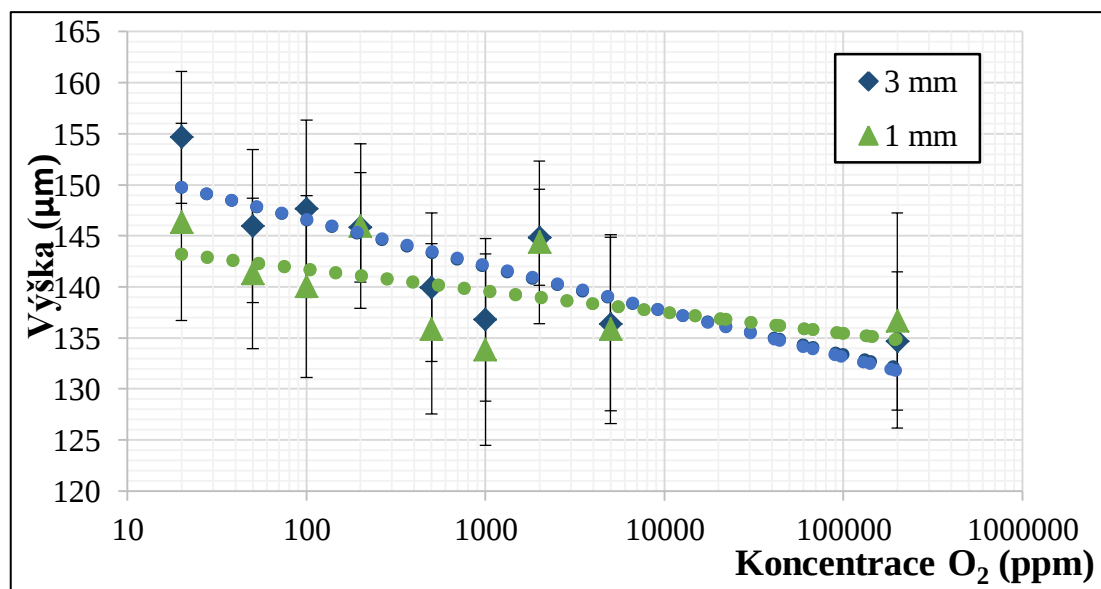
Z grafu naměřených hodnot pro tavidlo na stříbro – paládiovém vodivém povrchu je možné sledovat rostoucí tendenci šířky roztečení od testovacích bodů pájených na vzduchu, až po testovací body pájené při koncentraci 500 ppm O₂. Od koncentrace 500 ppm O₂ dochází až do hodnoty koncentrace 100 ppm O₂ k výraznému poklesu šířky roztečení. Při dalším snižování koncentrace O₂ dochází k opětovnému nárůstu.



Obr. 7.24: Graf roztečení tavidla pro AgPd vodivý povrch.

7.3.4 Porovnání výšky přetaveného vrchlíku v závislosti na koncentraci kyslíku O₂.

Při měření výšky přetaveného vrchlíku byl naměřen neočekávaný nárůst v závislosti se snižující se koncentrací kyslíku O₂. Nárůst výšky přetaveného vrchlíku byl způsoben růstem krystalů v přetavené pájecí pastě. Na obr. 7.25 je ukázka naměřených hodnot výšky přetaveného vrchlíku v závislosti na změně koncentrace kyslíku O₂ pro Ag vodivý povrch.



Obr. 7.25: Graf naměřených hodnot výšky přetaveného vrchlíku pro Ag vodivý povrch.

7.4 Zhodnocení výsledků

Roztékavost pájecí pasty SAC305 byla měřena na 90 testovacích deskách. Na každé desce byly měřeny 4 velké a 5 malých testovacích bodů. Celkem bylo měřeno 810 testovacích bodů. U těchto bodů byla měřena šířka roztečení pájecí pasty po tisku, šířka roztečení pájecí pasty po zapájení, šířka roztečení tavidla a výška vytvořených vrchlíků.

Naměřené výsledky naznačují pozitivní vliv použití ochranné dusíkové atmosféry v závislosti na roztékavosti bezolovnaté pájecí pasty SAC305. U testovacích bodů vznikala v závislosti na typu použité vodivé vrstvy prstenec pájky kolem přetaveného vrchlíku. Z důvodu vytváření různě širokého prstence v závislosti na typu použitého vodivého povrchu byla šířka testovacích bodů měřena s prstencem i bez prstence.

Hodnoty roztečení měřené s prstencem naznačují lepší roztékavost bezolovnaté pájecí pasty SAC305 pájené na vodivém povrchu AgPd, než na Ag vodivém povrchu. U velkých bodů dochází na AgPd vrstvě k nárůstu roztečení o 6,31 % v porovnání s Ag vrstvou, kde dochází k nárůstu roztečení o 4,42 %. Tento nárůst roztečení je brán při porovnání hodnoty roztečení na vzduchu a při koncentraci 20 ppm O₂. U malých bodů je roztečení pro AgPd vrstvu 17,02 % a pro Ag 10,44 %.

