



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

SNBI PÁJECÍ PASTA A VLIV REAKTIVNÍCH NANOČÁSTIC

SNBI SOLDER PASTE AND INFLUENCE OF REACTIVE NANOPARTICLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ivo Rychlý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO 2018



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Ivo Rychlý

ID: 136109

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

SnBi pájecí pasta a vliv reaktivních nanočástic

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte odbornou literaturu zabývající se vlivem nanočástic na vlastnosti SnBi pájecích past. Rešeršním způsobem vyhodnoťte vliv reaktivních nanočástic na smáčecí charakteristiky, pevnost pájeného spoje a formování intermetalické sloučeniny.

Proveďte základní testy s pájecí pastou SnBi včetně měření viskozity a teplotních změn viskozity.

Navrhňte vhodné typy reaktivních nanočástic a realizujte zkoušky vybraných vlastností pájecích past s nanočásticemi.

Na základě provedených testů vyberte vhodnou SnBi pájecí pastu s reaktivními nanočásticemi, pájecí pastu natiskněte, osadte rezistory a zapájejte doporučeným teplotním profilem. Proměřte pevnostní i elektrické charakteristiky pájených spojů a realizujte zkušební mikrovýbrusy.

Vyhodnoťte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 22.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

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.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Abstrakt

Tato práce se zabývá rešerší vlivu reaktivních nanočástic, především měděných a stříbrných, na vlastnosti bezolovnatých pájecích past. Popisuje základní zkoušky prováděné na pájecích pastách podle standardu IPC-TM-650. V praktické části práce se připravuje pájecí pasta SnBi a měří se její viskozita. Do SnBi pasty se přidávají různé koncentrace nanočástic slitiny stříbra a mědi. Na těchto pastách se provádějí zkoušky IPC a mechanické a odporové zkoušky na deskách plošných spojů a zjišťuje se, jak přidané nanočástice ovlivnily vlastnosti těchto pájecích past.

Klíčová slova

nanočástice, pájecí pasta, SnBi, IPC-TM, nanočástice, stříbro, měď, viskozita, zkoušky na DPS

Abstract

This work deals with effects of nanoparticles, mainly copper and silver, on properties of lead-free solder pastes. It describes basic tests done on solder pastes according to IPC-TM-650 standards. In practical section this work focuses on the preparation of Sn-Bi solder paste and the measuring of viscosity. After that different concentrations of silver copper alloy nanoparticles are added to the SnBi solder paste. These solder pastes are tested by the IPC standards and mechanical and resistive tests are done on printed circuit boards where the effects of mixed in nanoparticles are observed.

Keywords

nanoparticles, solder paste, SnBi, IPC-TM, nanoparticles, silver, copper, viscosity, tests on PCB

RYCHLÝ, I. *SnBi pájecí pasta a vliv reaktivních nanočástic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 76 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma SnBi pající pasta a vliv reaktivních nanočástic jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě NeVo GmbH za materiálovou a technickou pomoc. Na závěr bych chtěl poděkovat panu Ing. Pavlu Čudkovi, Ph.D. za strávený čas u elektronového mikroskopu.

V Brně dne

podpis autora

Obsah

Úvod	8
1. Teoretická část.....	9
1.1 Pájecí pasty.....	9
1.2 Nanočástice.....	12
1.2.1 Vliv nanočástic na pájecí pasty	12
1.2.2 Měděné (Cu) nanočástice	13
1.2.3 Stříbrné (Ag) nanočástice	16
1.2.4 Zhodnocení výsledků rešerše	17
1.3 Metodika zkoušek.....	18
1.3.1 Solder ball test	18
1.3.2 Test sedavosti (slump test)	19
1.3.3 Test smáčivosti (wetting test).....	20
1.4. Viskozita	21
2. Praktická část	24
2.1 Příprava pájecí pasty	24
2.2 Nanočástice a jejich vmíchávání	26
2.3 Měření viskozity.....	31
2.3.1 Měření viskozity pasty PF602-P.....	32
2.3.2 Vliv teploty na viskozitu	33
2.3.3 Vliv nanočástic na viskozitu.....	35
2.4 Teplotní profily	36
2.5 IPC testy	40
2.5.1 Cold slump test.....	40
2.5.2 Hot slump test.....	43
2.5.3 Solder ball test	43

2.5.4 Wetting test.....	48
2.6 Mikrovýbrus	51
2.6.1 Měření smáčecího úhlu.....	53
2.6.2 Prvková analýza.....	54
2.6.3 Měření intermetalické sloučeniny	60
2.7 DPS.....	62
2.7.1 Elektrické zkoušky	63
2.7.2 Mechanické zkoušky	64
3. Závěr.....	67
Literatura.....	70
Seznam obrázků	72
Seznam tabulek.....	75
Seznam symbolů a zkratk.....	76

Úvod

Výzkum v oblasti pájecích past je nyní velice aktivní. Díky stále se zvětšující poptávce po deskách plošných spojů a zmenšujícím se součástkám, jsou kladeny stále větší nároky na pájecí pasty. Většina problémů spojená s výrobou desek plošných spojů souvisí právě z pájecími pastami. Při výrobě desek je možné nesprávným výrobním procesem s pájecí pastou, zničit celé desky. Proto jsou pájecí pasty podrobovány mnohým výzkumům a testováním, jejichž cílem je zlepšit vlastnosti těchto past.

Vzhledem k novým zákonům o ochraně prostředí je používání olova nyní omezeno. Používání olovnatých pájek (např.: Sn63Pb37) se začíná omezovat a využívají se bezolovnaté pájky (např.: SAC a SnBi). Tyto pájecí pasty mají ve většině případů horší vlastnosti nebo složitější výrobní procesy. Díky rozvoji nanočástic se začal nyní provádět výzkum vlivu nanočástic na bezolovnaté pájky za účelem zlepšit jejich vlastnosti nejen při montáži desek plošných spojů, ale také funkční vlastnosti pájky na hotové desce.

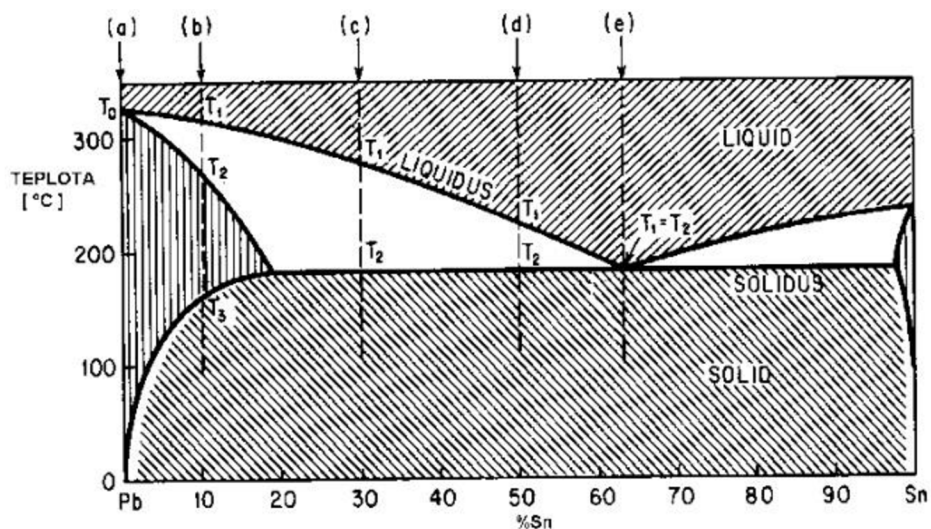
1. Teoretická část

1.1 Pájecí pasty

Pájecí pasty se používají při výrobě desek plošných spojů, kde propojují komponenty s deskou. Tyto pasty mají vysokou viskozitu, díky které se skvěle hodí na osazování desek. Do pasty jsou nasázeny komponenty, které díky lepivosti pasty drží na místě. Tento proces ulehčuje pájení spojů a také umožňuje rychlejší výrobu desek oproti používání pevných pájek. Deska je po přidání komponentů zahřata a pasta po fyzikálně chemickém procesu vytvoří pájený spoj. Během výroby je potřeba dodržovat stanovené množství pasty, správný proces pájení a také chlazení.

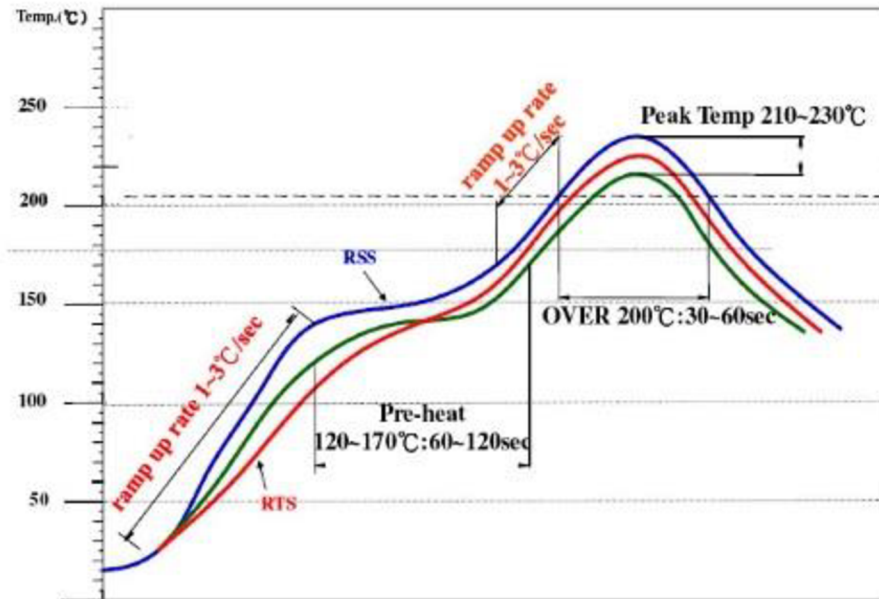
U pájek se rozlišují dva druhy a to olovnatá a bezolovnatá. Z názvu lze vyčíst podíl jednotlivých složek pájky. Každá pájka také používá jiné tavidlo (např.: ROL0 a ROL1) a má rozdílnou velikost částic pájky (velikosti od T1 do T6).

Velké oblibě při výrobě se dočkala pájka Sn-Pb, tedy olovnatá pájka. Nejčastěji se vyskytuje v poměru 60 % - 63 % Sn a 40 % - 37 % Pb. Tato pasta má nízkou teplotu tavení a to mezi 183 °C až 189 °C, což znamená, že neklade tak velké nároky na tepelné vlastnosti zbytku desky a komponentů. Tato pasta také velice rychle chladne a nevytváří velká zrna nebo jiné nedostatky způsobené při ochlazování.



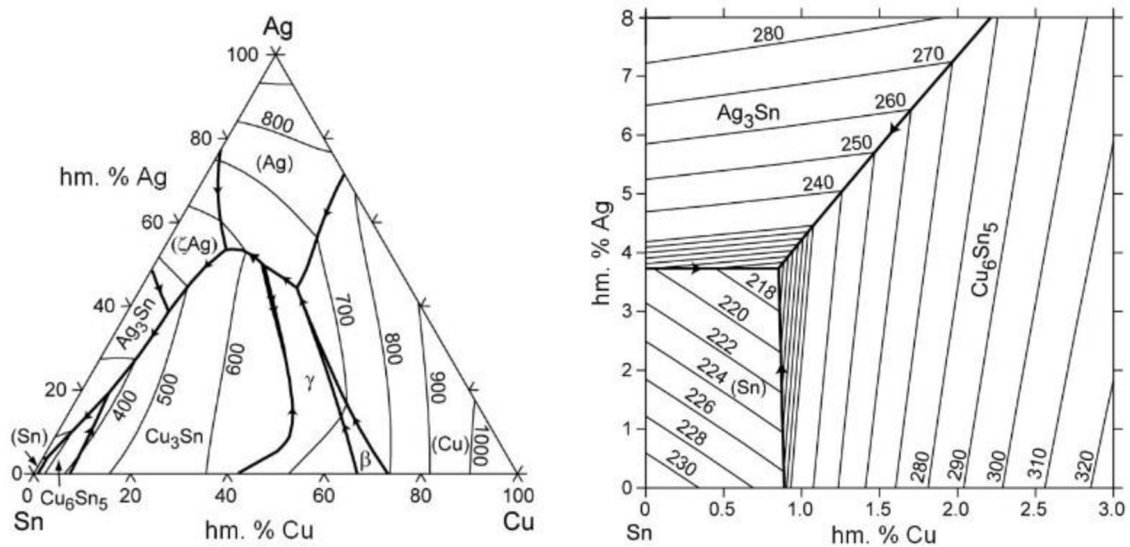
Obrázek 1: Fázový diagram Sn-Pb [1]

Obrázek 1 ukazuje fázový diagram olovnaté pájky Sn-Pb a obrázek 2 poté doporučený reflow profil pasty Sn63-Pb37.



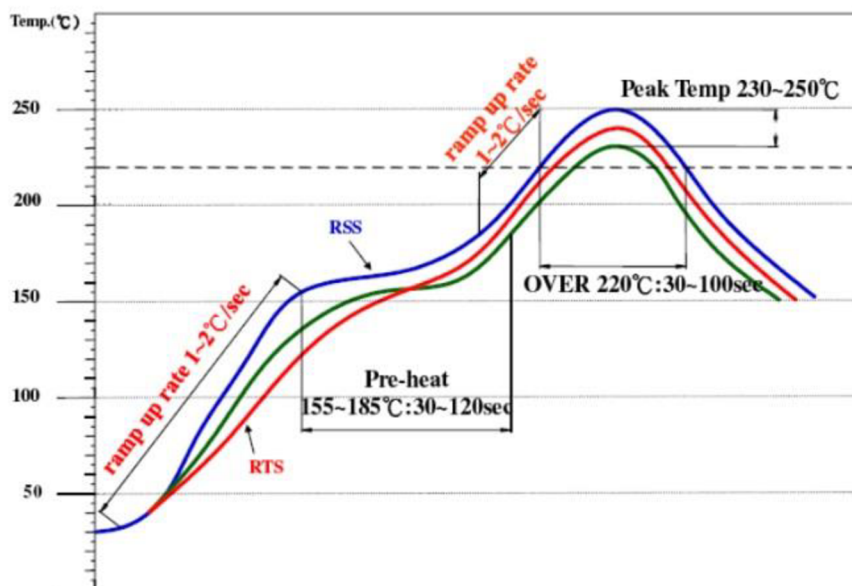
Obrázek 2: Doporučený reflow profil pasty Sn63-Pb37 [2]

Bezolovnaté pájky vznikly na popud ekologických problémů. Tyto pájky mají větší obsah cínu a většinou vyžadují vyšší teploty k pájení (viz. obrázek 3 a 4). Nejpoužívanější bezolovnatá pájecí pasta je SAC. Jedná se o složeninu Sn, Ag a Cu, která má teplotu tavení mezi 217 °C až 219 °C. Využívána je hlavně díky své spolehlivosti a velice podobným vlastnostem s pájkou Sn-Pb.



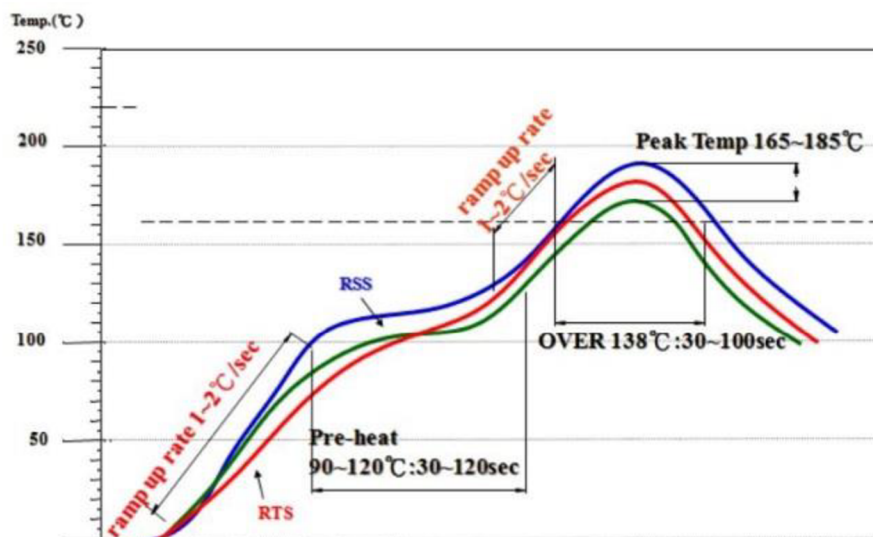
Obrázek 3: Ternární diagram SAC [1]

Z dostupných doporučených profilů pro tavení reflow jsou názorné rozdílné potřebné tavící teploty.



Obrázek 4: Doporučený reflow profil pasty SAC-305 [2]

V praktické části této práce se bude pracovat s bezolovnatou pájecí pastou Sn42-Bi58. Tato pasta vyniká hlavně nízkým bodem tavení na teplotě 139 °C (viz. obrázek 5). Námí používaná pasta bude od firmy Nevo-solder a jedná se o pastu PF602-P30-T3. Tedy o Sn42-Bi58 s tavidlem ROL0 a velikostí částic T3 (20 μm – 45 μm).



Obrázek 5: Doporučený reflow profil pasty SnBi [2]

Tato pájecí pasta se vyznačuje velkou pevností a křehkostí. Je náchylná na vznik poškození, na ztrátu mechanických vlastností při stárnutí a díky křehkosti Sn-Bi kuliček má špatnou mechanickou odolnost. Tato pájecí pasta nachází využití především v aplikacích, které vyžadují nižší teploty tavení.

1.2 Nanočástice

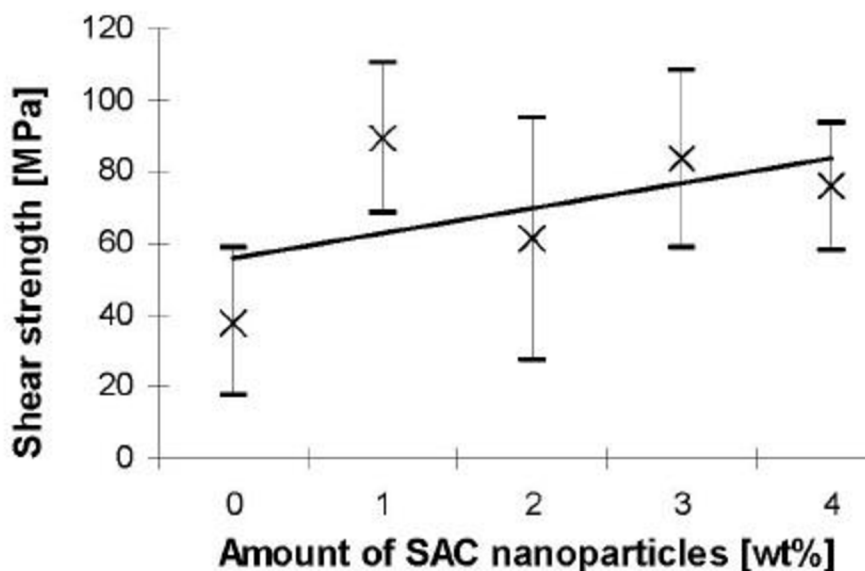
Nanočástice jsou částice, které se pohybují ve velikostech od 1 nm do 100 nm. Výzkum nanočástic je v boomu a využívají se nyní ve všech možných aplikacích. Nanočástice mají odlišné fyzikální i chemické vlastnosti díky mnohem většímu poměru plochy částic k hmotnosti. Nanočástice se vyskytují v různých formách. Může jít o jednotlivé částice nebo například trubičky. Nanočástice také mohou být vyrobeny nejen z jednotlivých prvků, ale například i z oxidů. Nanočástice se mohou vyrábět dvěma způsoby. Prvním způsobem je výroba z velkých celků (například mechanickým mletím) a druhým způsobem je skládání atom po atomu na požadovanou velikost (například metodou sol-gel).

V praktické části této práce se bude pracovat s reaktivními, neboli metalickými nanočásticemi. Nanočástice se dají objednávat například na internetových stránkách firmy Sigma-aldrich, která se zabývá jejich výrobou. Objednávat se dají ve formě prášku částic, trubiček nebo lanek. Může se jednat o jednotlivé prvky nebo o různé sloučeniny a oxidy. Některé nanočástice mohou být také v různých disperzích pro jednodušší vmíchávání částic a práci s nimi. Pro naše potřeby zkoušek nanočástic v pájecích pastách je nejvhodnější volit nanočástice v práškové podobě. Tyto nanočástice se dají koupit v různém množství s různými velikostmi částic a rozdílnými čistotami prášku. Množství nanočástic v balení se odvíjí od jejich ceny. Čím dražší dané částice jsou, tím menší mají dostupné balení. Balení nanočástic mědi se pohybují v rozmezí od 5 g do 100 g s čistotou od 99 % po 99,999%. Rozdíl ceny u velikosti balení 10 gramů mezi nanočásticemi Cu o kvalitě 99,5% a 99,999% je kolem šesti tisíc korun. Pro naše potřeby budou nejzajímavější Cu nanočástice právě o čistotě 99,5 % a velikostí nanočástic 40 nm – 60 nm. Cena těchto nanočástic se pohybuje okolo 1350 Kč za 5 gramů.

1.2.1 Vliv nanočástic na pájecí pasty

V oblasti pájecích past a reaktivních nanočástic jsou nejčastěji používané nanočástice mědi (Cu), stříbra (Ag), niklu (Ni), kobaltu (Co), molybdenu (Mo), zinku (Zn) a nebo jejich různých sloučenin a oxidů. Vliv nanočástic na pájecí pastu je ovlivněn nejen jejich typem, ale také velikostí a množstvím nanočástic v pastě. Vliv nanočástic na některé vlastnosti pájecí pasty se dá odvodit pomocí vyzkoušených matematických vzorců. Čím je velikost nanočástic menší, tím pozitivnější by měli mít na pájecí pastu vliv. Se snižující se velikostí nanočástic by se teoreticky měla snižovat teplota tavení, zvětšovat mechanická pevnost, zlepšovat mikrostruktura, měnit tloušťka intermetalické vrstvy, roztékavost a další. Během pájecího procesu nanočástice v pastě chemicky reagují a malá část nanočástic prostupuje pastou na její povrch. Množství nanočástic, které se v pájecí pastě takto pohybuje, ovlivňuje její finální vlastnosti. Tyto částice při vystupování ven narušují vazby v samotné pájecí pastě a poškozují ji.