Hodnoty roztečení měřené bez prstence naznačují také pozitivní nárůst roztečení v závislosti na snižující se koncentraci O₂, ale v porovnání s natisknutou pájecí pastou vykazují záporné roztečení. Toto smrštění přetaveného vrchlíku je pozorovatelné především pro velké pájecí body. Pro velké body u Ag vodivé vrstvy je záporné roztečení pozorováno až do hodnoty koncentrace 500 ppm O₂. U AgPd vrstvy je pro velké body nezáporné roztečení pouze pro koncentraci 20 ppm O₂. Záporné roztečení je pro malé body pozorovatelné pouze na Ag vodivé vrstvě a to pro vzduch a pro koncentraci 2000 ppm O₂. Záporná hodnota roztečení u koncentrace 2000 ppm O₂ je značně uskočená od výsledné směrnice. Tato odchylka mohla být způsobena chybou měření. Při porovnání hodnot roztečení měřených bez prstence vykazuje lepší roztékavost Ag vodivý povrch a to i přesto, že pro velké body je rozdíl roztečení mezi vzduchem a koncentrací O₂ pro AgPd vodivý povrch o 0,76 % větší. U velkých bodů dochází na Ag vrstvě k nárůstu roztečení o 3,9 % a u AgPd vrstvy k nárůstu roztečení o 4,42 %. Tento nárůst roztečení je brán při porovnání hodnoty roztečení na vzduchu a při koncentraci 20 ppm O₂. U malých bodů je zřetelnější nárůst pro vodivou vrstvu Ag, kde je hodnota roztečení 11,42 %, oproti AgPd vrstvě, která má hodnotu roztečení 8,69 %.

Rozptyl naměřených hodnot mohl být způsobený chybou měření, nebo různou viskozitou pájecí pasty, která mohla ovlivnit množství nanesené pájecí pasty a její roztečení po tisku.

Při měření výšky přetavené pájecí pasty došlo k zajímavému zjištění. Snižováním koncentrace O₂ v ochranné dusíkové atmosféře docházelo k nárůstu velikosti zrn v přetavené pájce. Tento nárůst krystalů byl z nedostatku času zkoumán pouze na povrchu přetavených vrchlíků. Rostoucí tendence výšky přetaveného vrchlíku byla pozorována i přesto, že pro snižující se koncentraci O₂ docházelo k nárůstu šířky roztečení. Nárůst

krystalů se projevil na výšce vrchlíku po přetavení. Pro velké body byl povrch vrchlíků zdokumentován.

U testovacích bodů byla pro zajímavost měřena také šířka roztečení tavidla. I přes velký rozptyl hodnot vyjádřený směrodatnou odchylkou, lze u Ag vodivé vrstvy pozorovat zvýšení roztečení tavidla při porovnání testovacích bodů pájených na vzduchu a při snížené koncentraci O_2 . Pro vodivý povrch AgPd lze pozorovat rostoucí tendenci šířky roztečení tavidla až do hodnoty koncentrace 500 ppm O_2 . Od této hodnoty dochází k hodnotě 100 ppm O_2 k poklesu šířky roztečení a poté k opětovnému nárůstu.

V návaznosti na tuto práci by bylo vhodné otestovat roztékavost i pro jiné materiálové kombinace pájecí pasta – vodivý povrch. Dále by bylo vhodné důkladněji prozkoumat růst krystalů v přetavené pájce v závislosti na koncentraci O_2 . Prozkoumat vnitřní strukturu přetavené pájecí pasty například pomocí mikrovýbrusu.

Z naměřených výsledků lze vyvodit pozitivní přínos v použití ochranné dusíkové atmosféry na roztékavost pájecí pasty a výslednou smáčivost pájených spojů.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo otestovat roztékavost vybrané bezolovnaté pájky na dvou vodivých površích keramického substrátu při různých koncentracích ochranné dusíkové atmosféry a následně je mezi sebou porovnat. V teoretické části jsou popsány bezolovnaté pájky a jejich složení, anorganické základní materiály, druhy testování pájených spojů, zkoušky smáčivosti a metody pájení přetavením. Dále byly teoreticky porovnány vlastnosti keramického substrátu a substrátu pro výrobu plošných spojů typu FR 4 v souvislosti s roztékavostí pájky. Bezolovnaté pájecí pasty jsou rozděleny do základních skupin podle použitých příměsí. Mezi základní pasty patří například Sn/Ag/Cu, Sn/Ag, Sn/Cu a Sn/Sb. Jednotlivé příměsi se přidávají v různých množstvích podle toho, jakých vlastností je požadováno dosáhnout. Každá nepatrná změna množství příměsí přispívá ke změně vlastností výsledné pájecí pasty. Důležitou složkou pájecí pasty při pájení přetavením je tavidlo, které zlepšuje výslednou kvalitu pájeného spoje. Pro testování roztékavosti a smáčivosti pájených spojů existuje řada různých druhů zkoušek. Například test roztékavosti, metoda smáčekových vah, zkouška pájecí lázni, metoda SSBA nebo SBSA. Problematika bezolovnatého pájení je stále aktuální, protože se neustále hledají nové možné ekonomické náhrady za levné olovnaté pájky. Důkazem je rostoucí počet článků a další literatury na toto téma.

V praktické části diplomové práce byl navrhnout testovací motiv pro testování roztékavosti bezolovnatých pájek. Motiv měl čtyři pájecí plochy k testování podle normy IPC – TM – 650 a pět menších o rozměru 3 x 3 mm. Podle motivu byly vyrobeny tlustovrstvou technologií testovací desky z keramického substrátu se dvěma typy vodivých povrchů – Ag a AgPd. Tloušťka vypálené vodivé vrstvy byla pro povrch typu AgPd 16 μm a pro povrch typu Ag 12 μm . Následně byla testována roztékavost vybrané bezolovnaté pájky pro různé koncentrace ochranné dusíkové atmosféry. Testování bylo prováděno měřením šířky a výšky roztečení pájecí pasty po natisknutí a po zapájení.