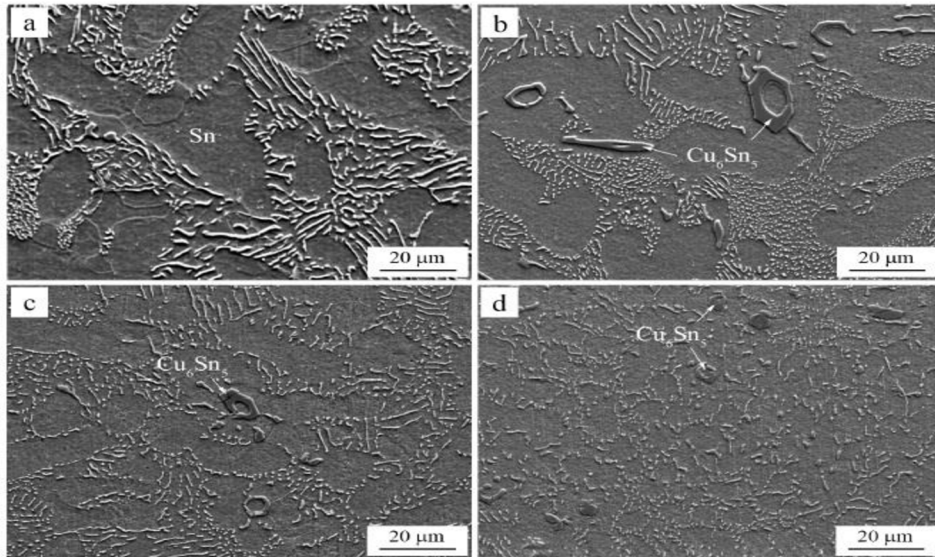
Na obrázku číslo 6 je ukázán vliv SAC nanočástic v pastě Sn-Bi57. Jedná se o test stříhem provedený v literatuře [3] a je patrné, že se zvedajícím se počtem nanočástic v pastě, se mění její pevnost. Jedním ze zajímavých úkazů, jenž se vyskytuje velice často je, že více nanočástic nutně neznamená lepší výsledky. I přesto, že je patrné že nanočástice zvyšují pevnost pájecí pasty, tak také velice záleží na jejich množství v pastě. Každá pasta a každá částice má jiné optimální množství zastoupení a je důležité najít ideální podíl pro získání nejlepších výsledků.



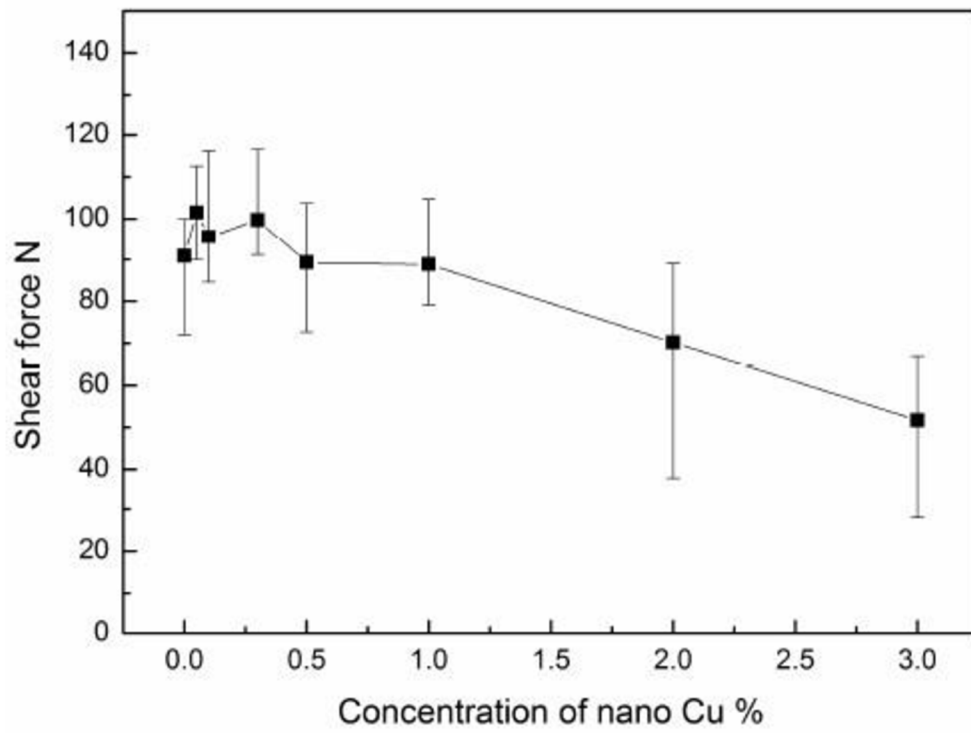
Obrázek 6: Vliv množství nanočástic SAC na pevnost ve stříhu pasty Sn-Bi [3]

1.2.2 Měděné (Cu) nanočástice

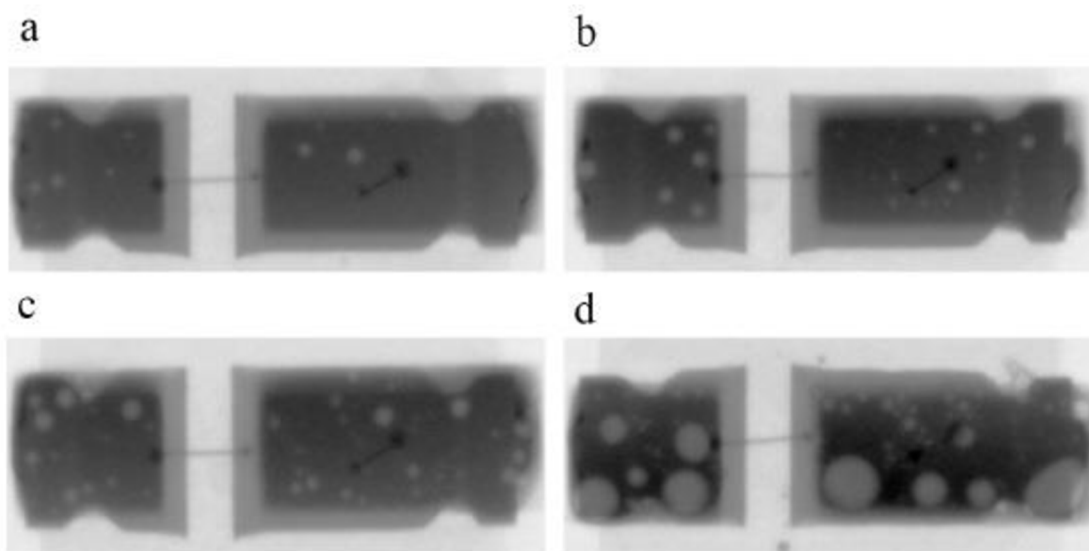
Na vliv měděných (Cu) nanočástic na pájecí pasty se zabývá článek [4]. V tomto článku byla použita pájecí pasta SAC 305 s obsahem 0 % až 3 % Cu nanočástic o velikosti částic 25 μm až 45 μm (obrázek 7). Na této pastě byly prováděny testy pevnosti ve stříhu. Z testů vycházelo, že optimální množství nanočástic pro tuto pastu bylo pod 1 % (obrázek 8). Při této hodnotě se zvyšovala mechanická odolnost pasty. Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo při obsahu nanočástic 0,05 % až 0,3 % a to okolo 100 N. Pro větší obsahy částic se maximální hodnota pevnosti snižovala. To bylo způsobeno vznikem bublin a poruch uvnitř spoje způsobené větším množstvím nanočástic (obrázek 9).



Obrázek 7: Nanočástice Cu v pájce SAC – SEM [4]

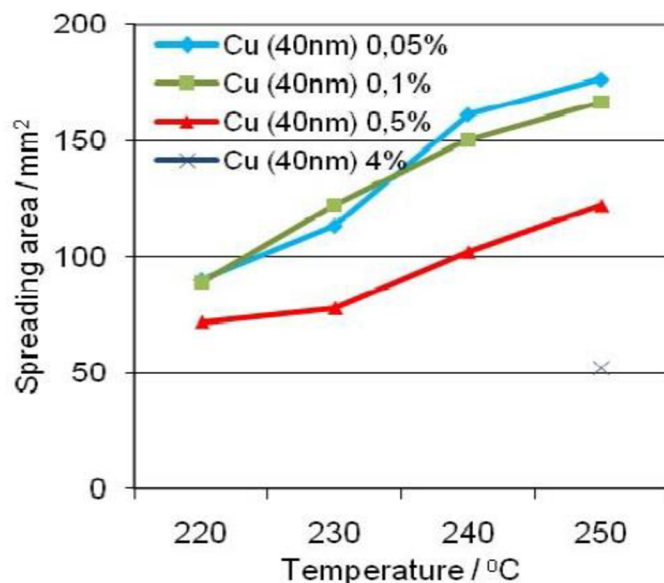


Obrázek 8: Velikost sřižné síly v závislosti na počtu nanočástic [4]



Obrázek 9: Vliv množství nanočástic na kvalitu spoje
(a) SAC305 (b) SAC305+0,5%Cu (c) SAC305+1%Cu (d) SAC305+3%Cu [4]

V dalším článku [5] byla použita pájecí pasta SAC 305 s obsahem 0,05 % až 4 % Cu nanočástic o velikosti částice 20 μm až 40 μm . Na těchto pájecích pastách byl proveden test roztékání při různých teplotách přetavení (obrázek 10).

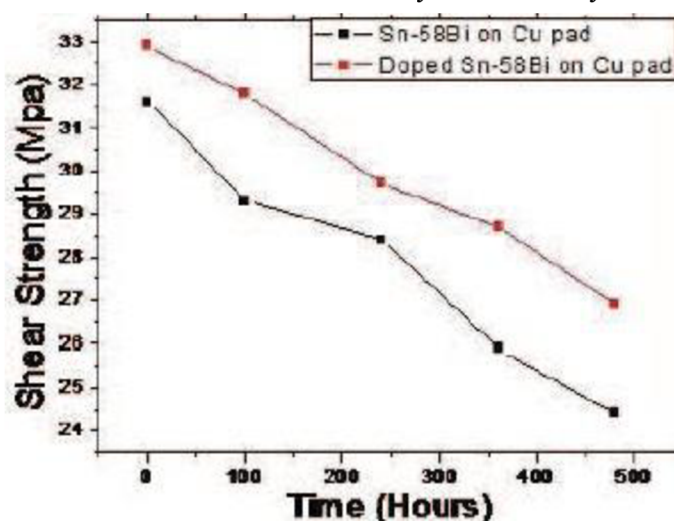


Obrázek 10: Vliv teploty a množství nanočástic na plochu roztékání [5]

Z obrázku 10 je patrné, že velice záleží na množství nanočástic v pastě. Nejlepších výsledků roztékání bylo dosaženo při obsahu 0,05 % a 0,1 % nanočástic. Množství 0,5 % a 4 % skončily špatně nejen v testu roztékání, ale také v solder ball testu, ve kterém měly negativní výsledky. Se zvyšujícím se množstvím nanočástic v pastě se také zvětšovala tloušťka intermetalické vrstvy.

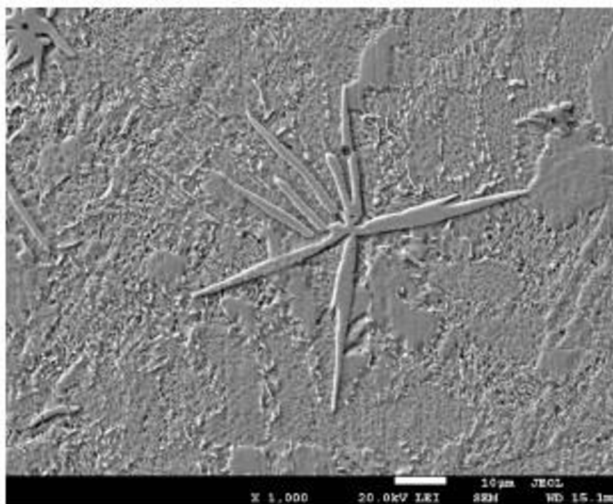
1.2.3 Stříbrné (Ag) nanočástice

Článek [6] se zabývá vlivem stříbrných (Ag) nanočástic na pájecí pasty. V tomto článku se zkoušel vliv stříbrných nanočástic na pastu Sn-Bi57. Stříbrné nanočástice byly stejně jako v naší praktické části do pasty přimíchány mechanicky, jejich velikost ovšem nebyla zmíněna. Byly provedeny zkoušky na migraci elektronů a velikost střížné síly. Tyto testy probíhaly při zatěžování spojů na měděné desce stejnosměrným proudem 2,5 A a při teplotě 75 °C. Testy také probíhaly pro různé doby stárnutí. Z výsledků bylo patrné, že pasta s 2 % obsahem Ag nanočástic měla nižší hodnoty migrace atomů bismutu. Nižší hodnota byla zapříčiněna vytvořením Ag-Sn částic v intermetalické vrstvě, což zabraňovalo této migraci. Přítomnost nanočástic také pozitivně ovlivnila maximální sílu testu ve stříhu. Test stříhu byl proveden s obyčejnou pastou Sn-Bi57 a s pastou Sn-Bi57 s 2 % obsahem nanočástic stříbra na měděné desce. Test byl proveden jak na nestárnutých deskách, tak také na deskách, které procházely testováním. Na obrázku číslo 11 je zobrazen vliv těchto testů na naměřené hodnoty velikosti síly ve stříhu.



Obrázek 11: Rozdíl maximální síly stříhu mezi obyčejnou Sn-Bi pastou a Sn-Bi pastou s 2 %wt Ag [6]

Další článek [7] se zabýval nanočásticemi stříbra a jejich vlivem na roztékavost pasty SAC305. Byly použity nanočástice stříbra získané chemickou redukcí z vodního roztoku AgNO_3 . Průměrná velikost získaných nanočástic byla 138 nm, 21 nm a 9,6 nm. S rostoucím podílem nanočástic v pastě (1-4% obsahu) a se snižující se velikostí nanočástic se zlepšovala roztékavost. Nejlepších výsledků bylo dosaženo s obsahem 4 % nanočástic Ag v pastě a velikostí částic 9.6 nm. Tyto nanočástice také měnily mikrostrukturu spoje a nanočástice vytvářely sloučeniny Ag_3Sn (viz. obrázek 12) a vytvářely ve spoji hvězdicové útvary. Čím menší byly použity částice tím větší a častější tyto struktury byly.



Obrázek 12: Mikrostruktura Ag_3Sn vytvořená ve spoji při 4 % obsahu 21 nm nanočástic v pastě [7]

1.2.4 Zhodnocení výsledků rešerše

Ze článků a testů provedených na toto téma je patrné, že velice záleží nejen na velikosti použitých nanočástic, ale také na jejich množství v pájecí pastě. V každém testu měl každý prvek rozdílné specifické kombinace množství a velikostí, ve kterých podával nejlepší výsledky. Různé množství nanočástic také ovlivňuje každé zkoušené parametry jinak. Pro některé vlastnosti pasty a použité nanočástice je lepší nižší počet nanočástic (např.: SAC nanočástice v Sn-Bi a jejich vliv na sílu ve stříhu), zatímco pro jiné (např.: Ag nanočástice v pastě SAC a jejich vliv na sílu ve stříhu a roztékavost) je lepší množství větší. Dá se říci, že pro nanočástice mědi (Cu) je optimální objem nanočástic v pastě do 1 %. Zatímco pro stříbro (Ag) i testy se 4 % objemem nanočástic v pastě dosahovaly lepších výsledků.

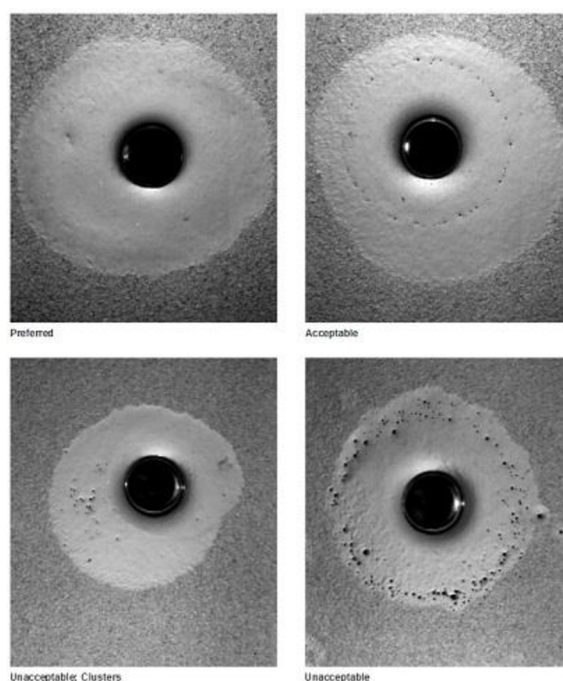
Při zpracování praktické části projektu bude tedy nutné vyzkoušet, co největší počet vzorků každý obsahující různé množství nanočástic v pájecí pastě.

1.3 Metodika zkoušek

Na testování pájecích past existuje velké množství různých zkoušek a postupů. Obchodní sdružení IPC – Association Connecting Electronics Industries vydává světově uznávané standardy v oblasti výroby a testování desek plošných spojů. Jeden z těchto standardů, konkrétně IPC-TM-650, se zabývá testováním pájecích past. Z tohoto standardu byly převzaty zkoušky sedavosti, smáčivosti a solder ball test. Většina testů se provádí na měděných (např.: se základním materiálem FR4) nebo keramických deskách. Veškeré pomůcky a desky, které přijdou během testu do kontaktu s pájecí pastou, musí být řádně vyčištěny daným postupem, aby se vyhnulo případné kontaminaci vzorku. Na čištění se obvykle používá isopropylalkohol.

1.3.1 Solder ball test

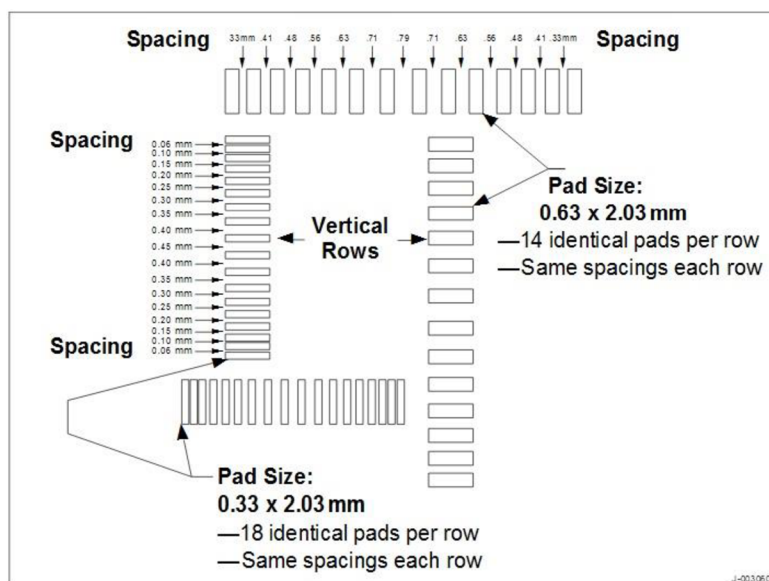
Tato zkouška se provádí podle standardu IPC-TM-650, zkouška 2.4.43 [8]. Tímto testem se zjišťují schopnosti pájecí pasty během procesu pájení reflow vytvářet kuličky pájky na nesmáčivém povrchu. Test se provádí na keramické nebo FR4 destičce plošných spojů o tloušťce 0,6 mm až 0,8 mm. Na tuto desku je nanášena vrstva pasty skrze šablonu s tloušťkou 0,1 mm, která má minimálně tři kulaté otvory o průměru 1,5 mm. Test se provádí buď v pájecí lázni nebo na vyhřáté desce. Po přetavení pasty se vytvořené kuličky zkoumají pod mikroskopem. Kuličky by poté měly vypadat jako na obrázku 13, kde vrchní dva vzorky jsou podle normy povolené výsledky a spodní dva nikoliv.



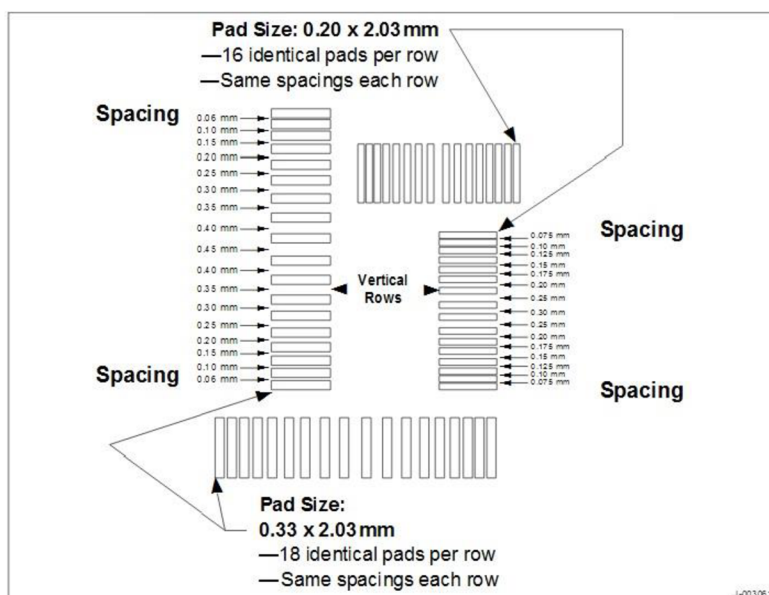
Obrázek 13: Možné výsledky solder ball testu [8]

1.3.2 Test sedavosti (slump test)

Tato zkouška se provádí podle standardu IPC-TM-650, zkouška 2.4.35 [8]. Při této zkoušce se určuje vertikální a horizontální roztékání pasty a provádí se na měděné destičce. Využívá se dvou šablon (viz. obrázek 14 a 15) s danými otvory, přes které se tiskne pasta na destičku. Vzniknou tedy dvě desky s natištěnými vzory. Tento test se provádí ve dvou podobách. První je test sedavosti za studena (cold slump test), jenž se provádí při pokojové teplotě (25 °C +/- 5 °C) a druhý test sedavosti za tepla (hot slump test), který se provádí při teplotách 150 °C +/- 10 °C. Destičky jsou těmto teplotám vystaveny po dobu 10 až 15 minut. Výsledky jsou poté zadány do připravených tabulek, ze kterých se zjišťují výsledky testu.