Pro testování byla vybrána bezolovnatá pájecí pasta SAC305 (Almit). Naměřené výsledky ukazují pozitivní vliv na růst roztečení pájecí pasty při použití ochranné dusíkové atmosféry. U malých bodů docházelo k vyššímu procentuálnímu roztečení pájecí pasty než u velkých. Tento vyšší nárůst byl způsobený nanášením stejné výšky pájecí pasty jako u velkých bodů. U testovacích bodů vznikl v závislosti na typu použité vodivé vrstvy prstenec pájky kolem přetaveného vrchlíku. Z důvodu vytváření různě širokého prstence v závislosti na typu použitého vodivého povrchu a použité koncentraci ochranné dusíkové atmosféry byla šířka testovacích bodů měřena s prstencem i bez prstence. Při porovnání roztékavosti bezolovnaté pájecí pasty SAC305 měřené s pájkovým prstencem byla vyšší roztékavost naměřena na vodivém povrchu složeného ze stříbra a paládia. U testovacích bodů, kde bylo měřeno pouze roztečení vrchlíku bez pájkového prstence, byla lepší roztékavost naměřena na vodivém povrchu složeného ze stříbra. Jako informativní hodnota byla u testovacích bodů měřena i šířka roztečení tavidla. Větší šířka roztečení tavidla byla pozorována u vodivého povrchu složeného ze stříbra a paládia.

Během testování byl pozorován zvláštní jev, při kterém nedochází při snižování koncentrace ochranné dusíkové atmosféry nejen ke zvětšení šířky roztečení pájecí pasty, ale také k současnemu nárůstu výšky přetavené pájky. Tento jev byl vysvětlen růstem krystalů, které byly pozorovány na přetaveném vrchlíku. Pro velké body byla pořízena fotodokumentace povrchu vrchlíků zachycující změny ve velikosti krystalů.

Diplomová práce předkládá experimentální výsledky testů roztékavosti bezolovnaté pájecí pasty SAC305 na dvou vodivých površích Ag a AgPd. Práce pokládá základ pro další výzkum vlastností jiných materiálových kombinací pájecí pasta – vodivý tlustovrstvý povrch při pájení v ochranné atmosféře. Dále je navrhováno provést důkladnější prozkoumání růstu krystalů v pájeném spoji v závislosti na koncentraci použité ochranné dusíkové atmosféry.

Použití ochranné atmosféry s sebou sice přináší zvýšené provozní a pořizovací náklady. Tyto náklady se ale vrátí z důvodu vytváření kvalitnějšího výrobku s méně defekty a vadnými spoji, které snižují náklady na opravy a zmetkové kusy. Použití ochranné dusíkové atmosféry má pozitivní vliv zejména na zvyšující se roztékavost a smáčivost přetavené pájecí pasty, jak ukazuje tato diplomová práce.

Použitá literatura

- [1] Starý, Jiří.; Kahle, Petr. Plošné spoje a povrchová montáž [online]. Skriptum. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=21618>.
- [2] Co je pájení [online]. [citováno 2013-11-03]. Dostupné z: <www.ped.muni.cz/wtech/elearning/PEL/Teorie_pajeni.doc>.
- [3] KELLER, J.; BAITHER, D.; Wilke, U. aj. Mechanical properties of Pb-free SnAg solder joints [online]. Vydáno: 5.2.2011, [citováno 2013-10-29]. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645411000188>>.
- [4] EUROPEAN COMMISSION. Restriction of the use of certain hazardous substances [online]. [citováno 2014-05-23]. Dostupné z: <http://ec.europa.eu/enterprise/policies/european-standards/harmonised-standards/restriction-of-hazardous-substances/index_en.htm>.
- [5] SZENDIUCH, Ivan. Problém přechodu na bezolovnaté pájky [online]. [citováno 2013-12-01]. Dostupné z: <<http://www.marpos.cz/leadfree.htm>>.
- [6] SZENDIUCH, Ivan. Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. 1.vyd. VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-3292-6.
- [7] ABEL, M.; CIMBUREK, V. Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi. 2005. ISBN 80-903597-0-1.
- [8] MIRIC, A. Z.; GRUSD, Angela. Lead – free alloys [online]. [citováno 2013-11-20]. Dostupné z: <http://tersted.home.xs4all.nl/PDF_files/Heraeus/AM_AG_PBFREE.pdf>.
- [9] SMT centrum. Srovnání pájecích slitin SAC a Sn100 [online]. Vydáno: 31.12.2009 [citováno 2013-11-10]. Dostupné z: <<http://www.smtcentrum.cz/vyber-pajecich-slitin/srovnani-pajecich-slitin-sac-a-sn100>>.
- [10] DRÁPALA, J. Bezolovnaté pájky : teoretické a experimentální studium fázových rovnováh a vlastností nových typů pájek. Ostrava, 2011. 220 s. ISBN 978-80-248-2495-6.
- [11] SZENDIUCH, Ivan. Montážní technologie – Povrchová montáž [online]. [citováno 2013-11-06]. Dostupné z: <<http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-08A-Mont%C3%A1%C5%BEn%C3%AD%20technologie%28Bc%29.pdf>>.
- [12] SZENDIUCH, Ivan. Technologie elektronických obvodů a systémů. VUTIUM, 2002. ISBN 80-214-2072-3.
- [13] STARÝ, J.; ZATLOUKAL, M.; STEJSKAL, P. Montážní a propojovací technologie [online]. Skriptum. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=30900>.
- [14] SKÁCEL, V.; FIEDLEROVÁ, J.; NEJEZCHLEB, K. Keramické materiály a jejich použití v elektrotechnice [online]. [citováno 2013-10-17]. Dostupné z: <<http://www.t-ceram.com/CSVTS-2006.pdf>>.