Obrázek 14: Destička č.1 na slump test [8]



Obrázek 15: Destička č.2 na slump test [8]

1.3.3 Test smáčivosti (wetting test)

Tato zkouška se provádí podle standardu IPC-TM-650, zkouška 2.4.45 [8]. Jedná se o zkoušku, při které se sleduje smáčivost pasty na měděném povrchu, vytváření nedokonalostí na rozteklé pájce a její hladkost. Při testu se používá měděná deska o rozměrech 7,6 x 2,5 x 0,08 cm. Tento test se poté také provádí skrze speciální šablonu s minimálně třemi kruhovými otvory. Výsledky jsou pozorovány pod mikroskopem, kde by pájka měla rovnoměrně smáčet měděný povrch. Neměly by se také na vzorku objevovat zbytky pájky v okolí vytvořených vrchlíků.

1.4. Viskozita

Měření viskozity je součástí vědeckého oboru reologie, který se zabývá mechanikou spojitého prostředí. Viskozita se dá označit jako odpor kapaliny vůči ponořeným předmětům a odpor mezi jednotlivými vrstvami kapaliny. Jedná se o měření vnitřního odporu kapaliny téct. Hlavní dva typy viskozity jsou dynamická a kinematičká viskozita.

Dynamická viskozita je označována symbolem η (eta) a jedná se o poměr stříhové síly ke gradientu rychlosti:

$$\eta = \frac{F}{A} / \frac{dv_x}{dz} \quad (1)$$

Častěji se ovšem využívá rovnice odvozené z Newtonova zákona.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \left(\frac{N}{m^2} \right) \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{v}{h} \quad \left(\frac{m}{m \cdot s} \right) \quad (3)$$

$$\tau = \eta * \gamma \quad (4)$$

Z této výsledné rovnice můžeme odvodit vztah pro viskozitu

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (Pa * s) \quad (5)$$

Základní jednotkou je pascal sekunda. Pro většinu kapalin je ovšem tato hodnota příliš velká a používá se spíše milipascal sekunda (mPa*s). Další jednotkou používanou pro udání viskozity je jednotka poise (P) pojmenované po francouzském fyzikovi Jean Poiseuille. Deset poise (10 P) je rovno jedné pascal sekundě (1 Pa*s). Tato jednotka je také pro většinu kapalin velká a využívá se tedy centipoise (cP), kde 1 cP odpovídá 1 mPa*s.

Kinematičká viskozita označovaná písmenem ν (nu) je poměr viskozity kapaliny k její hustotě. Tedy chování toku kapaliny pod vlivem gravitace.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad \left(\frac{m^2}{s} \right) \quad (6)$$

SI jednotkou pro kinematičkou viskozitu je metr čtvereční za sekundu (m^2/s). Tato jednotka je ovšem opět příliš velká pro většinu kapalin a využívá se spíše centimetr čtvereční za sekundu (cm^2/s), kterému se říká stoke (St). Konverze je tedy jednoduchá:

$$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2/s$$

$$10\,000 \text{ St} = 1 \text{ m}^2/s$$

I zde se využívá předpona centi, tedy centistoke (cSt) jenž je rovný $1 \text{ mm}^2/s$.

Viskozita je ovlivněna teplotou kapaliny a tlakem, kterému je vystavena. Důležitějším faktorem je ovšem teplota kapaliny. Se zvyšující se teplotou se snižuje viskozita a se snižující se teplotou, se viskozita zvyšuje. Při udávání viskozity kapaliny je důležité vždy uvést teplotu, při které byla viskozita naměřena. Změna teploty vždy

změní viskozitu kapaliny, velikost změny je poté závislá na složení dané kapaliny. U pájecích past (záleží na složení) je viskozita velice závislá na teplotě a změna teploty o 1 °C může znamenat změnu viskozity až o několik procent.

V oblasti pájecích past se sledují reologické vlastnosti, které mají vliv na tisk pasty a její chování při tavení. Sleduje se tedy jak pasta mění vlastnosti při změnách teploty, tlaku, způsobu tisku atd. Tím nejdůležitějším reologickým faktorem u pájecích past je dynamická viskozita. Viskozita se u pájecích past mění jak s teplotou, tak i s tlakem. Viskozitu u pájecích past ovlivňuje mnoho faktorů a ani dvě stejné pasty vyrobené stejným postupem většinou nedosahují stejných hodnot. Hlavním ovlivňujícím faktorem je, o jaký druh pasty se jedná a jaké jsou její hlavní složky. Rozdílnou viskozitu mají jak olovnaté a bezolovnaté pasty, tak také jednotlivé pasty ve svých kategoriích. Mnohem vyšších hodnot viskozity dosahuje pájecí pasta SAC oproti pastě SnBi.

Při měření viskozity pájecích past se využívá rotačního Searle principu měření. Ve většině viskozimetrů je využíváno rotačního Searle principu pojmenované po G. F. C. Searle. Jedná se o metodu, při níž je nádoba stacionární a motor pohání lopatku ponořenou do nádoby. Měření se provádí při určitých konstantních otáčkách (záleží na viskozimetru atd.) a hodnoty viskozity se získávají ze síly která je potřeba k otáčení lopatky. Je žádoucí při měření viskozity mít co nejmenší počet otáček, aby se zabránilo vzniku vírů a turbulencí v kapalině. Tato metoda je velice vhodná pro kapaliny, jenž dosahují vysokých hodnot viskozity.

Měření viskozity za různých teplot až do standardní teploty 24,8 °C při které se provádí standardizované testy viskozity pájecích past bylo provedeno v článku [9]. Podle očekávání na pájecí pastě Sn96.5Ag3Cu0.5 a Sn95.5Ag4Cu0.5 bylo potvrzeno, že viskozita se se zvyšující teplotou snižuje.

Tabulka 1: Naměřené hodnoty vlivu teploty na viskozitu pájecích past [9]

Sn96.5Ag3Cu0.5		Sn95.5Ag4Cu0.5	
Teplota [°C]	Viskozita [Pa*s]	Teplota [°C]	Viskozita [Pa*s]
12	137,6256	11	132,7104
15	140,9024	15	149,0944
16	144,1792	18	135,9872
18	140,9024	20	134,3488
19	131,072	22	131,072
20	124,5184	22,5	119,6032
22	95,0272	23	109,7728
25	77,0048	25	65,536

Měření probíhalo při 2,5 otáčkách za minutu. Z těchto výsledků je patrné že i malé změny ve složení past dokáží změnit hodnoty viskozity o desítky procent.

Při měření viskozity v praktické části této práce je tedy nutné dbát na to, aby všechny vzorky pocházely ze stejné série a z jedné výroby. Hodnoty viskozity totiž nemění pouze množství hlavních prvků (v našem případě množství Sn a Bi), ale také množství a druh tavidla a postup při míchání pasty.

2. Praktická část

2.1 Příprava pájecí pasty

V praktické části se pracovalo s pastou od firmy NeVo, která využívá materiál a postupy firmy Shenmao Technology Inc. pro výrobu pájecích past. Všechny složky pájecí pasty jsou vloženy do nerezové nádoby v poměru a v množství, které odpovídá dané zakázce. Veškeré pasty se vyrábějí přímo na zakázku a každá tak může mít rozdílné složení, obsah a druh tavidla a odlišný způsob míchání. Je tedy přesně na zákazníkově, jakou kombinaci zvolí. Každá kombinace má přesně daný postup výroby (míchání) pasty. Míchání probíhá ve třech krocích při různých tlacích, atmosférách a po různé doby.

Pro pastu PF602-P používanou v praktické části míchání probíhalo takto. První míchání probíhalo za normální atmosféry po dobu 5 až 10 minut. Druhé míchání probíhalo po vyčerpání vzduchu z nádoby, následným zaplněním atmosféry dusíkem a poté opětovným vyčerpáním atmosféry po dobu okolo 2 minut. Třetí míchání probíhalo ve vakuu po dobu pár minut. Na obrázku 16 je přístroj, který se využívá k míchání pasty a tavidla dohromady. Na obrázku 17 je nádoba naplněná jednotlivými složkami před mícháním a výsledná pasta po míchání. Míchání v normální atmosféře probíhá při pokojové teplotě a tlaku. Veškeré tyto hodnoty se zapisují do technického listu pasty.



Obrázek 16: Zařízení na míchání pájecí pasty



Obrázek 17: Na levém obrázku pasta před mícháním, na pravém po míchání

Pasta je následně připravena na ruční balení do připravených nádobek (viz. obrázek 18). Jedna nádobka je určena jako testovací a na ní se provádí předběžný test viskozity. Pokud tento test nevyjde, je patrné, že se při výrobě stala hrubá chyba a pasta je opět znovu namíchána. Pokud testem projde, dochází k balení zbytku pasty a vytvoření výrobku pro zákazníka. Nejdříve za 12 hodin od výroby pasty se provádí druhý konečný test viskozity. Pokud i tento test pasta splní, je odeslána zakázka zákazníkovi. Testovací nádobka této várky poté zůstává na firmě NeVo kde je uschována pro případné reklamace nebo jiné požadavky. Testy viskozity se provádějí na rotačním viskozimetru značky Malcom a to při teplotě 25 °C a při 10 otáčkách za minutu. Hodnoty viskozity pro dané pasty jsou v rozmezích: SAC 180–230 Pa*s a SnBi 120–230 Pa*s.



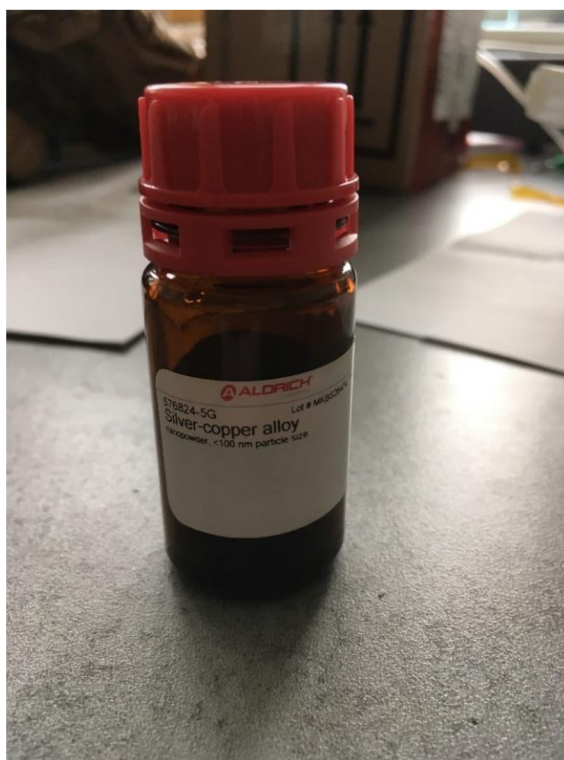
Obrázek 18: Balení pasty do nádobek

2.2 Nanočástice a jejich vmíchávání

Z výsledků rešerše je patrné, že nejčastěji se využívají pro zlepšení vlastností past nanočástice stříbra a mědi. Měď dosahuje dobrých výsledků při co nejnižším možném obsahu nanočástic (do 0,5%), zatímco stříbro má dobré výsledky i při 4% obsahu nanočástic v pastě. V rámci diplomové práce se tedy pracuje se slitinou stříbra a mědi od firmy Sigma-Aldrich. Jedná se o nanočástice s produktovým číslem 576824 a označením „Silver-copper alloy“. Tyto nanočástice mají velikost částic určenou menší jak 100nm (přesné rozměry nanočástic nejsou uvedeny) a je dodávána ve formě prášku. Barva těchto nanočástic je šedá až černá a obsahuje 96 až 98 % částic stříbra a 2 až 4 % částic mědi. Sigma-Aldrich neudává u každé dávky přesnou hodnotu procentuálního zastoupení částic, ale pouze kontroluje, zda se v dané dávce vyskytují. Totéž platí pro velikost částic. Kontroluje se pouze zda jsou v oblasti nanometrů, a již se nezjišťuje jejich přesná velikost. Vybrané částice byly zakoupeny v množství 5 g byly dodány v ampulkách. Maloobchodní cena těchto nanočástic je okolo 4650 Kč za 5 gramů. Tyto nanočástice nejsou podle bezpečnostních dokumentů nebezpečnou látkou ani směsí podle směrnice (ES) č. 1272/2008, a také se nejedná o toxickou slitinu. Při pracování s těmito nanočásticemi se udává, že se nesmí dostat do očí, vdechnout či přijít do styku s pokožkou. Při práci s nanočásticemi se tedy doporučuje používat ochranné rukavice (případně oděv). Není nutné využívat respiračního zařízení v prostředí, kde nehrozí víření vzduchu.

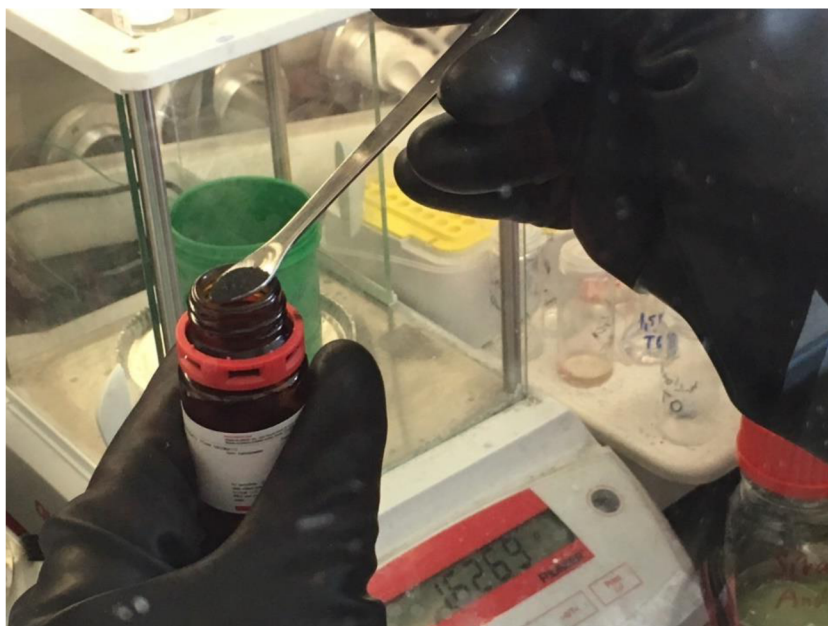
Na pájecích pastách se často zkouší nanočástice jak mědi, tak stříbra. Byla vybrána slitina stříbro-měď za účelem zjistit, zda se budou tyto odlišné materiály navzájem v pastě doplňovat. Tento typ nanočástic byl vybrán, protože patří mezi nejčastěji zkoumané typy nanočástic

Nanočástice byly dodány ve skleněné lahvičce (viz. obrázek 19). Hustota nanočástic slitiny stříbro-měď byla poměrně nízká. Lahvička byla více než ze 75 % plná a v porovnání s jinými druhy nanočástic (například 5 gramy niklu a kobaltu) zaujímalo těchto 5 gramů mnohem větší objem.



Obrázek 19: Nádoba s nanočásticemi

Používané nanočástice nesmějí podle bezpečnostních pokynů přijít do kontaktu s pokožkou anebo být vdechnuty. Nanočástice totiž lehce procházejí do krevního oběhu člověka, kde se jich tělo velice složitě zbavuje a mohou také kontaminovat pracoviště na kterém se s nimi pracovalo. Nanočástice mají také tendenci velice rychle oxidovat při kontaktu se vzduchem, což by mohlo negativně ovlivnit výsledky testů. Nanočástice proto byly vsypány do nádob s pastou v rukavicovém boxu na ústavu elektrotechnologie FEKT VUT v Brně panem Ing. Michalem Jahnem v argonové atmosféře (viz. obrázek 20). Tím se zamezilo jakékoliv kontaminaci vzorku. Nanočástice se vsypávaly do 3 předem připravených vzorků čisté PF602-P-T3 pasty šarže B602098. Vzorky pasty měli hmotnosti 250, 100 a 100 gramů. Pro jeden vzorek byla zvolena větší hmotnost pasty, aby na ní bylo možné provádět měření viskozity a zjistit tak vliv nanočástic na viskozitu (větší množství bylo nutné pro správné fungování používaného viskozimetru). Pasta byla po vsypání nanočástic hermeticky uzavřena v boxu a poté vyjmuta ven. Až do zamíchání nanočástic se nádoba neotvírala, aby se zamezilo jakékoliv kontaminaci.



Obrázek 20: Vsypávání nanočástic do připravených vzorků

Samotné zamíchání se provádělo ve firmě NeVo na jednoosé centrifuze (viz. obrázek 21). Aby se zajistilo homogennějšího zamíchání, bylo míchání provedeno jedenkrát po dobu 3 minut s kelímkem po směru ramene, jedenkrát po dobu 3 minut s kelímkem proti směru ramene a otočení vrchní strany kelímku. Poslední míchání také po dobu 3 minut se provádělo opět jako v první případě. Mezi každým mícháním se pasta nechala 10 minut odstát. Po ukončení míchání byla pasta uložena do lednice a poprvé otevřena až následující den. Množství nanočástic v pastách je uvedeno v tabulce 2. Hmotnost čisté pasty je přesná hmotnost pasty ve vzorcích, sloupec nanočástice udává určená zastoupení nanočástic v pastě. V posledním sloupci reálné zastoupení je určeno, v jakém reálném hmotnostním zastoupením se, vzhledem k hmotnosti pasty, nanočástice v pastách vyskytují.

Tabulka 2: Vzorky pasty s nanočásticemi

Název vzorků	Hmotnost čisté pasty [g]	Nanočástice [%]	Hmotnost částic [g]	Reálné zastoupení [%]
Pasta 2	100,0103	0,5	0,5	0,499949
Pasta 3	248,7	1	2,5	1,005227
Pasta 4	99,9972	2	2	2,000056



Obrázek 21: Centrifuga

Množství nanočástic vmíchané do pasty bylo zvoleno podle provedených testů s nanočásticemi rozebraných v teoretické části práce. U nanočástic mědi se dosahuje lepších výsledků při menším zastoupením nanočástic v pastě. Běžné hodnoty byly do 2 % s tím, že nejlepších výsledků dosahovaly nanočástice mědi při 0,1 až 1 %. U stříbrných nanočástic bylo používáno množství až ke 4 %, a i takto velké množství stále nemělo negativní účinky na pastu. Proto při použití slitiny stříbro-měď bylo vmícháno do čisté PF602-P pasty 0,5 %, 1 % a 2 % hmotnostní procento nanočástic, a to z důvodu většího množství obsahu stříbrných nanočástic ve slitině.

Po zamíchání nanočástic byly provedeny první testy na vzorcích past. První zkoušky s tisknutím pasty ukázaly, že viskozita past s nanočásticemi byla mnohem vyšší než u čisté PF602-P pasty. Pasta se také začala díky vysoké viskozitě a změněným vlastnostem chovat velice špatně při tisku a tisk pasty tak byl obtížný. Zhoršení vlastností bylo nejvíce poznatelné u past 3 a 4. Tedy u vzorků s vyšším obsahem nanočástic. Z tohoto důvodu se do past 3 a 4 vmíchalo tavidlo, aby se dodržel poměr tavidla a metalických částí v pastě. V čisté pastě PF602-P-T3 je 9,5 % tavidla, proto po přidání nanočástic bylo do past 3 a 4 přimícháno 0,26 a 0,21 gramu tavidla (viz. obrázek 22). Vliv přidání tavidla na viskozitu byl znatelný a je změřený a blíže popsáný v kapitole 2.3.3 vliv nanočástic na viskozitu. Samotné vlastnosti past při tisku se také zlepšily a celkově se pasty snadněji tisknuly. Po přidání tavidla byla schopnost tisku pasty 3 srovnatelná s pastou 2. Pasta 4 měla stále špatné vlastnosti, ale došlo k výraznému zlepšení. K testování se tedy používaly pasty 3 a 4 s přidáním tavidlem.



Obrázek 22: Pasta 4 s tavidlem

2.3 Měření viskozity

Měření viskozity probíhalo ve firmě NeVo na Searle rotačním viskozimetru značky Malcom PCU-203 (viz. obrázek 23). Pro měření viskozity pasty PF602-P (pasta 1) bylo využito standartního testu na měření viskozity, který se používá ve firmě NeVo. Pro další měření viskozity, a to měření vlivu teploty na viskozitu a vliv nanočástic na viskozitu je nutné brát hodnotu, která je druhá od spodu na obrázku 24, tedy hodnotu 229 Pa*s. Tato změna je nutná, protože tyto měření probíhaly mimo standartní postup firmy NeVo z důvodu nemožnosti ovládat teplotní čidlo při měření závislosti teploty a menšího množství pasty při měření vlivu nanočástic. Tyto měření tedy probíhaly podle nastavení, kterému odpovídají hodnoty, rozdílné od standartního měření. Pro porovnání budou uvedeny naměřené zvýšené hodnoty a poté jejich přepočítané hodnoty, které by odpovídaly standartnímu měření pro lehčí porovnání se standartním testem.



Obrázek 23: Viskozimetr Malcom PCU-203

2.3.1 Měření viskozity pasty PF602-P

Parameter	Value
STOP	
Viscosity (Pa.S)	120.6
Temperature (°C)	24.9
Time (min)	1
Speed (S-1)	6.0
RPM	10
Viscosity (Pa.S)	876.8
Temperature (°C)	24.9
Time (min)	1
Speed (S-1)	18.0
RPM	30
Viscosity (Pa.S)	893.3
Temperature (°C)	24.9
Time (min)	1
Speed (S-1)	12.0
RPM	20
Viscosity (Pa.S)	125.8
Temperature (°C)	25.0
Time (min)	3
Speed (S-1)	6.0
RPM	10
Viscosity (Pa.S)	174.8
Temperature (°C)	25.0
Time (min)	3
Speed (S-1)	3.0
RPM	05
Viscosity (Pa.S)	195.8
Temperature (°C)	25.0
Time (min)	3
Speed (S-1)	2.4
RPM	04
Viscosity (Pa.S)	229.0
Temperature (°C)	24.9
Time (min)	6
Speed (S-1)	1.8
RPM	03
Viscosity (Pa.S)	124.3
Temperature (°C)	24.8
Time (min)	3
Speed (S-1)	6.0
RPM	10
START	
FORMAT: JIS	
11:19	
2017-12-11	
.PCU-203	

Obrázek 24: Výsledky měření viskozity

Byla změřena viskozita pasty PF602-P-T3 šarže B602098 (pasta 1) při standardních podmínkách měření viskozity, a to při 25 °C a 10 otáčkách za minutu. Test probíhal přibližně 30 minut a viskozita se měřila při různých otáčkách a po různé doby. Před samotným vložením pasty do viskozimetru byla pasta po dobu 3 minut míchána v centrifugální míchačce (viz. obrázek 25). Výsledky tohoto testu jsou vidět na obrázku 24. Výsledné měření viskozity pasty 1 je čtvrté měření shora. Výsledkem je tedy 125.8 Pa*s při 25 °C a 10 otáčkách za minutu. Výsledky viskozity se poté porovnávají podle tabulkových hodnot a musí být v určitém rozmezí. Pro testovanou pájecí pastu PF602-P-T3 je daná tabulková hodnota výsledné viskozity mezi 120 až 140 Pa*s. Z dosažených výsledků je patrné, že pasta prošla testem viskozity.