- [15] MACH, P.; SKOČIL, V.; URBÁNEK, J. Montáž v elektronice : pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Praha: ČVUT, 2001. 440 s. ISBN 80-01-02392-3.
- [16] ALMIT. Almit SRC Solder Paste LFM – 48 W TM – HP(L) [online]. [citováno 2014-04-14]. Dostupné z: http://www.almit.com/downloads/Specs/leadfree/spec_lfm48w%20tmhp.pdf.
- [17] BALVER ZINN. Cobar – OT2 – SN100C – T3/T4 [online]. [citováno 2014-03-11]. Dostupné z: www.balverzinn.com/solder-paste-cobar-ot2.html?file=tl_files/balverzinn/downloads/datenblaetter_en/Application%20Note%20COBAR-OT2-SN100C-T3%28T4%29.pdf.
- [18] ESL. ElectroScience Thick-Film Materials & Ceramic Tapes [online]. [citováno 2014-03-15]. Dostupné z: <http://www.electroscience.com/>.
- [19] SOPER, A.; POZZA, G.; IGNAT, M. aj. Mechanical response of solder joints in flip-chip type structures [online]. [citováno 2013-11-21]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271497001595>.
- [20] DUSEK, Miloš.; HUNT, Christopher. Crack detection methods for lead – free solder joints [online]. 3/2004, [citováno 2013-11-19]. Dostupné z: http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/matc164.pdf.
- [21] ČSN EN 62137 – 1 – 1. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 1: Zkouška odolnosti proti odtržení. 2008.
- [22] ČSN EN 62137 – 1 – 3. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 3: Zkouška cyklickým padáním. 2009.
- [23] ČSN EN 62137 – 1 – 4. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 4: Zkouška cyklickým ohybem. 2009.
- [24] ČSN EN 62137 – 1 – 5. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 5: Mechanická únavová zkouška smykem. 2009.
- [25] HARANT, P.; STEINER, F. Testování pájitelnosti metodou smáčecích vah [online]. [citováno 2014-03-08]. Dostupné z: <http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/PDF/Rocnik2007/cislo1/r0c1c8.pdf>.
- [26] KUČERA, L. Smáčení a roztékání roztavené pájky po kovovém povrchu [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D. [citováno 2014-03-16]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/6210/Lukas_Kucera.pdf?sequence=1.
- [27] SZENDIUCH, Ivan. Pájení a bezolovnaté pájky [online]. [citováno 2013-11-03]. Dostupné z: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>.
- [28] PELC, Miroslav. Výzkum spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

2011. 80 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc. [citováno 2013-10-14]. Dostupné z:
<https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40024>.
- [29] SZENDIUCH, I.; PÍCHA, J.; JANKOVSKÝ, J. aj. Pájení přetavením v elektrotechnice – fenomén doby. Brno, 2010. ISBN 978-80-214-4233-7.

Přílohy

Obsah přílohy

Příloha A: Fotodokumentace vrchlíků pro Ag vodivý povrch.....	61
Příloha B: Fotodokumentace vrchlíků pro AgPd vodivý povrch.....	63
Příloha C: EDX materiálová analýza.....	65

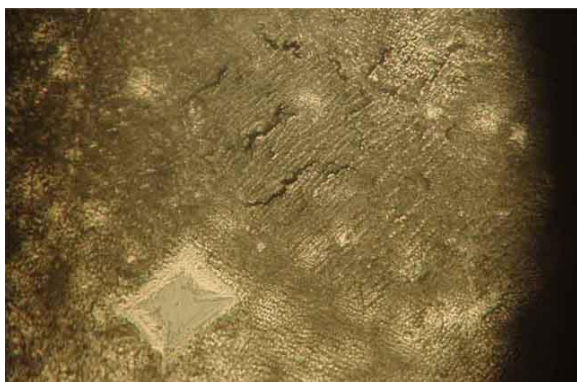
Příloha A: Fotodokumentace vrchlíků pro Ag vodivý povrch



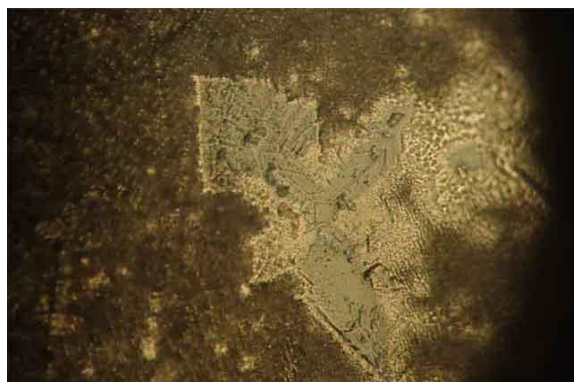
Obr. A.1: Vzduch, Ag povrch.



Obr. A.2: 5000 ppm, Ag povrch.



Obr. A.3: 2000 ppm, Ag povrch.



Obr. A.4: 1000 ppm, Ag povrch.



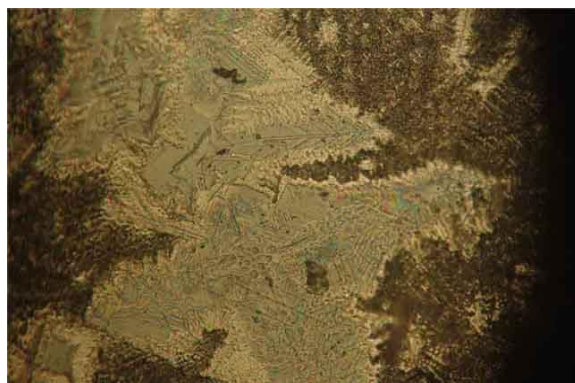
Obr. A.5: 500 ppm, Ag povrch.



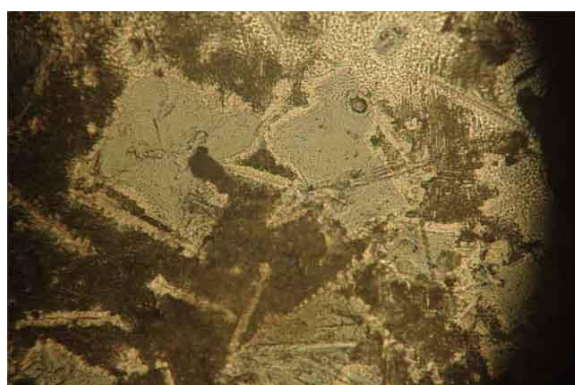
Obr. A.6: 200 ppm, Ag povrch.



Obr. A.7: 100 ppm, Ag povrch.



Obr. A.8: 50 ppm, Ag povrch.

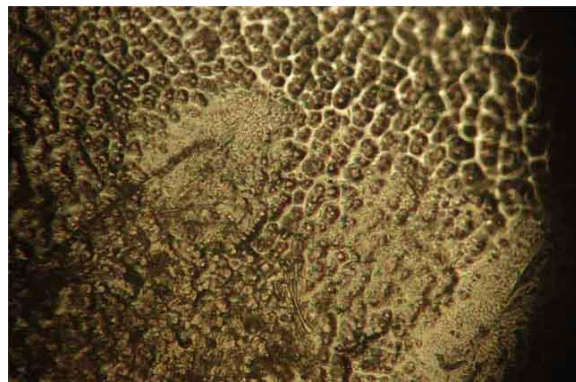


Obr. A.9: 20 ppm, Ag povrch.

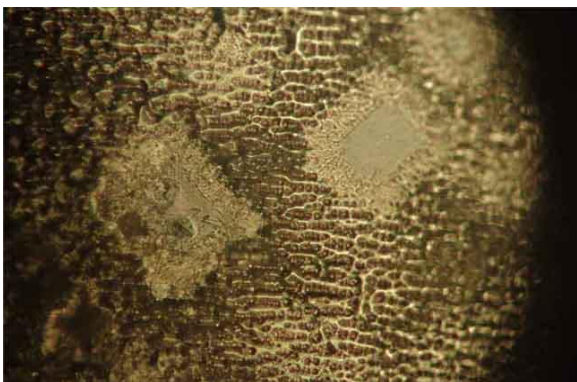
Příloha B: Fotodokumentace vrchlíků pro AgPd vodivý povrch



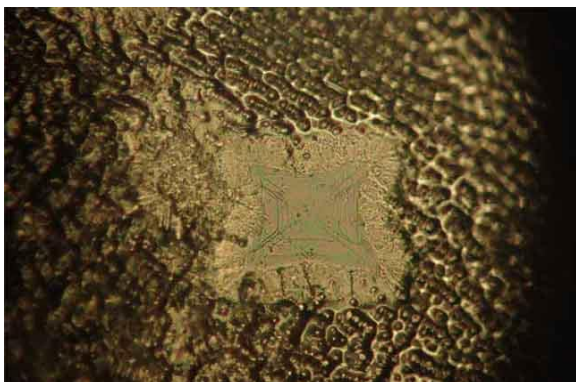
Obr. B.1: Vzduch, AgPd povrch.



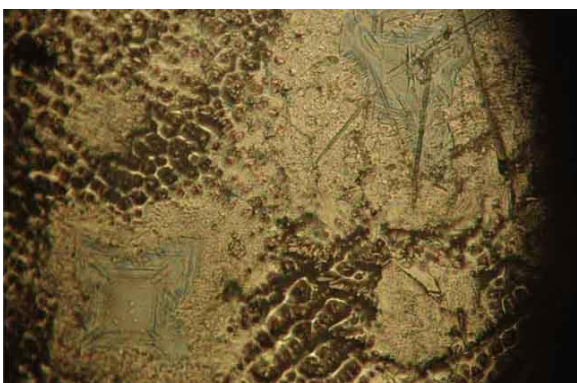
Obr. B.2: 5000 ppm, AgPd povrch.



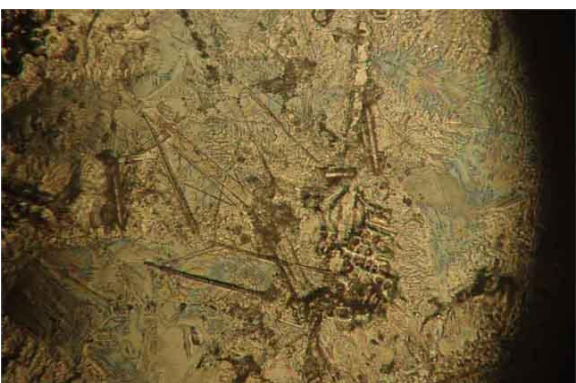
Obr. B.3: 2000 ppm, AgPd povrch.



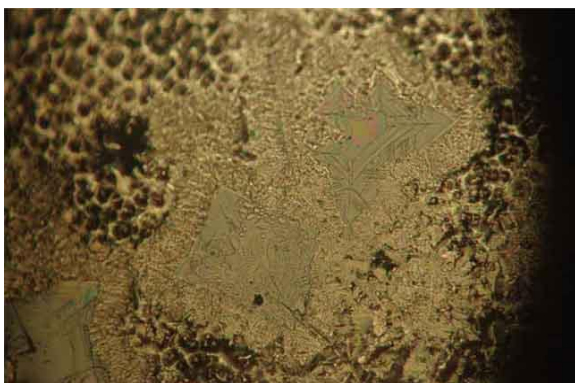
Obr. B.4: 1000 ppm, AgPd povrch.



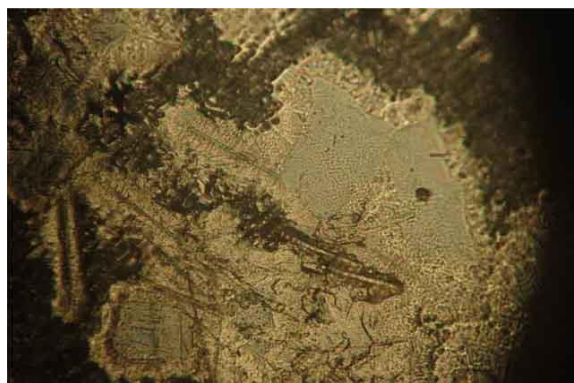
Obr. B.5: 500 ppm, AgPd povrch.