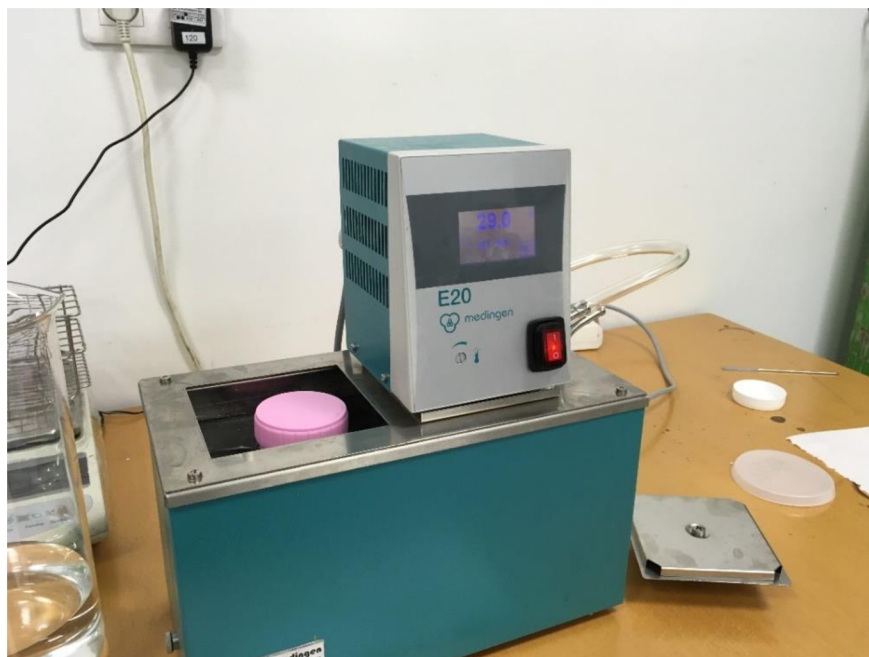


Obrázek 25: Centrifuga

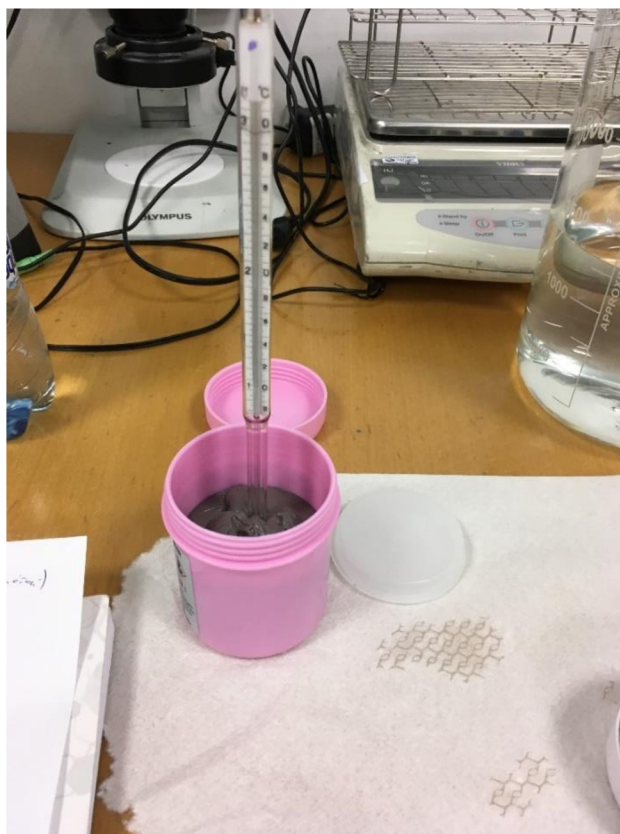
2.3.2 Vliv teploty na viskozitu

Při měření teplotní závislosti na viskozitu byla použita pasta PF602-P-T3 šarže B602098 (pasta 1). Před měřením byla pasta vyjmuta z lednice, po dobu 5 minut ponechána temperovat a poté byla 1 minuty promíchávána v centrifuze. Vzhledem ke snížené relativní vlhkosti v místnosti (okolo 30 % relativní vlhkosti při teplotě 23 °C), kde probíhá míchaní past a nachází se zde i viskozimetr, se není třeba obávat orosování krabičky s pastou a tím jejího znehodnocení.

Pasta byla po zamíchání otevřena a vložena do viskozimetru, kde probíhalo měření viskozity do teplot 25 °C, které bylo dané maximum nastaveného tepelného tělíska ve viskozimetru. Po dosažení této teploty bylo nutné pastu oteplovat jiným způsobem. Proto se pasta ohřívala v zařízení Medingen E20 (obrázek 26), které dokáže zahřívat a udržovat přesně nastavenou hodnotu teploty v něm umístěné kapaliny. V případě ohřívání pasty byla do zařízení napuštěna voda, která se postupně zahřívala na dané hodnoty. Krabička s pastou byla vložena do vodní lázně a probíhalo její zahřívání. Když bylo dosaženo potřebné teploty ve vodě, nechala se pasta 10 minut temperovat, aby se dosáhlo jejího úplného prohřátí. Teplota samotné pasty se měřila pomocí rtuťového teploměru (viz. obrázek 27). Při dosažení nastavené teploty pasty byla pasta opět vložena do viskozimetru a probíhalo měření viskozity. Během toho procesu bylo zjištěno že pájecí pasta má velice nízkou měrnou teplotní kapacitu a zahřívání a ochlazování probíhalo velice rychle. Z tohoto důvodu jsou hodnoty naměřeny na viskozimetru z jiných teplot, než bylo plánováno z důvodu rychlého chladnutí pasty a jsou uvedeny v tabulce 3.



Obrázek 26: Zařízení Medingen E20 na ohřívání pasty



Obrázek 27: Kontrola teploty pasty rtuťovým teploměrem

Tabulka 3: Vliv viskozity na pastu

Teplota pasty [°C]	Viskozita [Pa*s]	Přepočtená viskozita	Změna viskozity %
19	266	146,13	121,9
21	268	147,22	122,8
22	273	149,97	125,1
23	266	146,13	121,9
23,5	246	135,14	112,7
24	235,8	129,54	108,1
24,5	226,8	124,59	103,9
25	218,2	119,87	100,0
27	200	109,87	91,7
28	187	102,73	85,7
29	180	98,88	82,5
31	174	95,59	79,7
34	156	85,70	71,5

Měření prokázalo, že viskozita pájecí pasty klesá s rostoucí teplotou a je na ní velice závislá. Zajímavý fenomén, který se u pájecích past vyskytuje je, že při nárůstu teploty do přibližně 22 °C se viskozita mění velice pomalu a občas i roste s teplotou. Od dosažení

teploty mezi 22–23 °C začne viskozita velice rychle klesat, a to až o 10 % za 1 °C. Je tedy potřeba při tisku pájecích past sledovat teplotu, aby se zaručilo správné roztékání pasty.

2.3.3 Vliv nanočástic na viskozitu

Po zamíchání a prvotních testech s pastami bylo potřeba přidat tavidlo do past 3 a 4, aby byly zajištěny dobré vlastnosti při tisku pasty. Před přidáním tavidla byla na pastě 3 změřena viskozita při teplotě 25 °C a je udávána opět ve dvou hodnotách. Naměřené hodnoty mimo standartní test jsou poté přepočítány na odpovídající úroveň. Z naměřených hodnot je patrné že viskozita byla zvýšena enormně (viz. tabulka 4). Pasta s obsahem 1 % nanočástic dosahovala viskozity větší než čistá pasta při 19,5 °C a byla přibližně o 66 až 71 % vyšší než viskozita čisté pasty při 25 °C. Na pastě 4 se díky nízké hmotnosti vzorku nedala měřit viskozita, ale je pravděpodobné že její viskozita byla na ještě vyšší úrovni. Po přidání 0,26 gramů tavidla do pasty 3 byl opět proveden test viskozity (viz. tabulka 5). Viskozita se snížila na hodnoty, které byly v průměru o 47 až 53 % vyšší než čistá pasta. Jde tedy pozorovat, že i po přidání relativně malého množství tavidla se snížila viskozita o 18 %.

Tabulka 4: Viskozita pasty 4 před přidáním tavidla

	Viskozita [Pa*s]	Přepočtená viskozita	Změna viskozity %
PF602-P	218,2	119,87	100
Pasta 4	363 - 372	199,41-204,36	166 - 171

Tabulka 5: Viskozita pasty 4 po přidáním tavidla

	Viskozita [Pa*s]	Přepočtená viskozita	Změna viskozity %
PF602-P	218,2	119,87	100
Pasta 4	322 - 333	176,89-182,93	147 - 153

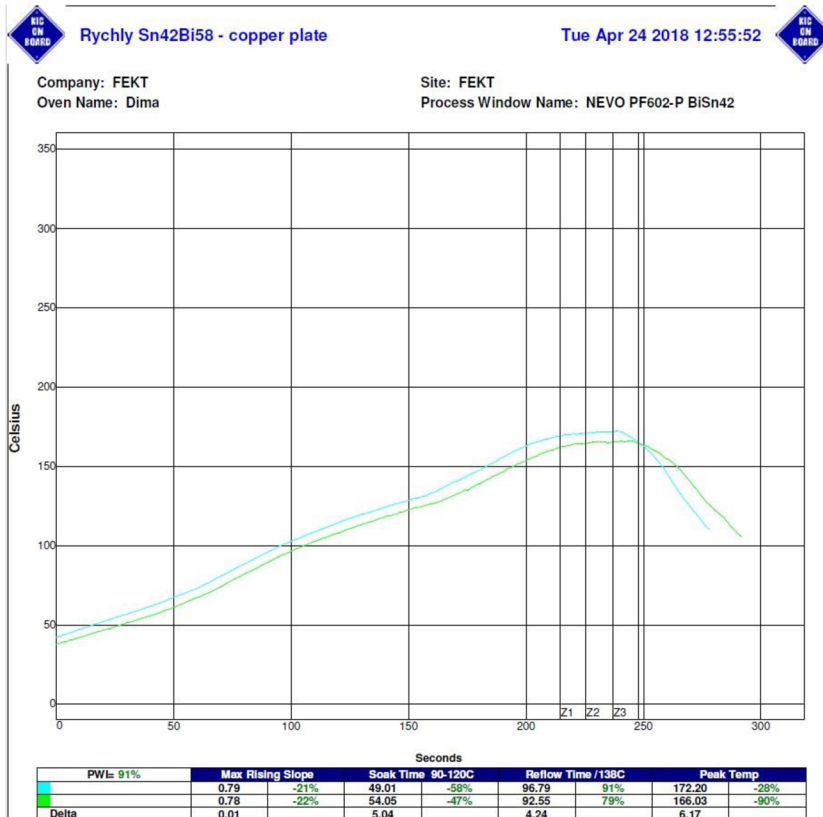
2.4 Teplotní profily

Před začátkem samotných testů bylo potřeba vytvořit teplotní profily a zjistit tak správné nastavení reflow pece (viz. obrázek 28), na které probíhalo veškeré pájení a testy. Pro nastavení profilu byl použit doporučený reflow profil od výrobce. Jedná se o stejný profil, jenž je v teoretické části na obrázku 5. Hlavním cílem bylo nastavit pec tak, aby hodnoty profilu byly ve výrobcem nastavených mezních hodnotách. Z důvodu rozdílných teplotních kapacit materiálů, na které se tiskla během testů pasta, bylo potřeba nastavit celkem čtyři profily na reflow peci. Měření profilů pro keramiku, měď a hot slump test probíhalo pomocí tří termočlánků a pro měření profilu na DPS bylo využito pět termočlánků. Termočlánky byly připojeny k 9-ti kanálovému profiloměru SlimKIC 2000 (viz. obrázek 28). Pro vyhodnocení dat z termočlánků a pro porovnání hodnot s profilem od výrobce byl využit program KIC on board, ze kterého byly také použity grafické výstupy. Při měření teplot na měděné, keramické desce a DPS se pro lepší přenos tepla termočlánky vložily do tavidla a přilepily kaptonovou páskou.

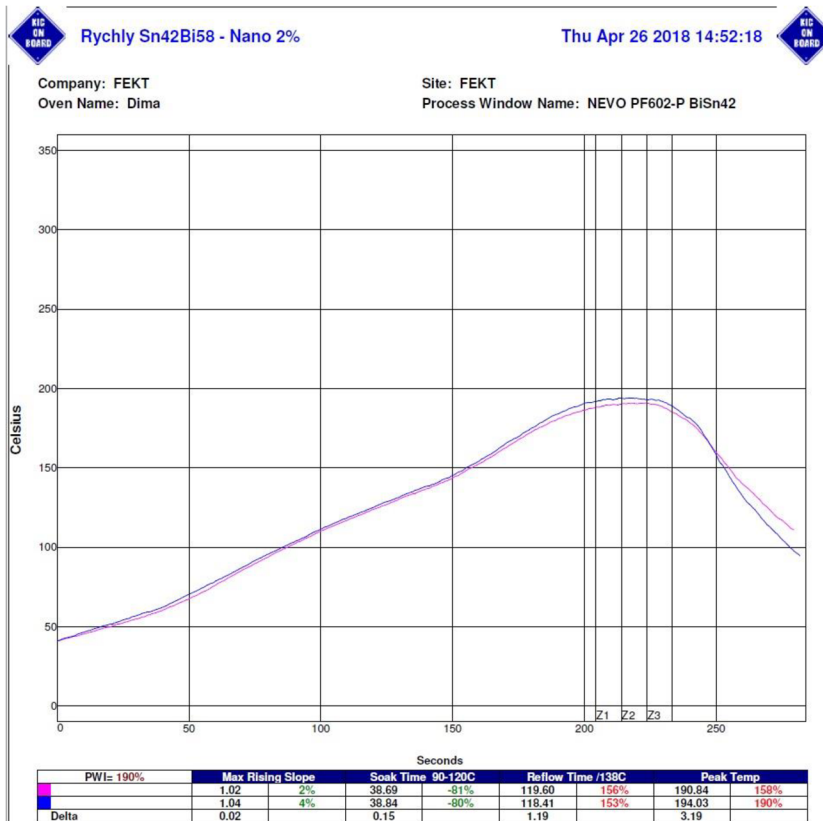


Obrázek 28: Příklad měření teplotních profilů

První profil byl pro testy solder ball test, který probíhá na keramických deskách. Keramika měla z používaných materiálů nejmenší tepelnou kapacitu. Profil využívaný pro solder ball test je na obrázku 29.

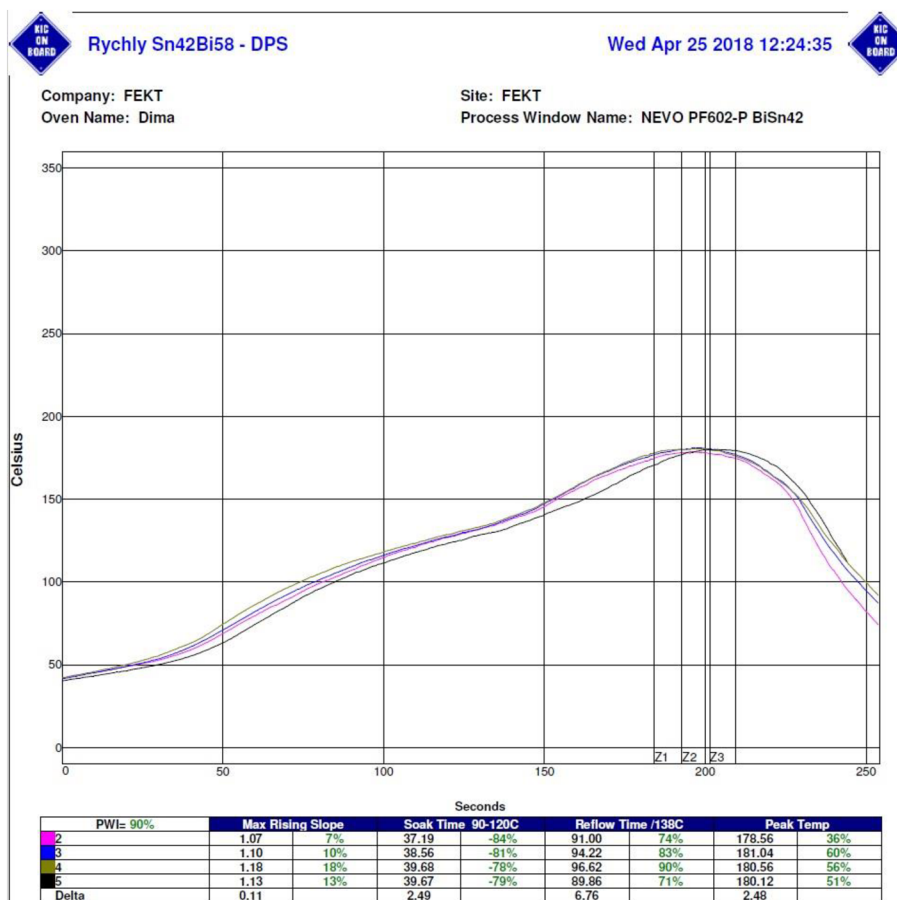


Obrázek 30: Teplotní profil na měděné desce pro PF602-P (pasta 1)



Obrázek 31: Zvýšený teplotní profil na měděné desce

Pro pájení rezistorů na DPS byl využit profil na obrázku 32. Pro vytvoření profilu na DPS se postupovalo obdobně jako na měděné a keramické desce. Vzhledem k větším rozměrům DPS bylo využito většího množství termočlánků, aby se zaručilo, že se deska v peci prohřívá rovnoměrně.



Obrázek 32: Profil pro pájení DPS

Pro hot slump test byl nastaven profil, jenž měl maximální teplotu 110 °C. Jedná se o teplotu, která je již v RSS zóně pasty PF602-P a vyhovuje tak tedy parametrům testu.

2.5 IPC testy

Na pastách 2,3 a 4 (pasty s nanočásticemi) a pastě 1 (čistá PF602-P) byly provedeny zkoušky podle standartu IPC-TM-650, a to přesněji cold a hot slump test, solder ball test a wetting test. Všechny tyto testy byly provedeny na pastách s nanočásticemi, ve kterých již bylo přidáno tavidlo. Hlavním důvodem byla vysoká obtížnost tisku past 3 a 4.

2.5.1 Cold slump test

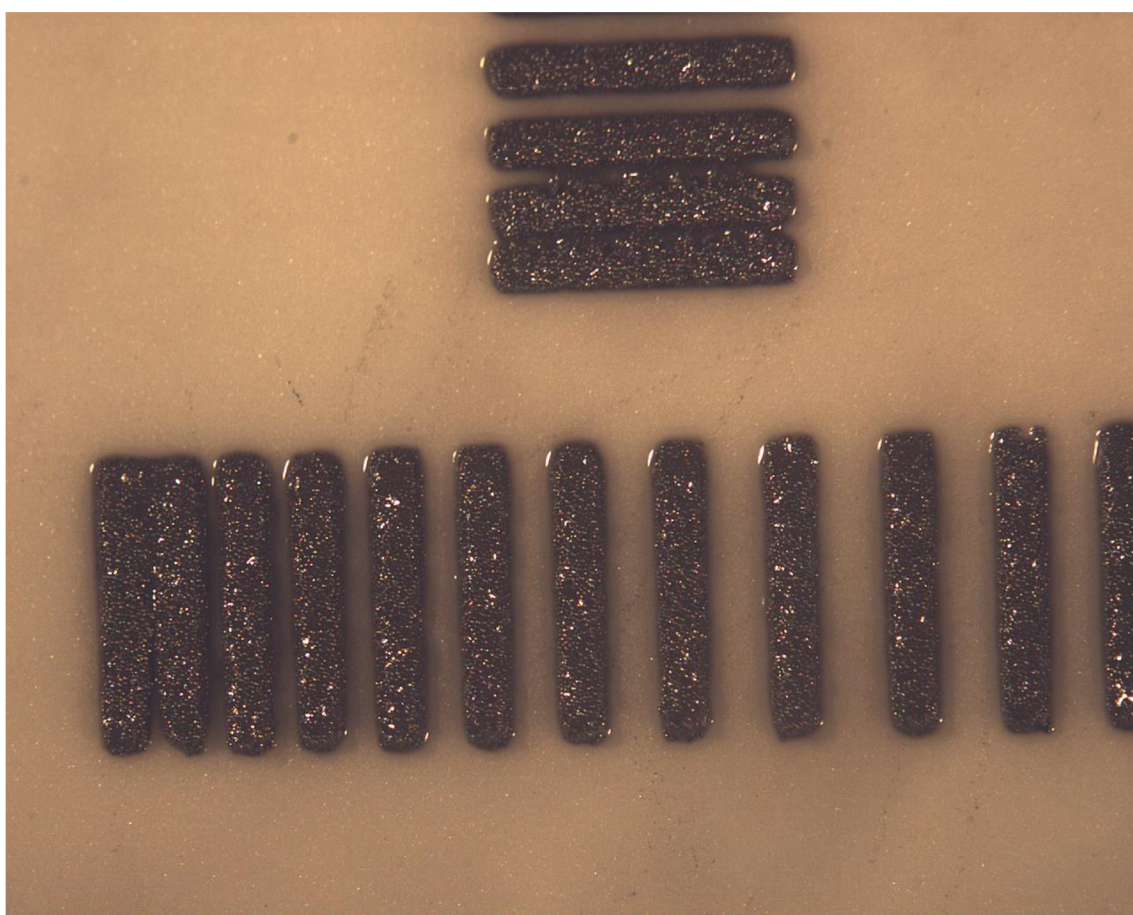
Cold slump test je test sedavosti, který se provádí při pokojové teplotě. Pasta se natiskne přes šablonu na keramickou destičku a nechá se 10 minut „uležet“. Poté se natisknutý vzorek vyhodnocuje, nejlépe pod mikroskopem. Cold slump test byl proveden pro všechny pasty 3x a výsledkem je součet všech chyb dané pasty. Test probíhal na šabloně IPC-A-20 s tloušťkou 0,1 a 0,2 mm. Při tisku byla pozorována zvýšená obtížnost tisku past 2,3 a 4 v porovnání s pastou 1. Pasty s nanočásticemi měly tendenci se k šabloně lepit a přilnout ke stěrce, a následně se nerovnoměrně tisknout na destičku. Se zvyšujícím se obsahem nanočástic v pastě se obtížnosti zvětšovaly, a to i po přidání tavidla do past 3 a 4. V tabulkách 6 a 7 jsou uvedeny příklady vyhodnocování výsledků testu.

Tabulka 6: Vyhodnocení výsledků pro pastu 1 (PF602-P)

Pasta 1						Pasta 1					
Forma IPC-A-20 (tloušťka 0,1 mm)						Forma IPC-A-20 (tloušťka 0,2 mm)					
Velikost otvorů 0,63x2,03 mm			Velikost otvorů 0,33x2,03 mm			Velikost otvorů 0,63x2,03 mm			Velikost otvorů 0,33x2,03 mm		
Mezery (mm)	Hor.	Ver.	Mezery (mm)	Hor.	Ver.	Mezery (mm)	Hor.	Ver.	Mezery (mm)	Hor.	Ver.
0,79	✓	✓	0,45	✓	✓	0,79	✓	✓	0,45	✓	✓
0,71	✓	✓	0,4	✓	✓	0,71	✓	✓	0,4	✓	✓
0,63	✓	✓	0,35	✓	✓	0,63	✓	✓	0,35	✓	✓
0,56	✓	✓	0,3	✓	✓	0,56	✓	✓	0,3	✓	✓
0,48	✓	✓	0,25	✓	✓	0,48	✓	✓	0,25	✓	✓
0,41	✓	✓	0,2	✓	✓	0,41	✓	✓	0,2	✓	✓
0,33	✓	✓	0,15	✓	✓	0,33	✓	✓	0,15	✓	✓
			0,1	✓	✓				0,1	x	x
			0,06	x	x				0,06	x	x

Tabulka 7: Vyhodnocení výsledků pro pastu 4

Pasta 4						Pasta 4					
Forma IPC-A-20 (tloušťka 0,1 mm)						Forma IPC-A-20 (tloušťka 0,2 mm)					
Velikost otvorů 0,63x2,03 mm			Velikost otvorů 0,33x2,03 mm			Velikost otvorů 0,63x2,03 mm			Velikost otvorů 0,33x2,03 mm		
Mezery (mm)	Hor.	Ver.	Mezery (mm)	Hor.	Ver.	Mezery (mm)	Hor.	Ver.	Mezery (mm)	Hor.	Ver.
0,79	✓	✓	0,45	✓	✓	0,79	✓	✓	0,45	✓	✓
0,71	✓	✓	0,4	✓	✓	0,71	✓	✓	0,4	✓	✓
0,63	✓	✓	0,35	✓	✓	0,63	✓	✓	0,35	✓	✓
0,56	✓	✓	0,3	✓	✓	0,56	✓	✓	0,3	✓	✓
0,48	✓	✓	0,25	✓	✓	0,48	✓	✓	0,25	✓	✓
0,41	✓	✓	0,2	✓	✓	0,41	✓	✓	0,2	✗	✓
0,33	✓	✓	0,15	✓	✓	0,33	✓	✓	0,15	✗	✗
			0,1	✓	✓				0,1	✗	✗
			0,06	✗	✗				0,06	✗	✗



Obrázek 33: Detail tisku pasty 3 přes 0,1 mm šablonu

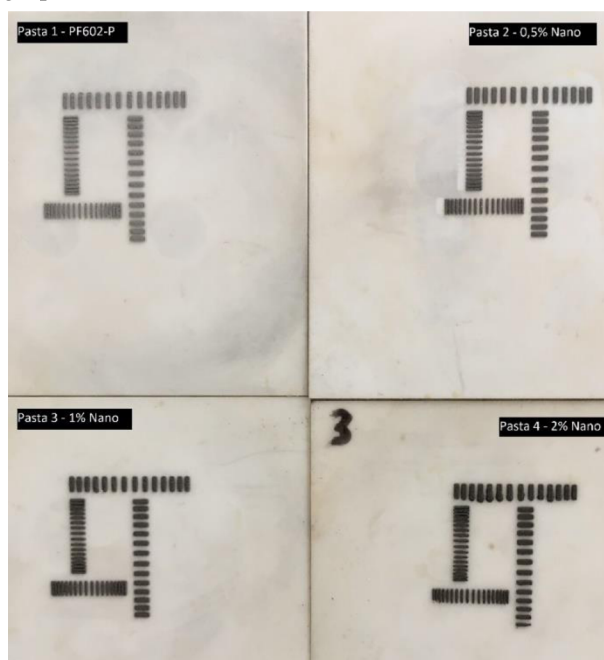
Na obrázku 33 je detail horizontální a vertikální řady po tisku přes šablonu. Každý ze vzorků vytvořil minimálně jeden můstek ve vertikální a horizontální řadě mezi proužky s mezerou 0,06 mm. V tabulce 8 je vidět porovnání počtu chyb mezi jednotlivými pastami a šablonami.

Tabulka 8: Výsledky cold slump testu

0,1 mm	Horizontální	Vertikální	Celkem	0,2 mm	Horizontální	Vertikální	Celkem
Pasta 1	6	7	13	Pasta 1	5	6	11
Pasta 2	10	9	19	Pasta 2	5	4	9
Pasta 3	8	8	16	Pasta 3	2	3	5
Pasta 4	8	7	15	Pasta 4	4	3	7

Všechny pasty si vedly lépe na šabloně tloušťky 0,2 mm. Počet chyb na formě 0,1 mm byl mezi pastami 1, 3 a 4 v mezích, pouze pasta 2 dosáhla horších výsledků. Pro tisk na šabloně tloušťky 0,2 mm si vedly pasty 2, 3 a 4 lépe než pasta 1, a i zde mezi vzorky s nanočásticemi vyšla nejhůře pasta 2. Pasta 2 byl jediný ze vzorků s nanočásticemi, do kterého se nepřidávalo tavidlo navíc. I přes přidané tavidlo je patrné, že pasty 3 a 4 se roztékaly nejméně, což je především způsobeno celkovou změnou vlastností pasty s obsahem nanočástic. Z výsledků je patrné, že schopnost natisknout pastu správně bez tvorby zkratových můstků a jiných defektů je jednodušší s čistou PF602-P pastou než s pastou s obsahem nanočástic.

Na obrázku 34 jsou natisknuté všechny 4 pasty vedle sebe. V levém horním rohu je pasta 1 (čistá PF602-P) v pravém horním rohu pasta 2 (0,5 % nanočástic), v levém dolním rohu pasta 3 (1 % nanočástic) a v pravém dolním rohu pasta 4 (2 % nanočástic). Již z obrázku je patrné, že nanočástice ovlivnily také barvu pájecí pasty. S rostoucím obsahem nanočástic je pasta tmavší.



Obrázek 34: Natisknuté pasty přes šablonu

2.5.2 Hot slump test

Hot slump test probíhá podle standartu stejně jako cold slump test, s jediným rozdílem, a to že se natisknutý vzorek nechává „uležet“ na 10 minut při 150 °C. Pro testy s pastami, které mají nižší hodnotu tavení je potřeba změnit teplotu testu. V případě pasty PF602-P je bod přetavení již ve 132 °C. To znamená, že není možné použít teplotu 150 °C, ale je potřeba test provádět při nižší teplotě. Důležité je, aby daná teplota byla v pásmu RSS dané pasty. RSS teplota pro PF602-P je v rozmezí 90 až 120 °C, a tak se tedy hot slump test prováděl při teplotě 110 °C.

Hot slump test probíhal pro každý vzorek pouze jednou a pouze pro šablonu tloušťky 0,1 mm. Výsledky testu jsou opět uvedeny jako součet chyb v tabulce 9.

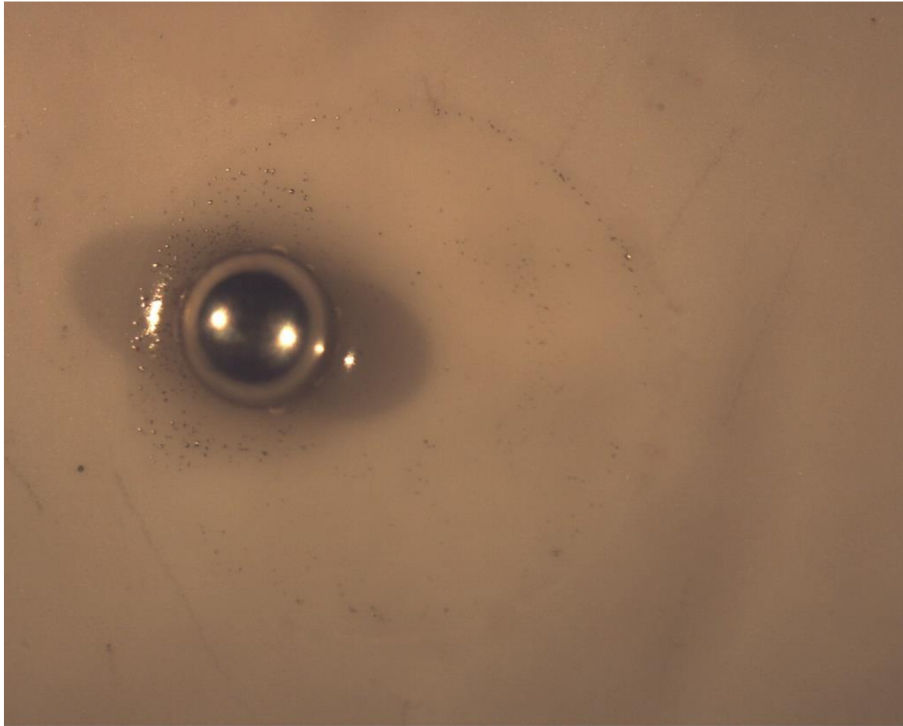
Tabulka 9: Výsledky hot slump testu

0,1 mm	Horizontální	Vertikální	Celkem
Pasta 1	1	1	2
Pasta 2	2	1	3
Pasta 3	3	3	6
Pasta 4	1	2	3

V tabulce 9 jsou výsledky pro všechny pasty až na pastu 3 v mezích. Pasta 3 při slump testu tvořila zkratové můstky během procesu ohřívání pasty na teplotu 110 °C.

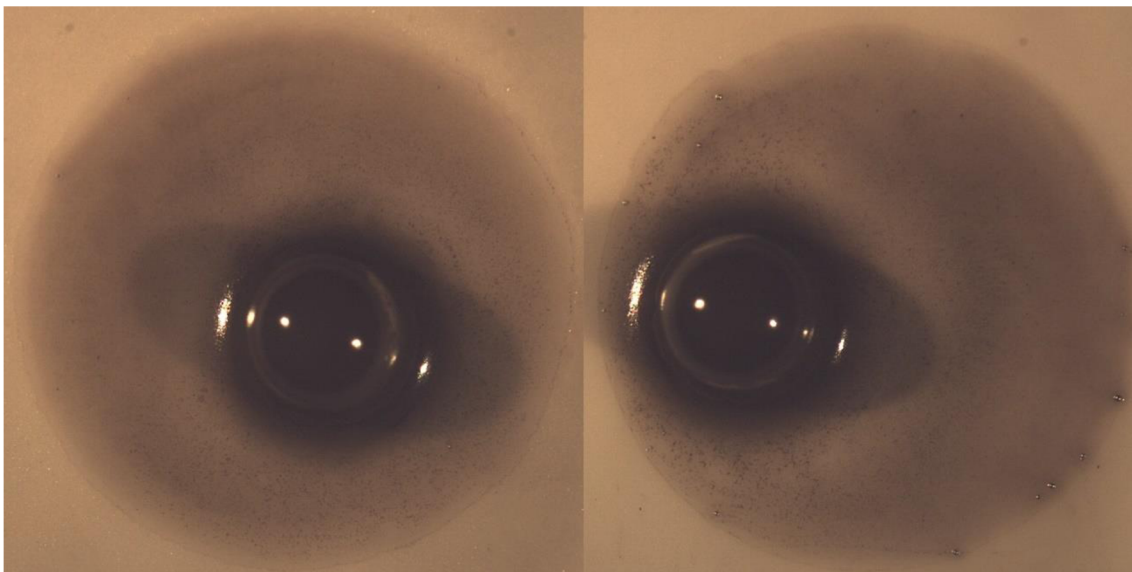
2.5.3 Solder ball test

Solder ball test se prováděl pro každou pastu třikrát. Při solder ball testu se sleduje schopnost pájky vytvořit primární kuličku a kolik vytváří sekundárních kuliček. Pasta 1 (PF602-P) vytvářela primární kuličky bez problémů. Vytváření sekundárních kuliček ve volném prostoru bylo minimální, ale u všech testů s touto pastou se vytvářely sekundární kuličky v těsné blízkosti primární kuličky. Na obrázku 35 lze vidět malé množství sekundárních kuliček v kruhovém tvaru. Jedná se o kuličky vytvořené na samé hranici, kde pasta byla natisknuta. Celý prostor až k primární kuličce je čistý a pasta tak má vynikající výsledky. Problém ovšem nastává u samotné primární kuličky, kde se vytvořily shluky sekundárních kuliček. Jak již bylo zmíněno tento fenomén se u pasty 1 stal u všech primárních kuliček.



Obrázek 35: Solder ball test pasty 1

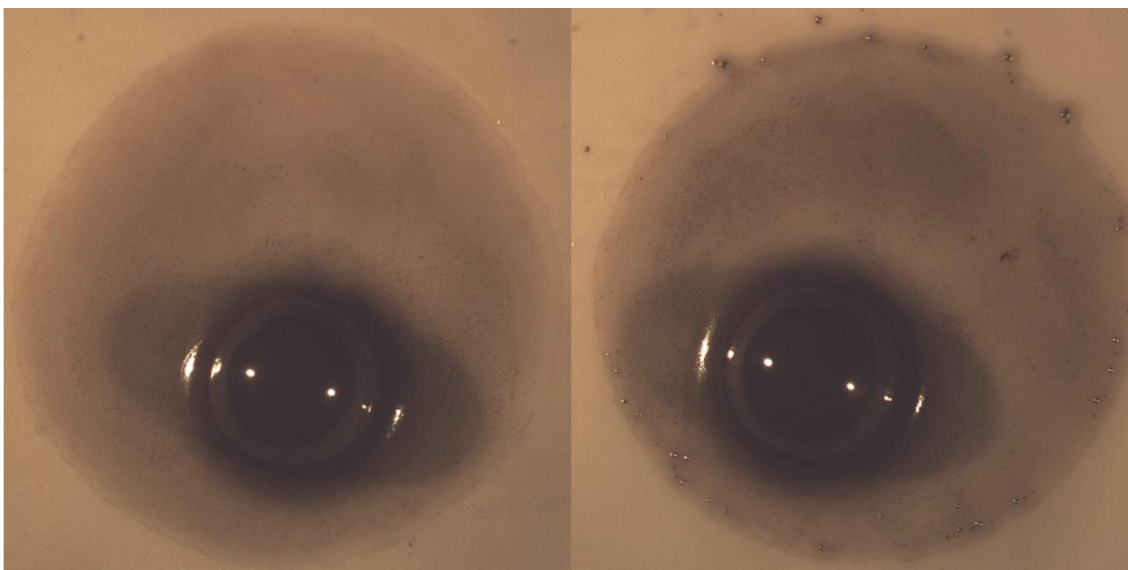
Po provedení solder ball testu past 2, 3 a 4 se objevil fenomén zbytků částic v tavidle které zůstalo na místě vytisknuté pasty. Pro vzorek 2 a 3 jsou výsledky solder ball testu lepší než výsledky u pasty 1. Pasty netvořily skoro žádné sekundární kuličky a pokud ano, tak pouze po obvodu místa, kde byla natisknuta pasta. Nejlépe dopadla v tomto ohledu pasta 2, která měla nejmenší množství sekundárních kuliček. Na obrázku 36 lze vidět na levé straně nejlepší dosažený výsledek a na pravé straně nejhorší dosažený výsledek ze 12 primárních kuliček pasty 2.



Obrázek 36: Solder ball test pasty 2

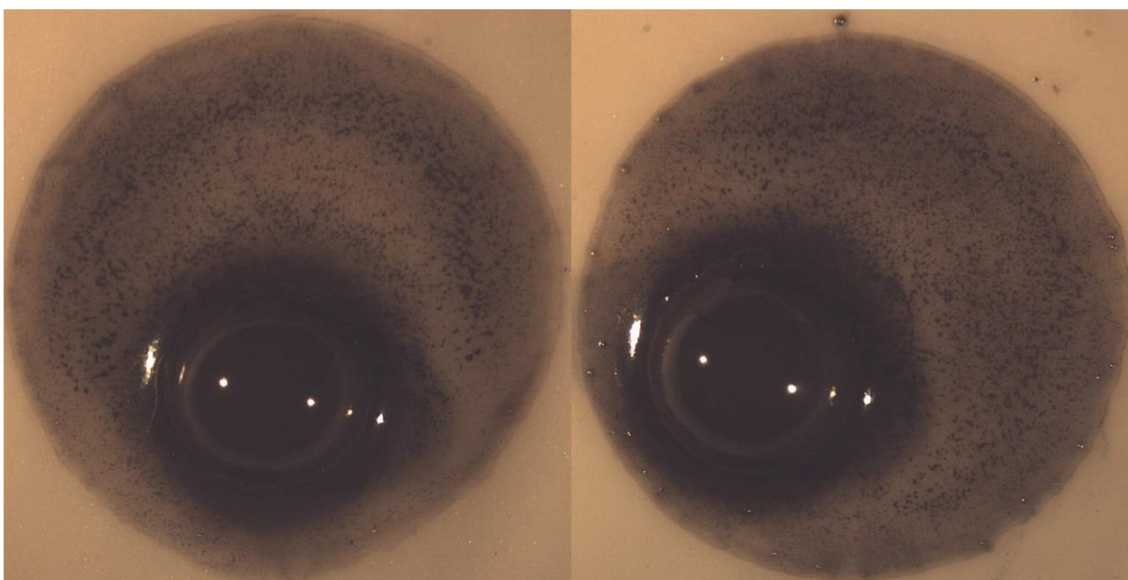
Z obrázku je patrné, že pasta byla schopná vytvořit primární kuličku bez jediné sekundární kuličky, a i v nejhorším dosaženém výsledku dopadla lépe než pasta 1 s pouze minimální tvorbou sekundárních kuliček.

Velice dobře také dopadla pasta 3, která je na obrázku 37. Opět levá strana ukazuje nejlepší dosažený výsledek a pravá strana nejhorší. I tato pasta byla schopná vytvořit primární kuličku bez tvorby sekundárních kuliček a také i v nejhorším případě dosáhla velice dobrých výsledků.



Obrázek 37: Solder ball test pasty 3

Pasta 4 měla také dobré výsledky solder ball testu pro tvorbu sekundárních kuliček kde na obrázku 38 je opět nejlepší výsledek nalevo a nejhorší napravo.



Obrázek 38: Solder ball test pasty 4

Pasta 4 měla ovšem problém s tvorbou primárních kuliček. Všechny vzorky byly přepájeny profilem, který měl maximální teplotu okolo 170 °C, tedy velice blízko nejnižší

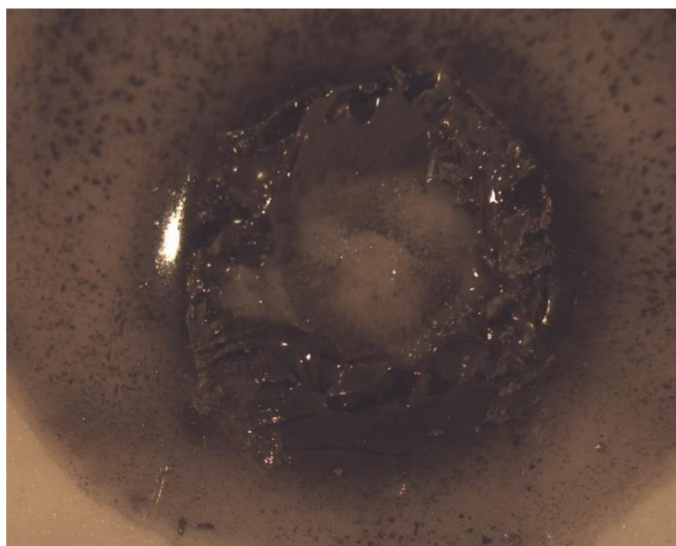
doporučené teplotě pro PF602-P. Zatímco všechny pasty neměly s tvorbou primární kuličky problém, tak pro pastu 4 s největším obsahem nanočástic, již tato dosažená teplota nebyla dostatečná k tvorbě primární kuličky.

Během celého testu bylo možné pozorovat, že se zvyšujícím počtem nanočástic vzrůstá potřebná teplota pro přetavení pájecí pasty, jelikož tvorba samotných kuliček nastávala později a její formování trvalo delší dobu. Pro přesnější porovnání bylo ke vzorkům připojeno teplotní čidlo pro zjištění teploty, při které se začne pájka přetavovat. Například pasta 1 začínala s tvorbou kuliček od 135 °C, což odpovídá hodnotám od výrobce, jelikož tato pasta má bod tavení na 135 °C. Pasta 4 s obsahem nanočástic 2 % začínala okolo 144 °C s tvorbou kuličky a nebyla přetavena veškerá natisknutá pasta. V tabulce 10 jsou uvedeny hodnoty, kdy začalo samotné přetavování (tedy teplota tavení) a poté při jaké teplotě formování kuličky končilo (jak dlouho trvalo prohřátí celé natisknuté pasty). Čím vyšší hodnota je dosažena, tím horší se dá výsledek považovat.