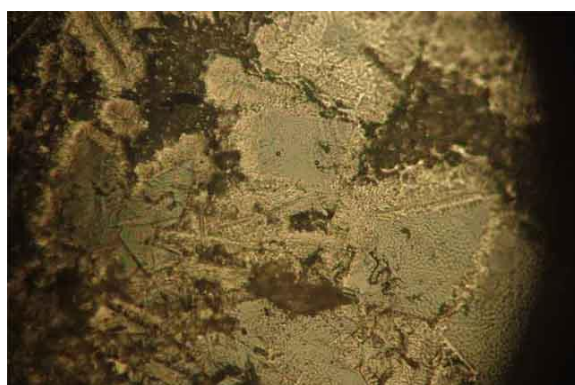
Obr. B.6: 200 ppm, AgPd povrch.



Obr. B.7: 100 ppm, AgPd povrch.

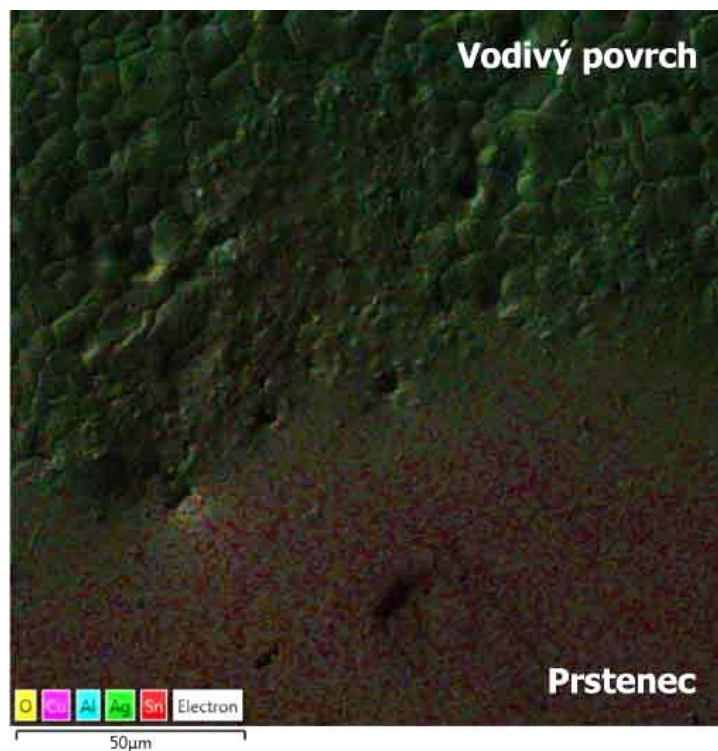


Obr. B.8: 50 ppm, AgPd povrch.

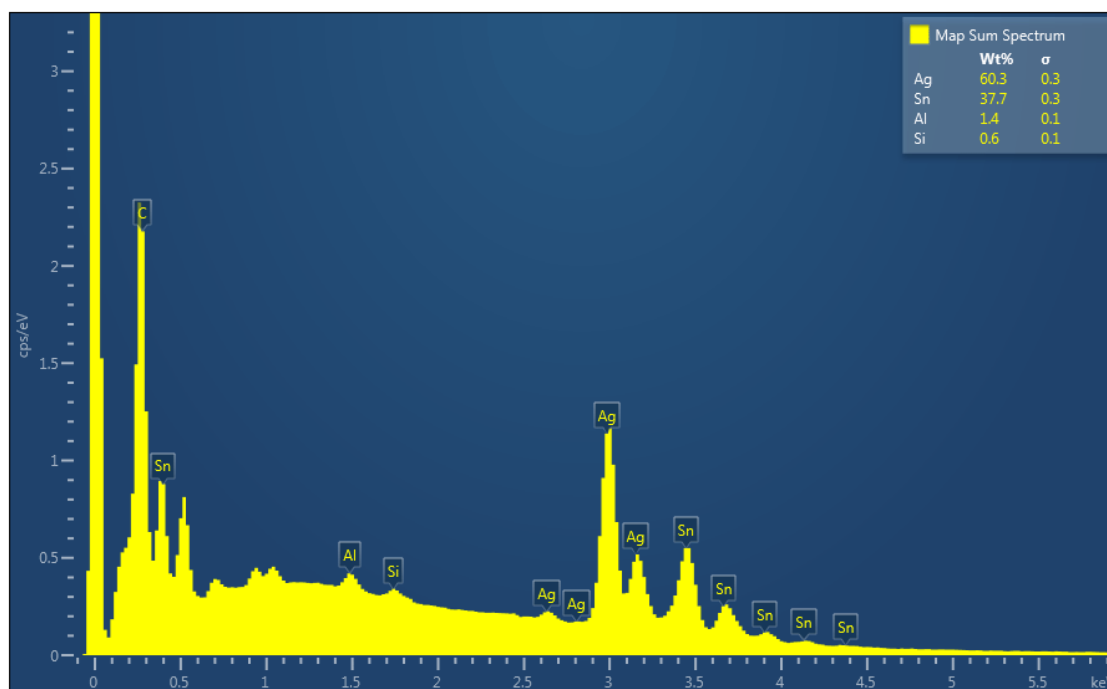


Obr. B.9: 20 ppm, AgPd povrch.