Tabulka 10: Teploty formování primární kuličky past

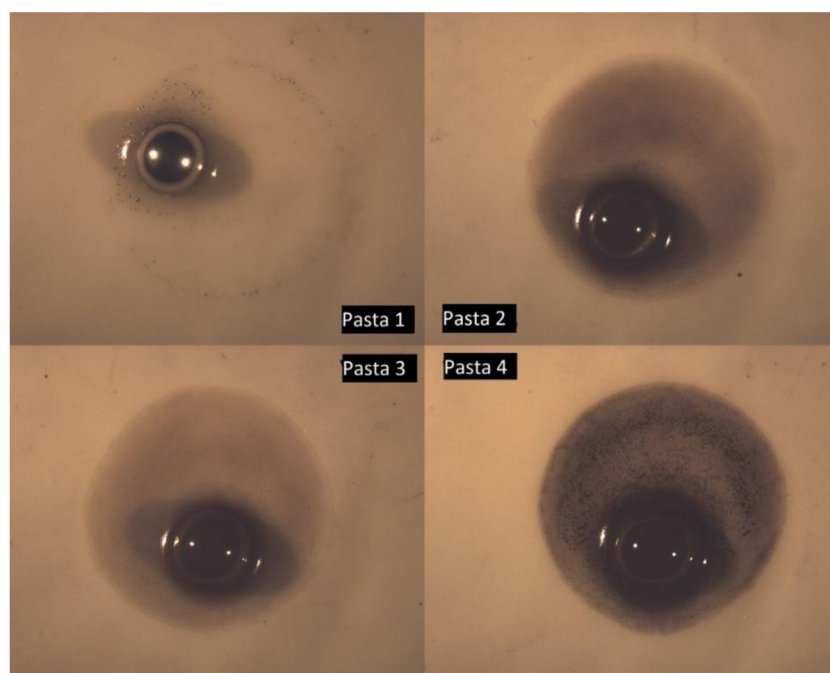
Pasta	Teplota přetavení	
	Počáteční	Konečná
	[°C]	[°C]
Pasta 1	135	140
Pasta 2	143	155
Pasta 3	143	160
Pasta 4	144	166

Z těchto naměřených výsledků je patrné, že pasta s obsahem nanočástic měla vyšší teplotu tavení přibližně o 10 °C. Se zvyšujícím se počtem nanočástic ovšem samotný proces tavení (tvorba kuličky) trval déle, jelikož pasta měla zvýšenou měrnou tepelnou kapacitu. Na obrázku 39 lze vidět zbytky pasty po odstranění kuličky ze vzorku solder ball testu pasty 4. Pasta se nedokázala přetavit celá a tím se potvrdilo, že slitina nanočástic stříbro-měď zvyšuje teplotu tavení pájecí pasty.



Obrázek 39: Zbytky pasty po neúplném přetavením pasty 4

Dalším poznatkem po provedení solder ball testu bylo, že v tavidle v pastách s obsahem nanočástic zůstává materiál, který je příliš malý na kuličky pasty. Je tedy patrné, že při reakci nanočástic s pastou a tavidlem vznikají sloučeniny, které zůstávají v tavidlových zbytcích. Při prvkové analýze na elektronovém mikroskopu bylo později zjištěno, že se jedná o částice uhlíku. Podrobněji je tento problém popsán v kapitole 2.6.2 Prvková analýza. Také jak bylo pozorováno při slump testu pasta se zvyšujícím se počtem nanočástic má tmavší barvu. Na obrázku 40 lze vidět porovnání kuliček všech čtyř testovaných past. Přestože pasta 3 je na pohled při tisknu tmavší (obsahuje více nanočástic) než pasta 2, tak přesto vytváří méně zbytkových částic v tavidle.

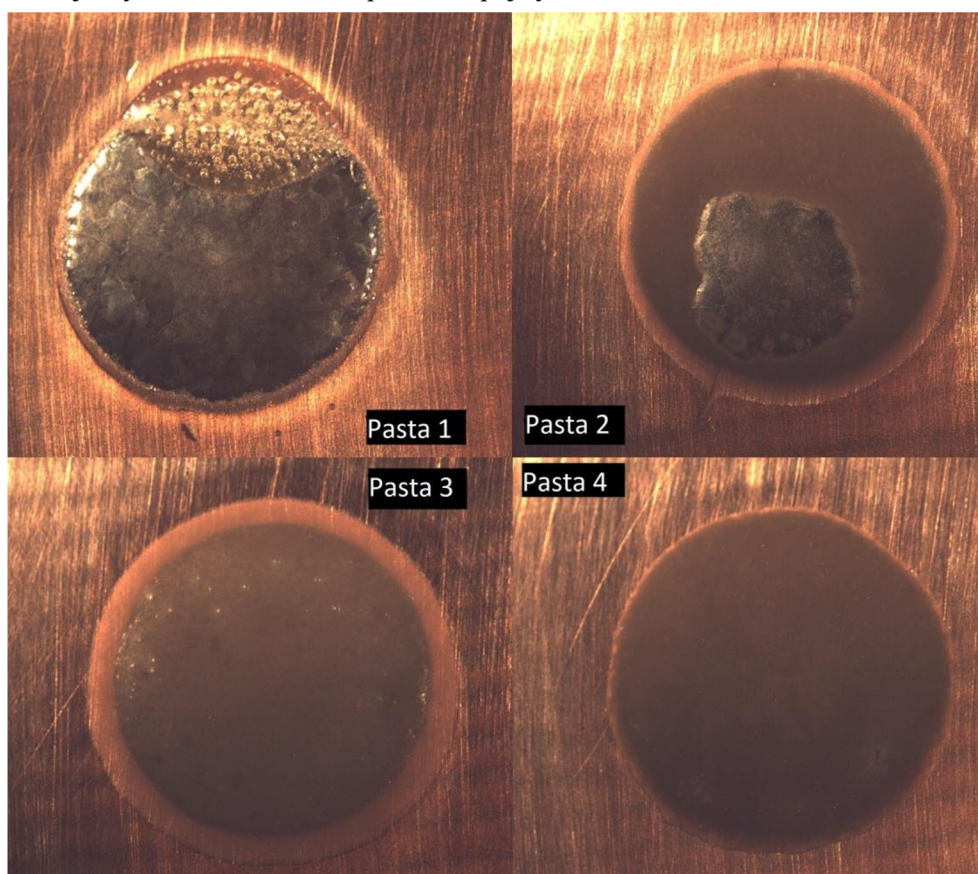


Obrázek 40: Kuličky solder ball testu všech past

2.5.4 Wetting test

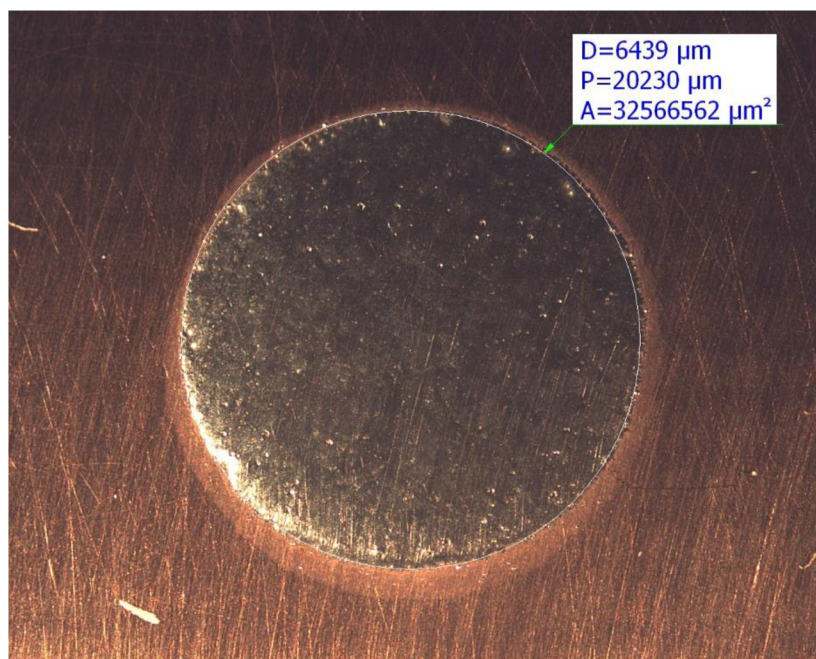
Wetting test se prováděl prvotně pomocí nižšího profilu, který měl maximální teplotu na nižší doporučené hranici okolo 170 °C. Tímto profilem se ovšem ani jedna z past moc dobře neroztekla a byl proto zvolen vyšší profil, který byl stejný pro všechny vzorky. Zvolený profil pojmenovaný Nano 2 % (obrázek 31) měl maximální teplotu přibližně o 5 °C vyšší, než je doporučena teplota výrobcem (190 °C nastavená proti maximální doporučené 185 °C). U wetting testu se sledovala schopnost pájky se roztect po povrchu měděné desky, hladkost samotné pájky po očištění a také se počítal smáčecí úhel. Za dobrý výsledek se považuje, když se pájka rozteče více než byl průměr natisknuté pasty, její povrch je co nejhladší a smáčecí úhel co nejmenší.

Při provádění wetting testu se opět objevil fenomén tvorby, později zjištěno uhlíkových, vrstev na pájce. Všechny vzorky s nanočásticemi měli na svém povrchu vrstvu černého obalu, který zakrýval samotnou pájku. Na obrázku 41 lze vidět všechny čtyři vzorky vedle sebe bez očištění povrchů. Lze pozorovat, že ze zvyšujícím se obsahem nanočástic je vytvořená vrstva na povrchu pájky tmavší a tlustší.



Obrázek 41: Natisknuté pasty přes šablonu

Vytvořená uhlíková vrstva u pasty 4 měla větší průměr než samotná pájka a po očištění se zmenšila plocha roztečení. Na obrázku 42 je očištěná pájka pasty 4.



Obrázek 42: Očištěný vzorek pasty 4

Výsledky wetting testu jsou uvedeny v tabulce 11 kde je zobrazen součet všech bodů dané pasty ve sledovaných kategoriích. Body jsou vždy součtem čtyř vzorků dané pasty, tedy vydělením výsledku čtyřmi získáme průměrnou bodovou hodnotu dané pasty. Čím vyšší je výsledný počet bodů pasty, tím lepší výsledek wetting testu.

Tabulka 11: Výsledky wetting testu

	Body za roztečení pájky	Body za hladkost pájky	Body za smáčecí úhel	Výsledný počet bodů
Pasta 1	8	12	28	48
Pasta 2	7	6	28	41
Pasta 3	6	7	28	41
Pasta 4	5	7	28	40

Tabulka 12: Určování bodů při wetting testu

Hladkost pájky	3		2			1	
	Hladká		Menší hrubost			Velká hrubost a díry	
Roztečení	3		2			1	
	Větší než tisk		Stejně velké jako tisk			Menší než tisk	
Smáčecí úhel	7	6	5	4	3	2	1
[ve stupních]	0-10°	10-20°	20-30°	30-40°	40-55°	55-70°	70°+

V tabulce 12 jsou uvedeny tři kategorie, ve kterých se udávaly body vzorkům past. Je zobrazen počet bodů, který je možné získat a podmínka pro jeho získání.

Roztečení pájky bylo pro všechny pasty nanejvýše stejné jako velikost natisknuté pasty. Se zvyšujícím se obsahem nanočástic se poté průměr čisté pájky po přetavení

snížoval. Hladkost pájky past s obsahem nanočástic byla také horší než pro čistou pastu 1. Hlavním důvodem byla zformovaná uhlíková vrstva, která občas vstupovala do prostoru pájky a vytvářela v ní nerovnosti, důlky a díry.

Smáčecí úhel (θ) byl vypočítán podle vzorce uvedeného v [10] z objemu natisknuté pájecí pasty (V_{past}), průměru přetavené pájky (p) a z výšky kulového vrchlíku přetavené pájky (h).

$$\text{tg}\theta = \frac{2 \cdot p \cdot h}{p^2 - h^2} \quad (7)$$

Výška kulového vrchlíku se odvozuje ze vzorce pro jeho objem, který lze po matematických úpravách psát následovně,

$$h = \left(\frac{3 \cdot V}{\pi} + \sqrt{\left(\frac{3 \cdot V}{\pi} \right)^2 + p^6} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(\frac{3 \cdot V}{\pi} - \sqrt{\left(\frac{3 \cdot V}{\pi} \right)^2 + p^6} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

kde V je objem kulového vrchlíku po přetavení pájecí pasty. Objem tohoto vrchlíku poté vypočítáme z objemu natisknuté pájecí pasty,

$$V_{\text{pasty}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v \quad (9)$$

kde d je průměr otvoru šablony a v je výška šablony. Objem pájecí pasty se skládá z objemu pájky i tavidla. Je tedy nutné vypočítat objemová procenta pájky v pájecí pastě a tímto číslem poté násobit celkový objem natisknuté pasty. Objemové procento se vypočítá pomocí hmotnostního procenta pájky a tavidla v pastě a jejich hustot. Toto číslo pro pastu Sn42Bi58 s 90,5% obsahem kovových částí je 0,5198. Výsledný vzorec pro objem vrchlíku pájky tedy je

$$V = V_{\text{pasty}} \cdot 0,5198 \quad (10)$$

Po dosazení hodnot byl vypočten teoretický smáčecí úhel všech past, který byl poté také bodově ohodnocen. Vypočtený smáčecí úhel vyšel pro všechny pasty v rozmezí 3,2 až 3,5 stupně. V kapitole 2.6.1 Měření smáčecího úhlu je tento úhel změřen.

2.6 Mikrovýbrus

Mikrovýbrus se prováděl na vzorcích po wetting testu. Byly celkem provedeny čtyři mikrovýbrusy, tedy od každé pasty jeden vzorek. Hlavním cílem bylo sledování vzniklé vrstvy na povrchu pájky. Z každého vzorku se z měděné desky pilkou uřízl jeden terčík s přepájenou pastou. Deska s terčíkem byla ořezána, aby se vešla do připravené formy, ve které se vzorek zalil dentacrylem (viz. obrázek 43).



Obrázek 43: Vzorek zalitý dentacrylem ve formě

Dentacryl se připravoval kombinací jeho dvou složek 1:1 (jeden díl prášku a jeden díl kapaliny) a po dobu přibližně 10 minut se míchal. Po umíchání se dentacryl nalil do formy. Forma se nechala 24 hodin „uležet“, aby dentacryl vytvrdnul. Po vytvrdnutí dentacrylu byly vzorky vyjmuty z forem, očištěny a následovalo jejich zbroušení a leštění (viz obrázek 44).



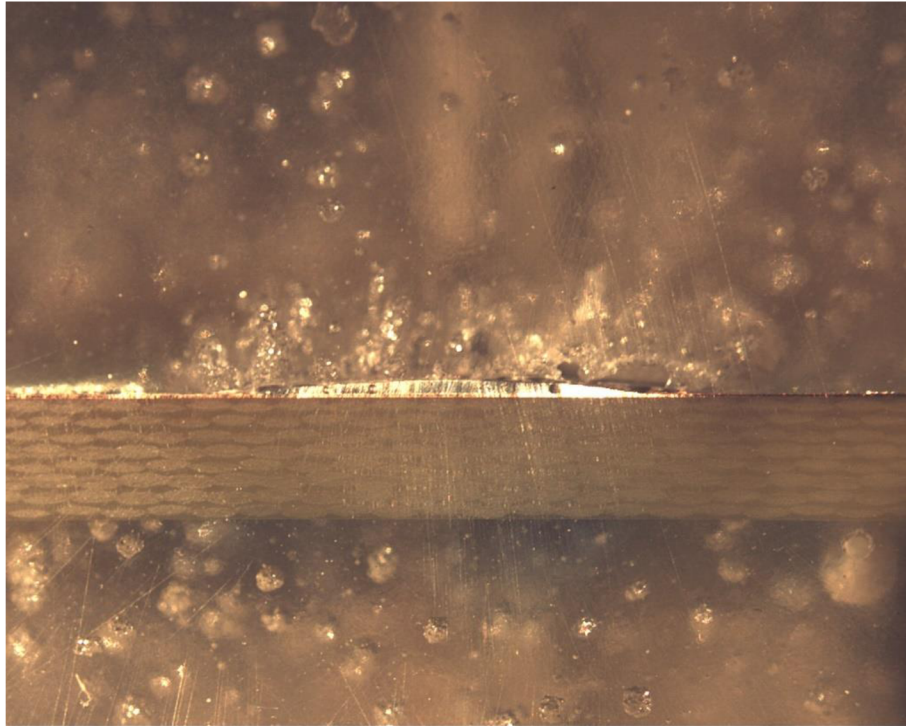
Obrázek 44: Vzorky po broušení a leštění

Vzorky se brousily tak dlouho, dokud se neprobrousilo na požadované místo. Broušení probíhalo na rotační brusce Metasimex s brusným kruhovým papírem (obrázek 45) kde se vzorek vlhčil vodou. Vzorek se v hlavici zařízení otáčí proti směru otáčení brusného papíru. Broušení se začíná na nejhrubších papírech (hrubost 220) a postupně, jak se přibližuje k požadovanému místu, snižujeme hrubost brusných papírů. Po dobroušení na požadované místo se vzorek nechá 10 minut čistit v ultrazvukové čističce Kraintek K10LE (viz obrázek 45 vpravo vzadu). Po vyčištění se vzorek leští na leštící desce po dobu 10 minut kde se vzorek vlhčí izopropylalkoholem.



Obrázek 45: Rotační bruska a leštička Metasimex a vzadu čistička Kraintek

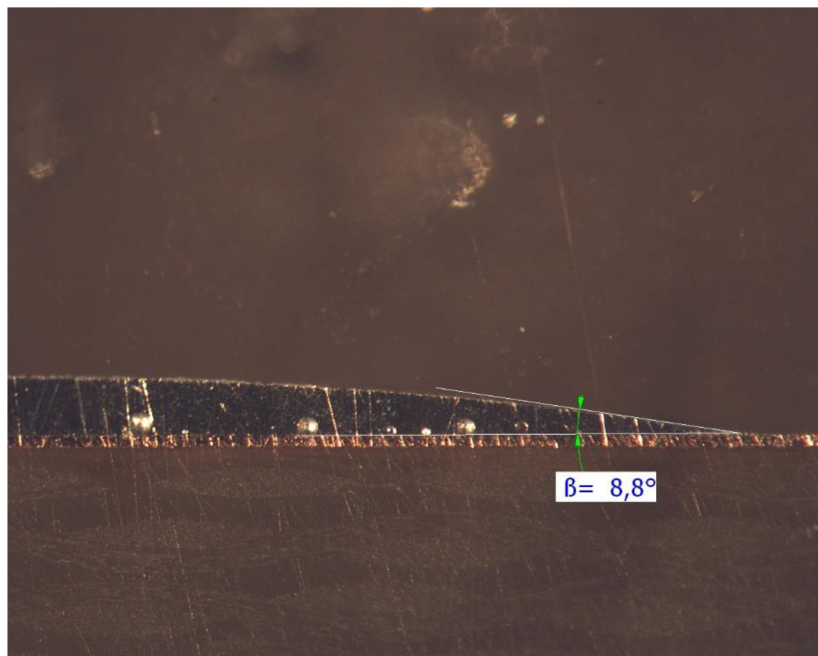
Výsledný mikrovýbrus pasty 2 je na obrázku 46. Vzorky se pozorovaly na optickém mikroskopu, kde se sledoval smáčecí úhel, a na elektronovém mikroskopu pana Ing. Pavla Čudka Ph.D. kde se sledovaly vytvořené vrstvy uhlíku, prováděla prvková analýza a měřila tloušťka intermetalické sloučeniny.



Obrázek 46: Výsledný mirkovýbrus pasty 2 v optickém mikroskopu

2.6.1 Měření smáčecího úhlu

Na optickém mikroskopu Olympus SZ61 se sledoval smáčecí úhel (viz. obrázek 47).



Obrázek 47: Smáčecí úhel pasty 1

Pozorované smáčecí úhly byly mnohem větší než úhly vypočtené v kapitole 2.5.4 Wetting test. V tabulce 13 jsou vypočtené a změřené smáčecí úhly.

Tabulka 13: Vypočtený a změřený smáčecí úhel past

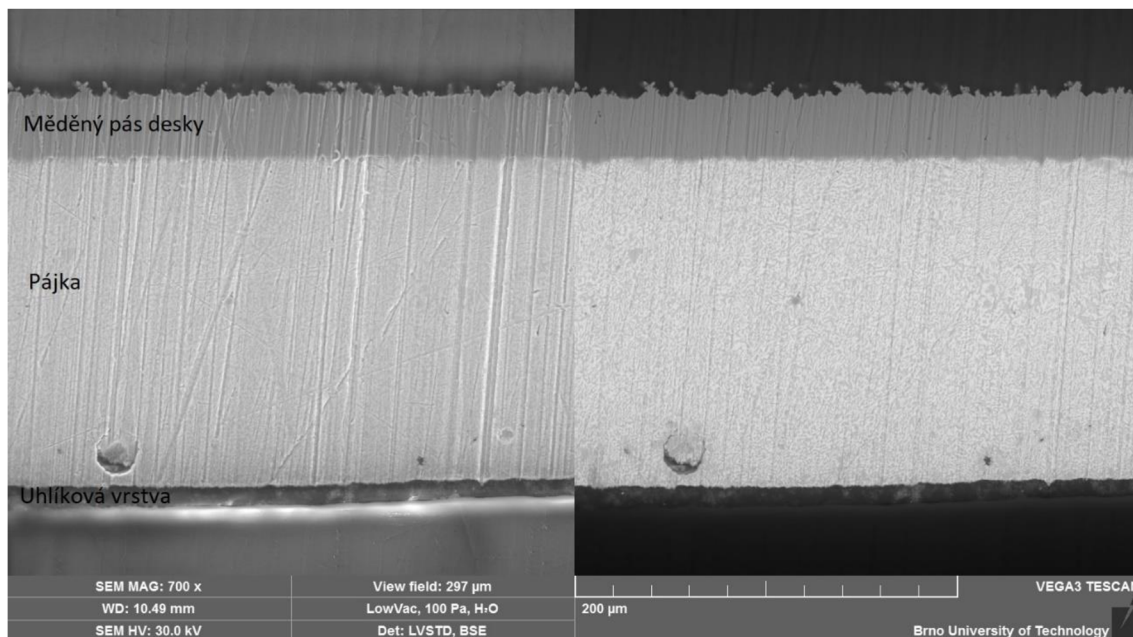
	Vypočtený úhel	Změřený úhel
	[°]	[°]
Pasta 1	3,30	8,8
Pasta 2	3,48	7,9
Pasta 3	3,43	10,8
Pasta 4	3,44	15,8

Změřené úhly byly větší než úhly vypočtené, kde se pasty 3 a 4 dostaly přes 10°. Všechny pasty ovšem i při změřených úhlech vykazovaly minimálně excelentní smáčivost a žádná pasta tak nebyla v tomto ohledu špatná.

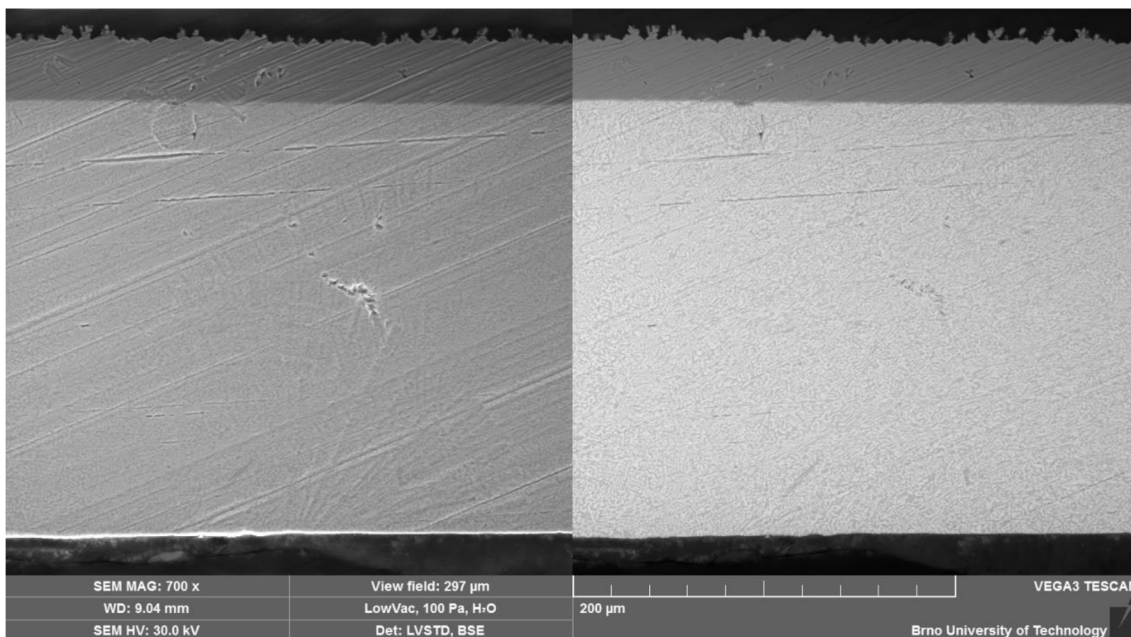
2.6.2 Prvková analýza

Pro přesné zjištění složení vzniklé vrstvy na pájce a také pro ověření výskytu nanočástic v pastách bylo nutné provést prvkovou analýzu na elektronovém mikroskopu. Analýza se prováděla na mikroskopu VEGA3XMU a pracovalo se za nízkého vakua 100 Pa a vodních par. V komoře mikroskopu se musí využívat vodních par, aby se zamezilo nabíjení vzorků.

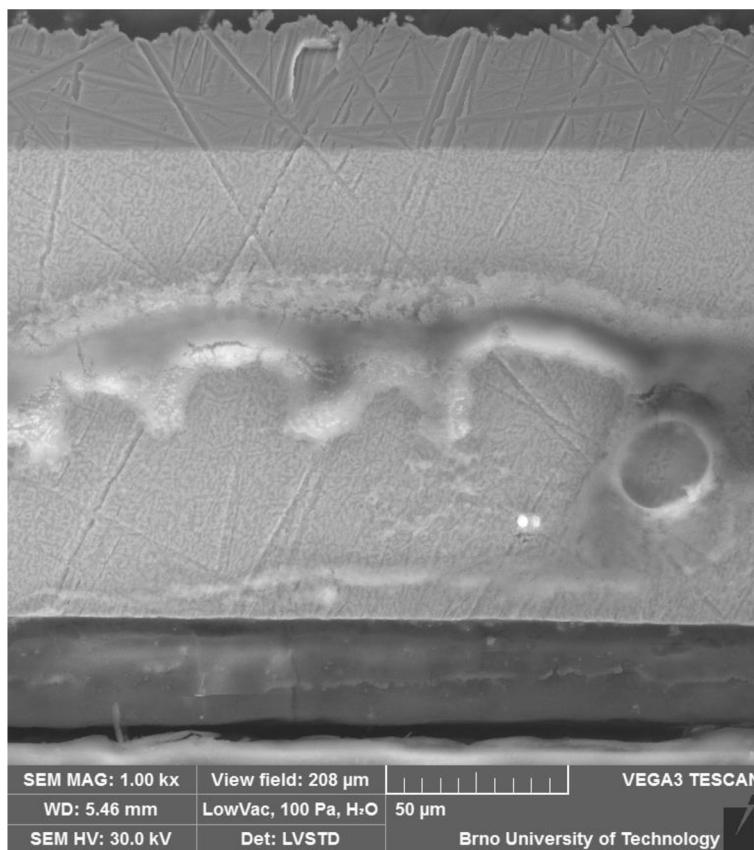
U vzorků z mikrovýbrusu se sledovala tloušťka vzniklých vrstev uhlíku, prováděla prvková analýza celého výbrusu a také pouze samotné vrstvy na povrchu pájky. Na obrázku 48 je popsáno rozložení vrstev ve snímku pasty 2. Na obrázcích 49 a 50 jsou snímky mikrovýbrusu past 3 a 4.



Obrázek 48: Mikrovýbrus pasty 2



Obrázek 49: Mikrovýbrus pasty 3



Obrázek 50: Mikrovýbrus pasty 4

Ze záběrů je patrné, že tloušťka vrstvy se zvětšovala s rostoucím počtem nanočástic v pastě (rozdílení na obrázku 50 je rozdílné od obrázku 48 a 49 – vrstva na pastě 4 tedy není tolika násobně větší). Vrstva pasty 3 nebyla výrazně větší než u pasty 2, byla ovšem méně homogenní, zatímco vrstva na pastě 4 byla širší a homogenní.

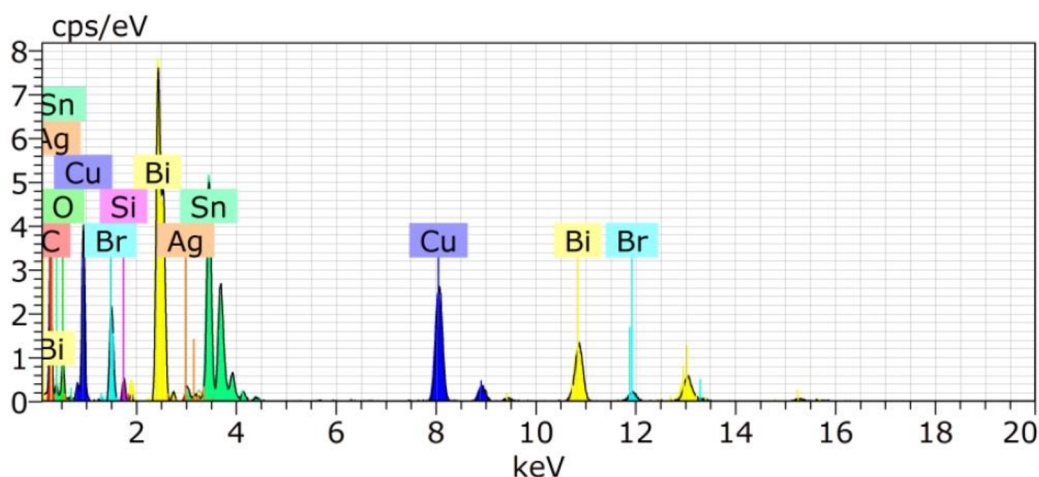
V tabulce 14 je zobrazeno 5 měření tloušťky uhlíkové vrstvy v různých místech vzorku a poté průměrná hodnota tloušťky vrstvy.

Tabulka 14: Změřená tloušťka uhlíkové vrstvy

	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4	Měření 5	Průměr
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
Pasta 2	140	136	100	108	88	114,4
Pasta 3	112	144	84	236	228	160,8
Pasta 4	280	270	270	255	247,5	264,5

Vada, která je znatelná na pastě 4 (viz. obrázek 50) je kalciová stopa, která se na vzorek dostala nedokonalým čištěním vzorku po leštění. Byla ovšem na mikroskopu prozkoumána, zdali se nejedná o vadu v pájecí pastě.

Dále se na mikrovýbrusech prováděla prvková analýza. Ve všech pastách s nanočásticemi bylo zaznamenáno stopové množství stříbra. Na obrázku 51 je prvková analýza pasty 2, tedy pasty s 0,5 % obsahem nanočástic.



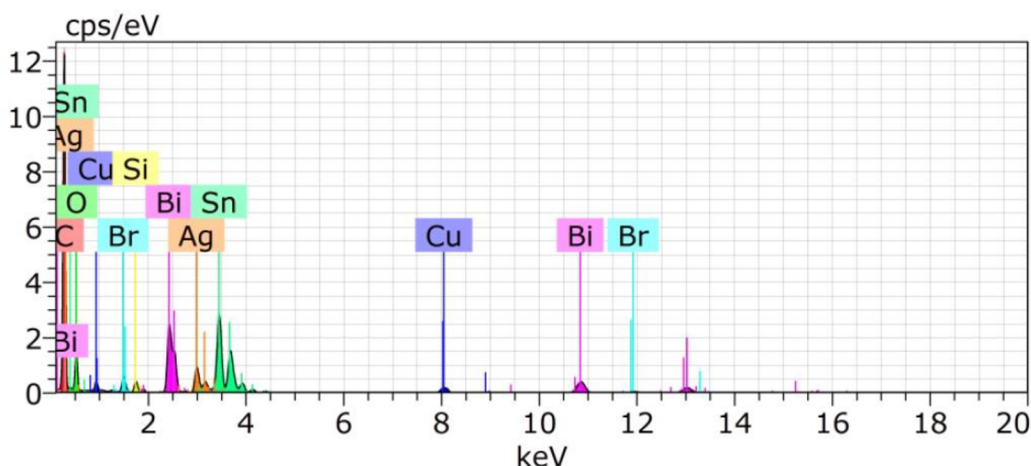
Spectrum: vz 167

Element	AN	Series	norm. [wt.%]	Atom. [at.%]	Error (3 Sigma) [wt.%]
Carbon	6	K-series	26,18	67,16	7,61
Oxygen	8	K-series	8,04	15,49	2,82
Copper	29	K-series	11,24	5,45	0,72
Bromine	35	K-series	2,96	1,14	0,27
Silicon	14	K-series	0,59	0,65	0,14
Bismuth	83	L-series	27,91	4,12	1,68
Silver	47	L-series	0,48	0,14	0,12
Tin	50	L-series	22,60	5,87	1,62
Total:			100,00	100,00	

Obrázek 51: Prvková analýza pasty 2

Tato analýza pochází z výřezu, který je na obrázku 49. Z naměřených hodnot vyplývá, že ve vzorku je přibližně 0,48 hmotnostních % stříbra což by odpovídalo množství obsaženému v pastě. Celková hodnota stříbra bude kolísat mezi jednotlivými částmi

spoje, jelikož je nepravděpodobné že se nanočástice vyskytují v celém obsahu pájky v perfektním 0,5 % zastoupení. Nanočástice mědi nelze zcela prokázat, jelikož součástí této analýzy byla také měděná FR4 deska. Podle očekávání byl nalezen cín a bismut, který je základem pájecí pasty. Obrovské množství také zabírá uhlík, který se nejvíce vyskytuje právě v černé vrstvě na povrchu vzorků, kde je současně s kyslíkem. Pro přesnější určení byla provedena prvková analýza pouze černé vrstvy na povrchu vzorku 2 (viz. obrázek 52).



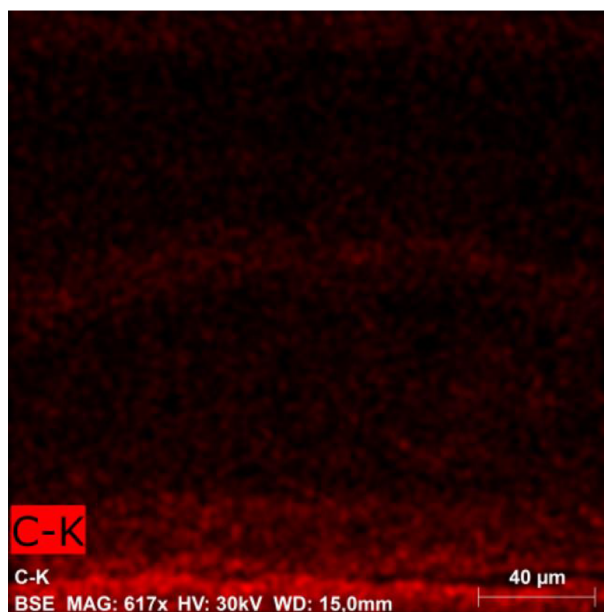
Spectrum: vz 168

Element	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (3 Sigma) [wt.%]
Carbon	6	K-series	58,34	79,91	17,53
Oxygen	8	K-series	16,07	16,53	5,65
Copper	29	K-series	0,81	0,21	0,14
Bromine	35	K-series	0,63	0,13	0,13
Bismuth	83	L-series	7,58	0,60	0,59
Silicon	14	K-series	0,66	0,39	0,16
Silver	47	L-series	2,83	0,43	0,32
Tin	50	L-series	13,07	1,81	1,13
Total:			100,00	100,00	

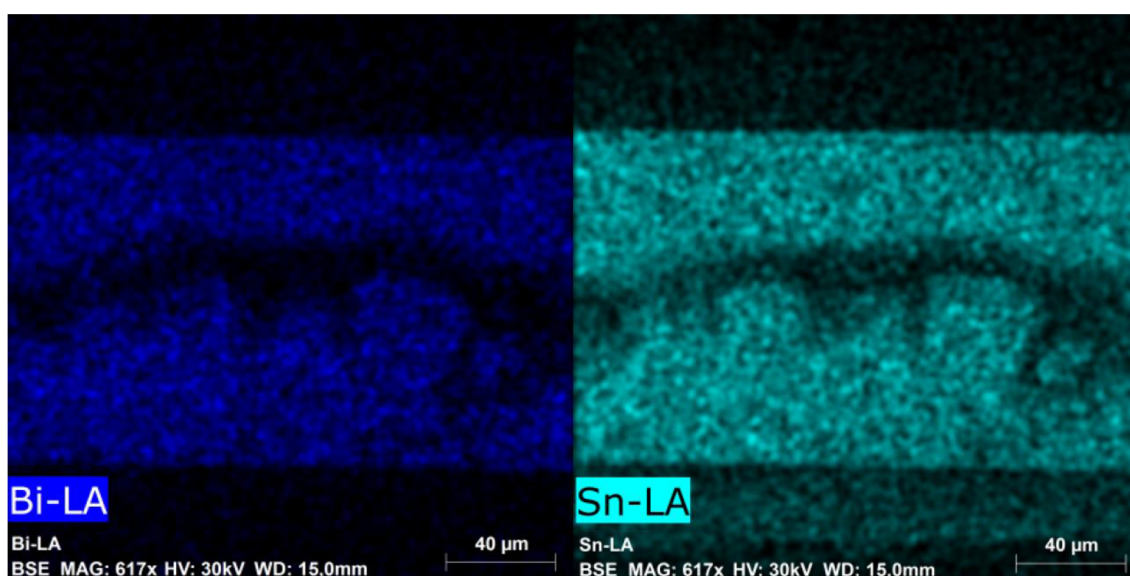
Obrázek 52: Prvková analýza uhlíkové vrstvy na povrchu vzorku pasty 2

Zde lze vidět, že tato černá vrstva je z více než 50 % zastoupena uhlíkem s kyslíkem. V černé vrstvě se také vyskytuje zvýšené množství stříbra a také stopové množství mědi a tím potvrzuje výskyt nanočástic v této vrstvě. Z výskytu cínu a bismutu je patrné, že i samotná pájecí pasta vytvořila sloučeniny v černé vrstvě.

U pasty 4 byla také provedena analýza výskytu jednotlivých prvků ve sledovaném prostoru. Následující obrázky ukazují výskyt prvků z pozorovaného výřezu pasty 4, který je na obrázku 50. Na obrázku 53 je výskyt uhlíku ve vzorku, kde je názorné, že se vyskytuje hlavně v černé vrstvě na povrchu. A na obrázku 54 lze pozorovat, že cín do vrstvy s uhlíkem prostupuje mnohem více než bismut.

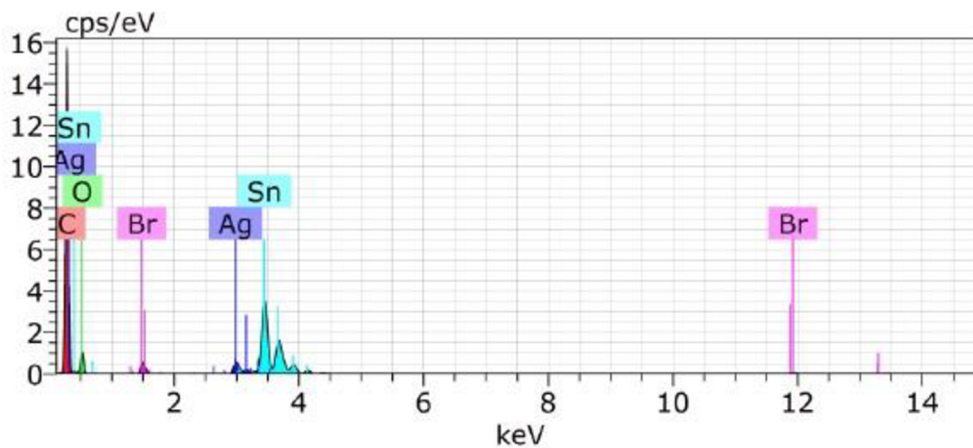
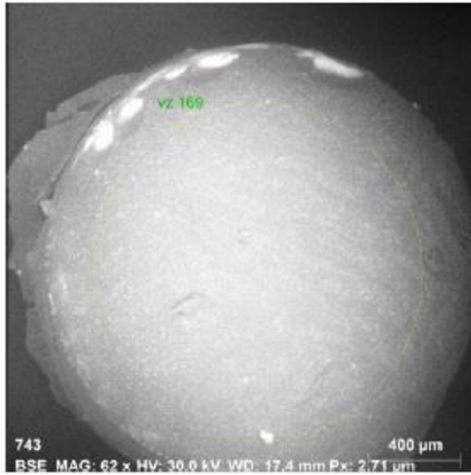


Obrázek 53: Výskyt uhlíku v pastě 4



Obrázek 54: Výskyt bismutu a cínu v pastě 4

Dále byla provedena prvková analýza z kuličky po solder ball testu pasty 3 a analýza přetavené pájky z wetting testu (jako u mikrovýbrusu), ale z vrchního pohledu (tedy přímo na černou vrstvu). Prvková analýza kuličky (viz. obrázek 55 – prvková analýza z oblasti žlutého kruhu na kuličce) potvrzuje výskyt uhlíku, stříbra a cínu v horní vrstvě kuličky. Jelikož tato analýza prochází z vrchu na kuličku a je tedy nejdál od samotné pájky, nenachází se zde žádný bismut nebo měď, což také potvrzuje že se do této vrstvy dostává spíše cín.



Spectrum: vz 169

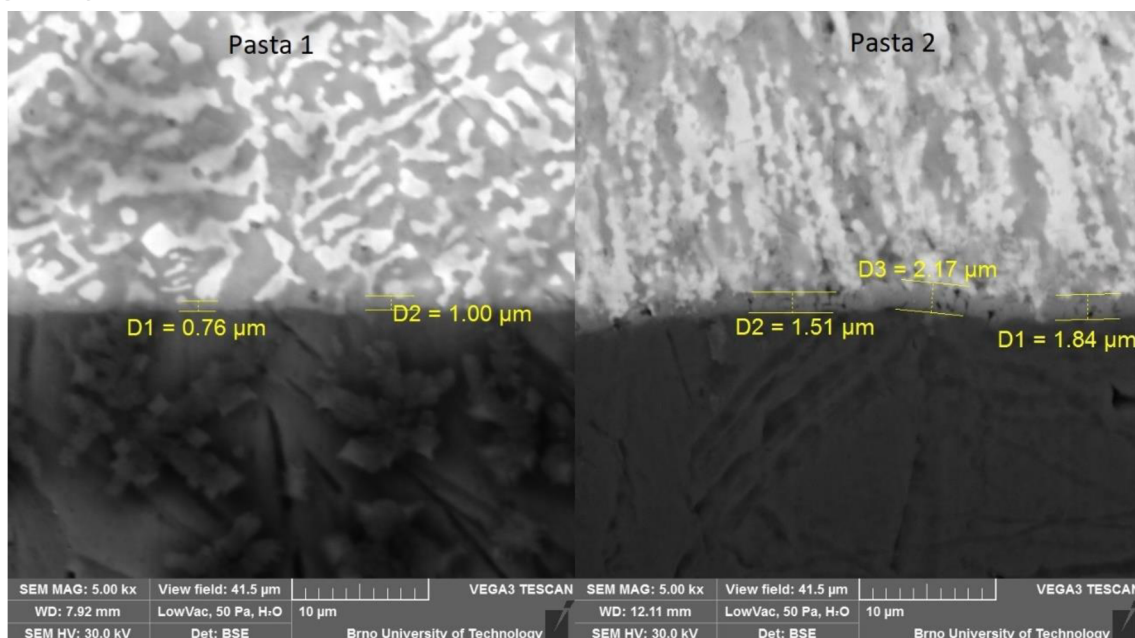
Element	AN	Series	norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Error (3 Sigma) [wt. %]
Carbon	6	K-series	76,38	85,83	25,55
Oxygen	8	K-series	15,68	13,23	6,67
Silver	47	L-series	0,64	0,08	0,14
Tin	50	L-series	6,77	0,77	0,68
Bromine	35	K-series	0,54	0,09	0,13
Total:			100,00	100,00	

Obrázek 55: Prvková analýza kuličky po solder ball testu pasty 3

Stejných výsledků se dosáhlo také analýzou pájky po wetting testu při analýze z vrchního pohledu na pájku.

2.6.3 Měření intermetalické sloučeniny

Měření intermetalické sloučeniny se provádělo na elektronovém mikroskopu při 5000 násobném zvětšení. Na obrázku 56 jsou změřené vrstvy IMC past 1 a 2, které jsou výrazně viditelné.