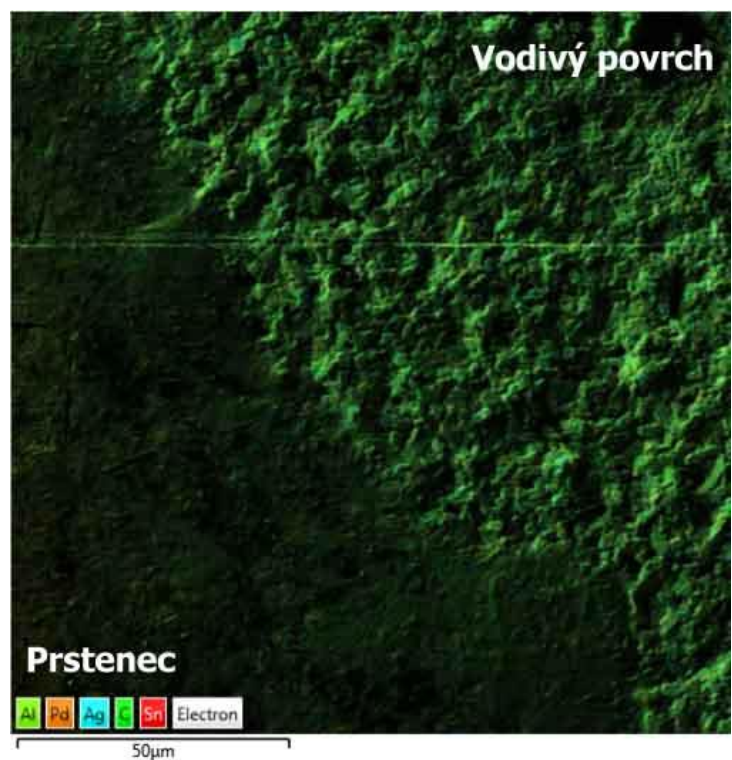
Příloha C: EDX materiálová analýza



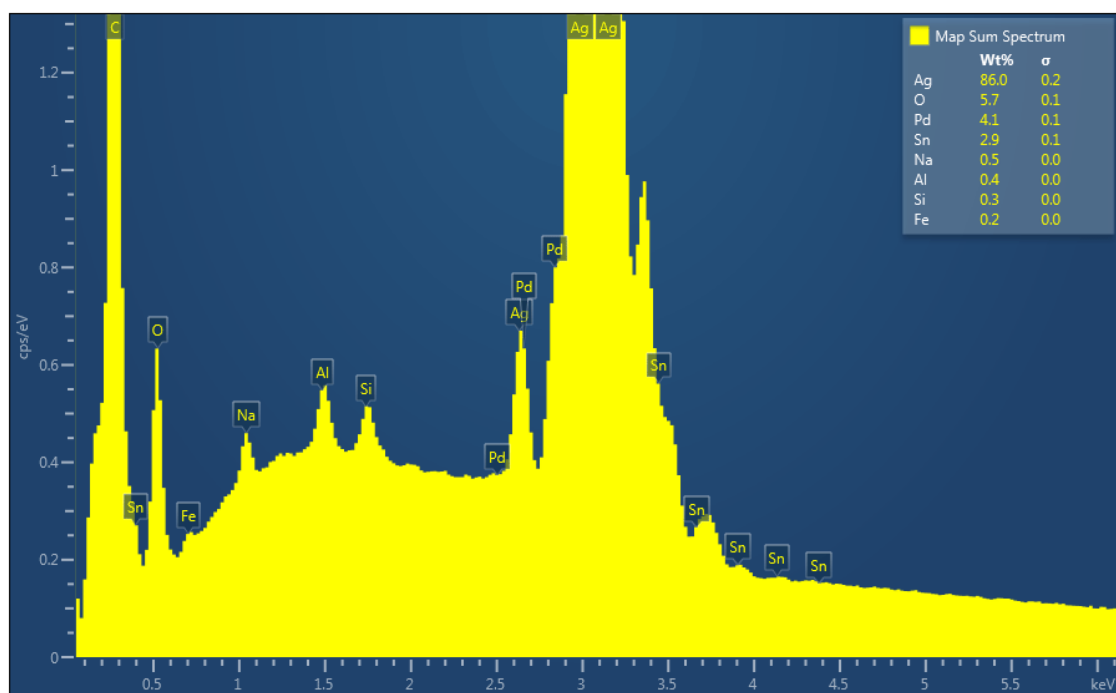
Obr. C.1: EDS, vodivý povrch Ag, SAC305.



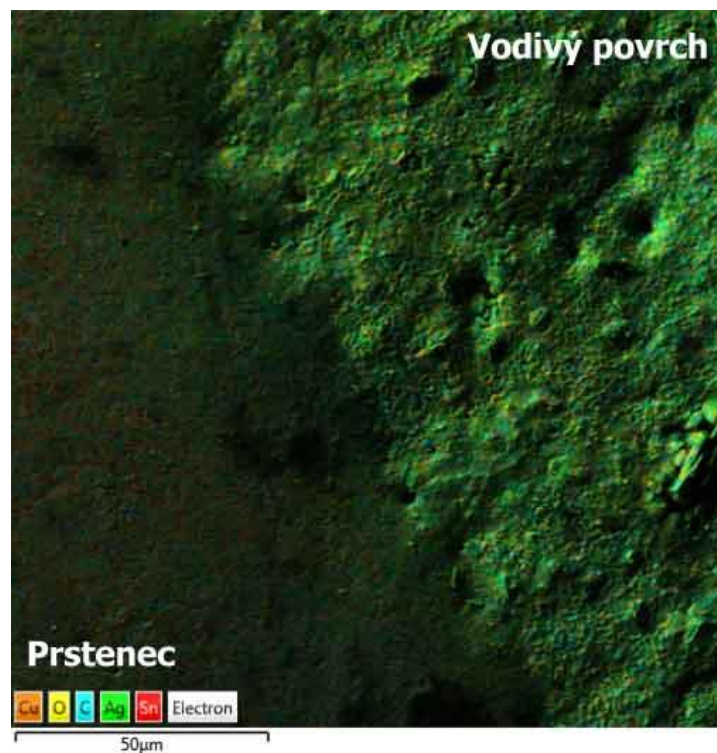
Obr. C.2: Materiálová analýza obr. C.1.



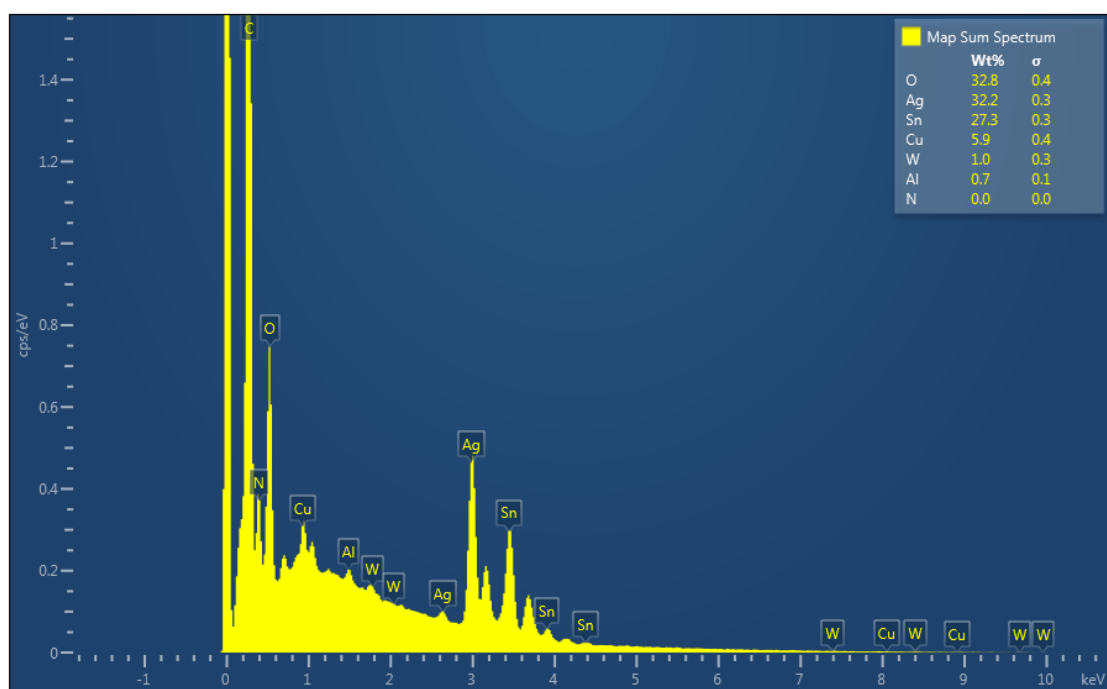
Obr. C.3: EDS, vodivý povrch AgPd, SAC305.



Obr. C.4: Materiálová analýza obr. C.3.



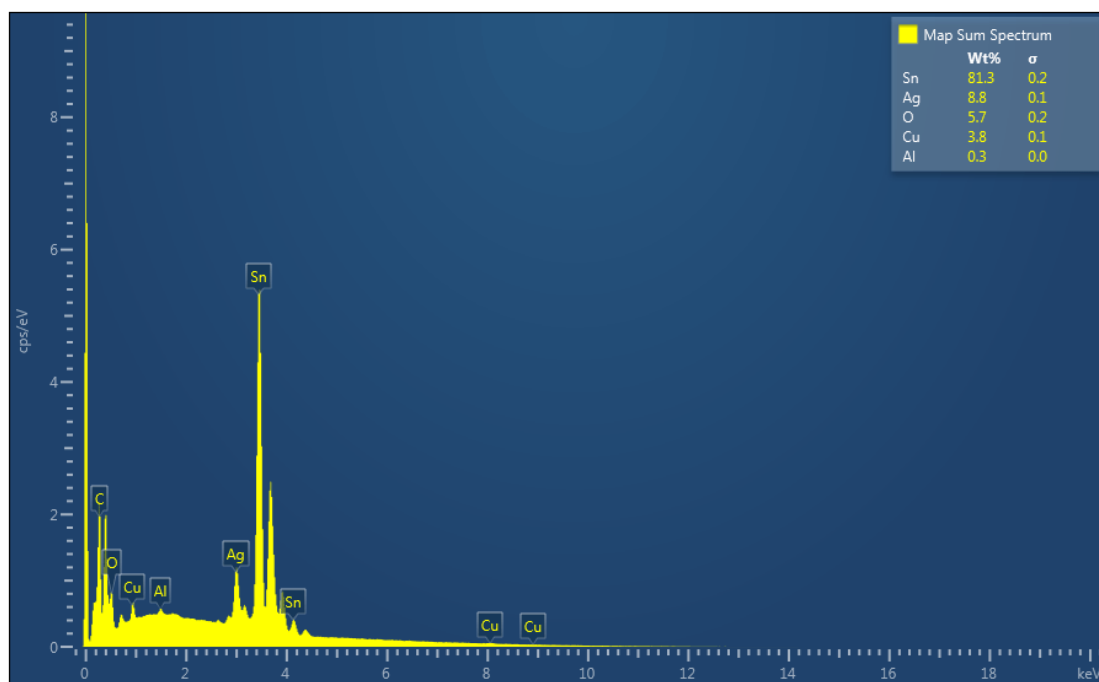
Obr. C.5: EDS, vodivý povrch Ag, SN100C.



Obr. C.6: Materiálová analýza obr. C.5.



Obr. C.7: EDS, vodivý povrch AgPd, SN100C.



Obr. C.8: Materiálová analýza obr. C.7.