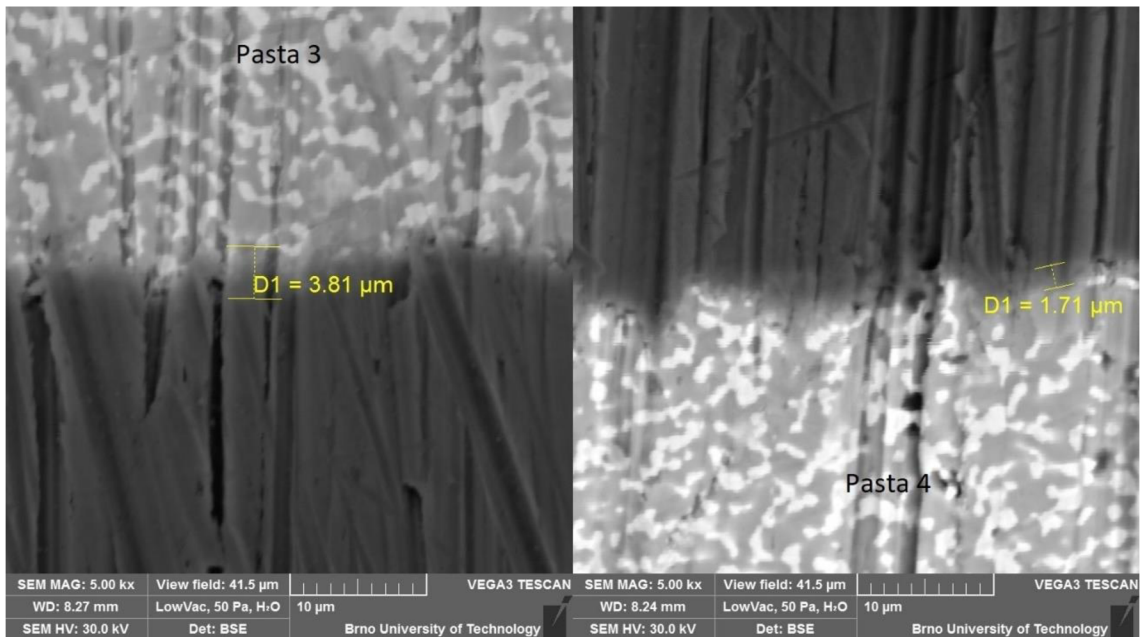
Obrázek 56: Tloušťka IMC past 1 a 2

IMC pro pastu 2 byla větší a výraznější než pro čistou pastu 1. U past 3 a 4 je IMC velice nevýrazná a změřené tloušťky jejich vrstev jsou odhadnuty (viz. Obrázek 57). V tabulce 15 jsou uvedeny průměry změřených tlouštěk IMC.

Tabulka 15: Změřené tloušťky IMC

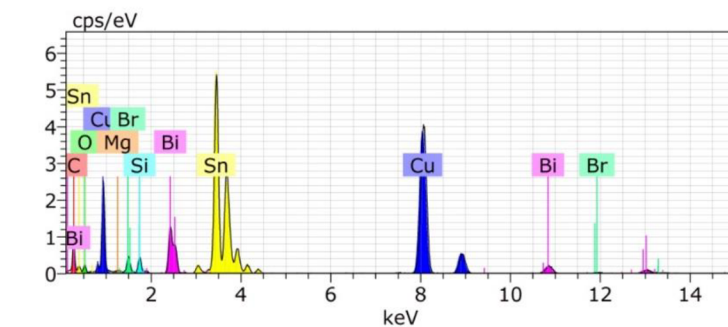
	Tloušťka [μm]
Pasta 1	0,88
Pasta 2	1,84
Pasta 3	3,81
Pasta 4	1,71

Pasta 2 s obsahem nanočástic tvořila širší vrstvu IMC a totéž se dá říct o pastách 3 a 4. Vzhledem k velice špatné viditelnosti IMC na pastách 3 a 4, ale nelze přesně určit jejich tloušťku a nedají se tak kvalitně porovnávat s pastou 1 a 2.



Obrázek 57: Tloušťka IMC pasty 3 a 4

Pro IMC pasty 2 byla provedena prvková analýza (viz. Obrázek 58) která ukazuje, že tato vrstva obsahuje více cínu a mědi než bismutu. V IMC byl nalezen také uhlík, který ale nemusí být součástí vytvořených sloučenin v IMC. Uhlík se do této vrstvy dostal pravděpodobně kontaminací při broušení a leštění.



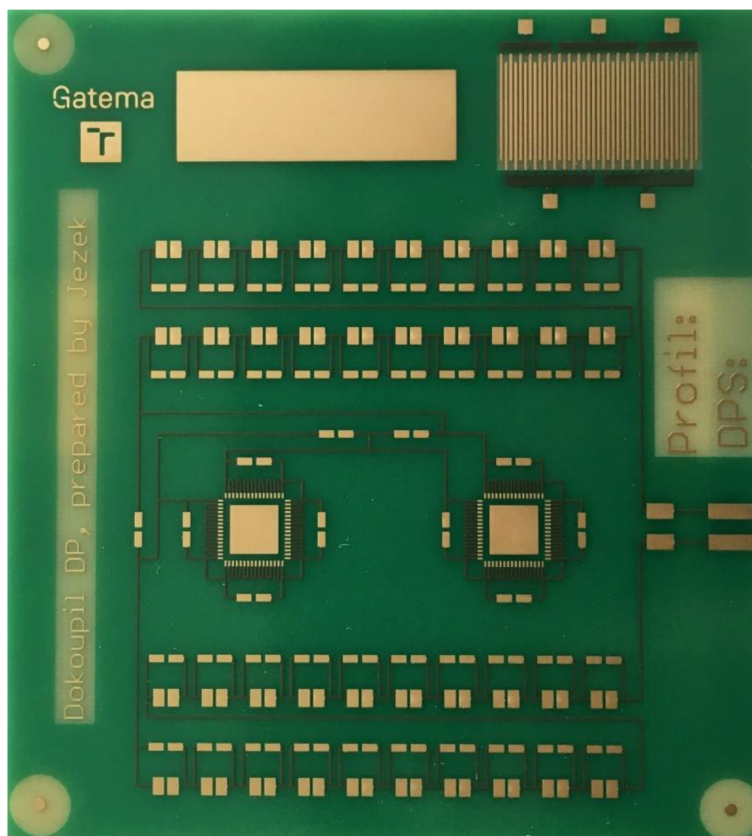
Spectrum: vz 181

Element	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (3 Sigma) [wt.%]
Carbon	6	K-series	17,88	56,24	6,66
Oxygen	8	K-series	3,83	9,04	1,82
Copper	29	K-series	30,41	18,08	2,04
Silicon	14	K-series	1,56	2,09	0,27
Bismuth	83	L-series	7,71	1,39	0,61
Tin	50	L-series	37,20	11,84	2,97
Magnesium	12	K-series	0,60	0,93	0,19
Bromine	35	K-series	0,80	0,38	0,15
Total:			100,00	100,00	

Obrázek 58: Prvková analýza IMC mikrovýbrusu pasty 2

2.7 DPS

Pro testování vzorků na mechanické a elektrické vlastnosti bylo potřeba osadit a zapájet testovací desky plošných spojů (DPS). Použité desky byly vyrobeny ve společnosti Gatema (viz. obrázek 59).

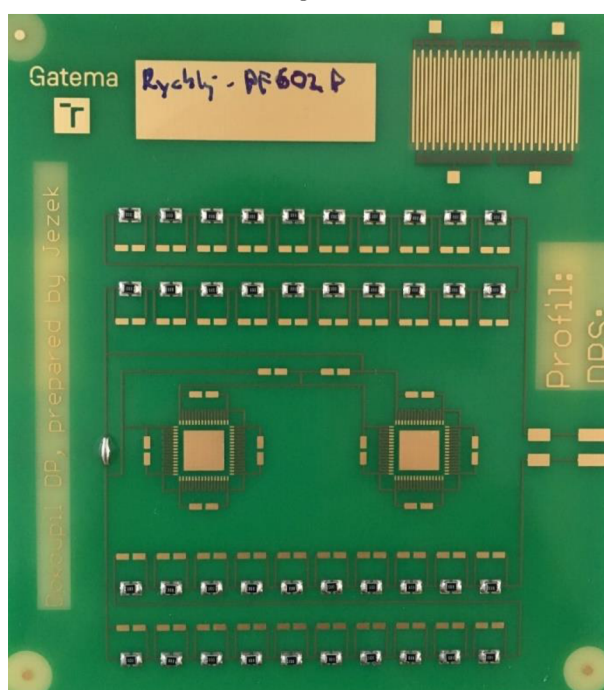


Obrázek 59: Používaná DPS

S každou pastou byla zapájena 1 deska, která obsahovala 40 nulových rezistorů 0805. Desky se tiskly ručně přes připravenou šablonu a rezistory se osazovali ručně pomocí přístroje DIMA (viz. obrázek 60). Tento přístroj nasává součástky pomocí jehly se vzduchem, které se poté umisťují do natisknuté pasty. Osazená deska se přepájela v reflow peci podle teplotního profilu s názvem DPS (viz. obrázek 32). Na desce bylo provedeno propojení vrchní a spodní strany rezistorů stejnou pastou se kterou se DPS tiskla. Pasty s nanočásticemi i zde vytvářely uhlíkové vrstvy. Na obrázku 61 lze vidět zapájenou desku pastou 1.



Obrázek 60: Zařízení pro osazování rezistorů



Obrázek 61: Zapájená DPS pasty 1

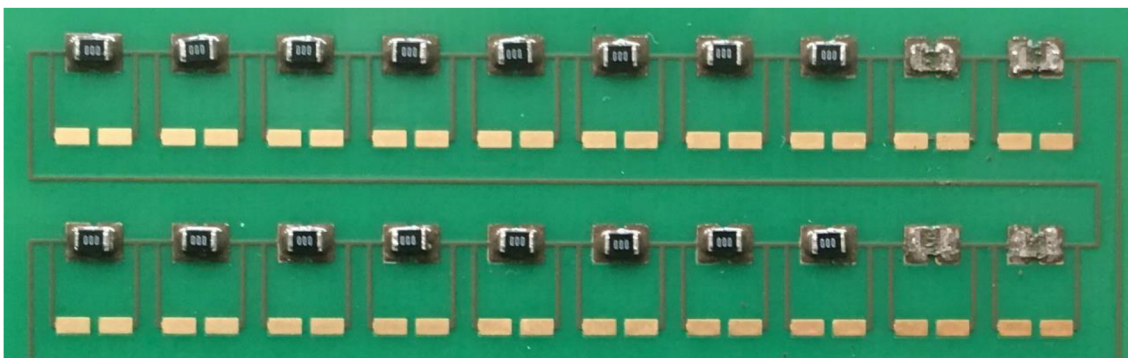
2.7.1 Elektrické zkoušky

Elektrické zkoušky měření odporu se prováděly čtyřbodovou metodou pomocí přístroje Multimetr M1T 291. Tento přístroj měří odpor na obvodu desky mezi všemi 40 rezistory. Vývody na připojení zařízení jsou na pravé straně desky, jak je vidět na obrázku 61. Měření probíhalo při temperované teplotě 30 °C v teplotní skříni Friocell 66K. Hodnoty měření jsou v ohmech uvedeny v tabulce 16.

Tabulka 16: Hodnoty odporu testovaných DPS

	Odpor [Ω]
Pasta 1	0,839
Pasta 2	0,831
Pasta 3	0,838
Pasta 4	0,916

Z naměřených hodnot se dá říci, že výsledky pro pasty 1,2 a 3 jsou stejné a jediné zvýšení odporu bylo zaznamenáno pro vzorek 4, který tvořil největší uhlíkové vrstvy na přetavené pájce. Na obrázku 62 jsou zapájené rezistory pastou 4 po trhání rezistorů.



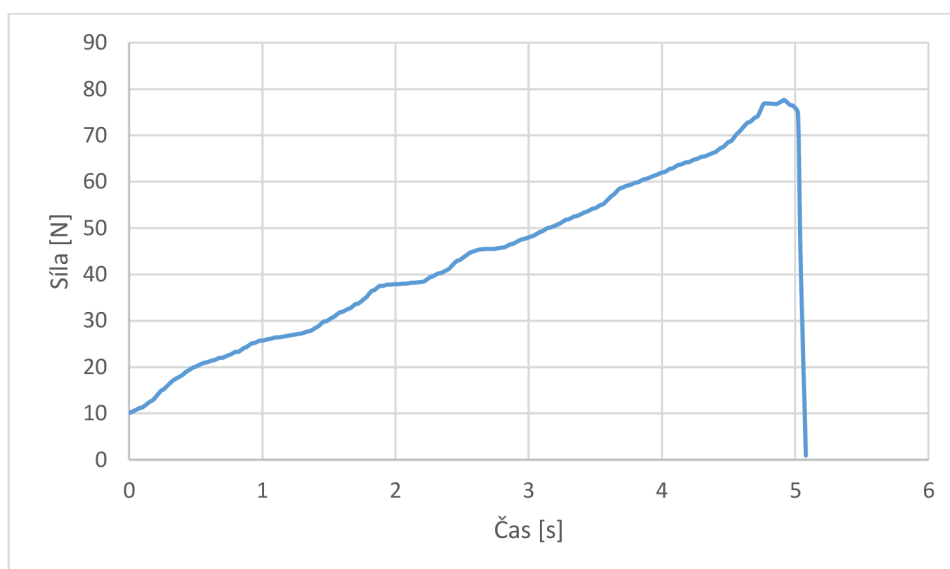
Obrázek 62: DPS zapájená pastou 4 - po trhání rezistorů

2.7.2 Mechanické zkoušky

Na všech testovaných deskách byly prováděny mechanické zkoušky pevnosti spoje. Rezistory se trhaly na ručně ovládané trhačce Wolfcraft (viz. obrázek 63), kde se síla měřila zařízením Force Gauge M5-100 – Mark 10. Deska se upevnila do držáku na pravé straně a poté se nastavilo trhací rameno k rezistoru. Rezistory se trhaly ve sloupcích (tedy po čtyřech) a poté bylo třeba posunout desku v upevňovacím zařízení. Celkově se trhalo 20 rezistorů na každé desce. Hodnota použité síly byla zaznamenávána na počítači v podobě grafu. Graf určoval, jak dlouhou dobu trvalo trhání a jaká síla byla v danou dobu vyvíjena na součástku. Příklad grafu, z trhání součástky na DPS zapájeného pastou 1, je uveden v obrázku 64.



Obrázek 63: Zařízení pro trhání rezistorů



Obrázek 64: Síla trhání v závislosti na čase – součástky na DPS zapájené pastou 1

V tabulce 17 jsou ve sloupci „Síla“ uvedeny průměrné maximální hodnoty potřebné síly k utržení rezistoru pro každý vzorek. Sloupec „Min“ označuje minimální sílu potřebnou k utržení rezistoru a sloupec „Max“ maximální potřebnou sílu. Ve sloupci „Rozptyl“ je vyčíslen rozptyl hodnot „Min“ a „Max“.

Tabulka 17: *Výsledky mechanické zkoušky*

	Síla	Min	Max	Rozptyl
	[N]	[N]	[N]	[N]
Vzorek 1	97,4	77,6	122,8	45,2
Vzorek 2	84,5	69,4	107	37,6
Vzorek 3	97,2	81,1	116,1	35
Vzorek 4	84,6	70,1	99,7	29,6

Z dosažených výsledků vidíme, že průměrné síly potřebné k utržení rezistorů se neřídí lineárně s počtem nanočástic v pastě. Zde se pasty rozřadily do dvou skupin, okolo 97 N a 84 N. S větším počtem nanočástic se snižoval rozptyl naměřených hodnot.

3. Závěr

Hlavním cílem práce byla problematika reaktivních nanočástic a jejich vliv na vlastnosti SnBi pájecích past. Byly provedeny praktické zkoušky a testování pájecích past s přidanými nanočásticemi.

V první části práce jsou rozebrány základní informace o pájecích pastách a o zkouškách, které se dají na pájecích pastách provádět. Ze standardu IPC-TM-650 byly vybrány tři základní zkoušky pájecích past, a to solder ball test, slump test a wetting test. Dále byla provedena rešerše článků zabývajících se vlivem měděných a stříbrných nanočástic na vlastnosti pájecích past. Byla uvedena problematika viskozity, stanovení základních parametrů a očekávání při měření viskozity z dostupných článků.

V praktické části práce se vmíchávaly nanočástice slitiny stříbra a mědi do pájecí pasty PF602-P (Sn42-Bi58 T3 – ROL1) v množství 0,5 %, 1 % a 2 %.

Na čisté pastě PF602-P se prováděl test viskozity a test vlivu teploty na viskozitu pájecích past. Pasta PF602-P prošla standartním testem viskozity a bylo tedy možné pokračovat s danou várkou past v dalších testech. Vliv teploty na viskozitu byl potvrzen z teoretické části. Se vzrůstající teplotou se mění viskozita pasty a zvýšení teploty o 1 až 2 °C může znamenat až 10 % snížení viskozity. Pasta již při 29 °C má o 17,5 % nižší viskozitu než při teplotě 25 °C. Je tedy potřeba kontrolovat teploty při používání pájecích past a případně při moc velké roztékavosti past při tisku, snížit teplotu a tím zvýšit viskozitu pasty. Byla také změřena viskozita pasty po přidání nanočástic a podle očekávání nanočástice zvýšily viskozitu pasty. Viskozita pasty s 1 % obsahem nanočástic byla přibližně o 70 % větší. Z tohoto důvodu bylo nutné přidat do past s 1 % a 2 % obsahem nanočástic extra tavidlo, aby se zlepšily vlastnosti pasty při tisku, které byly díky zvýšené viskozitě velice špatné. Po přidání tavidla měla pasta 4 stále špatné vlastnosti při tisku.

Pro pasty byly vytvořeny teplotní profily pro reflow pec DIMA, ve které probíhalo veškeré přetavování past. Na čisté pastě a pastách s nanočásticemi se prováděly zkoušky hot a cold slump test, solder ball test a wetting test. Čistá pasta dosahovala při cold i hot slump testu nejlepších výsledků na šablonách tloušťky 0,1 mm. Rozdíly mezi pastami s nanočásticemi na šabloně tloušťky 0,1 mm byly minimální a nejhůře dopadla pasta s 0,5% obsahem nanočástic. U šablony tloušťky 0,2 mm byly výsledky obrácené. S vyšším obsahem nanočástic klesal počet zkratových můstků. To bylo zapříčiněno hlavně zvýšenou viskozitou past s nanočásticemi, která hraje větší roli u tlustší šablony. Solder ball test byl nejlepší pro pastu s 0,5 % obsahem nanočástic a celkově si pasty s nanočásticemi vedly lépe v tomto testu než čistá pasta, jelikož tvořily mnohem menší množství sekundárních kuliček (v některých případech sekundární kuličky nevytvořily žádné). U tohoto testu bylo také pozorováno, že se zvyšujícím se obsahem nanočástic slitiny stříbra a mědi se zvyšovala teplota tavení pájecí pasty. Pro pastu s obsahem

nanočástic 0,5 % to bylo přibližně o 15 °C, pro 1 % pastu o 20 °C a pro pastu s 2 % obsahem nanočástic se pak teplota zvýšila přibližně o 26 °C. Wetting test vycházel lépe pro čistou pastu. Se zvyšujícím se počtem nanočástic se zhoršovala hladkost a homogenita povrchu pájky a také samotné roztékání.

Z předchozích testů bylo vyzpozorováno, že pasty s nanočásticemi zanechávají v tavidlových zbytcích, a také na samotném povrchu pájky a spojů, černý povlak. Pro pasty byly proto vyrobeny mikrovýbrusy a provádělo se sledování a prvková analýza vzniklé vrstvy v elektronovém mikroskopu. Tloušťka vrstvy se vzrůstajícím počtem nanočástic roste. Z prvkových analýz vyplývá, že vzniklá vrstva je z velké části uhlík s cínem a stopovým množstvím stříbra. Důvod vzniku takto velké vrstvy uhlíku je neznámý. S největší pravděpodobností se jedná o jedno z následujících dvou vysvětlení. První je, že nanočástice byly obaleny v uhlíku, aby neoxidovaly. Tento fakt ovšem není uveden v technickém listu a je to tedy věc, kterou výrobce neudává nebo se tam vyskytl chybou ve výrobě. Další možností je, že slitina stříbra a mědi reaguje s tavidlem ROL1 a vytváří uhlíkové sloučeniny, které se poté vypuzují při tavení na povrch. Tento fenomén by mohl být součástí dalšího zkoumání těchto nanočástic a také sledování vlivu uhlíkové vrstvy na kvalitu spoje po stárnutí a na vlastnosti na DPS.

U mikrovýbrusů byla změřena tloušťka IMC, která byla viditelná pouze pro pasty 1 a 2. Pasta 2 vytvořila tlustší IMC než pasta 1 a to přibližně o jeden μm . Pasty 3 a 4 tvořily neprůkaznou IMC a její tloušťka se nedala s přesností změřit. Pro IMC pasty 2 byla provedena prvková analýza, která ukázala, že se v této vrstvě vyskytuje hlavně cín a měď. Bismut je zastoupen v IMC vrstvě nejméně. Bylo také objeveno množství uhlíku, nelze ovšem zjistit, zda se vyskytuje přímo v IMC nebo pouze na povrchu mikrovýbrusu.

V posledním testu praktické části byly pasty natisknuty a osazeny na DPS pro elektrické a mechanické zkoušky. Elektrické zkoušky měření odporu na desce se 40 nulovými rezistory vyšly pro všechny pasty, až na pastu 4 s 2 % obsahem nanočástic, v blízkém rozpětí. Zatímco pro všechny pasty byl odpor v okolí 0,83 Ω , tak pro desku zapájenou pastou 4 byl odpor v okolí 0,91 Ω . Mechanické testy prokázaly, že pasty s nanočásticemi nijak extrémně neovlivňují průměrnou hodnotu síly potřebnou k utržení součástky, ale se zvyšujícím se počtem nanočástic v pastě se zmenšoval rozptyl těchto sil.

Z výsledků diplomové práce lze vyvodit, že nanočástice ovlivňují pájecí pastu v některých oblastech pozitivně a v jiných negativně. Rozhodně se dá říci, že 2 % obsah nanočástic slitiny stříbra a mědi je příliš velké množství a pájecí pasta se zhoršila průměrně mnohem více než se zlepšila. Nejlépe dopadla pasta s obsahem nanočástic 0,5 %. Tato pasta ještě pořád měla dobré vlastnosti čisté SnBi pasty (např.: roztékavost, smáčecí úhel a dobré vlastnosti při tisku), ale také získala dobré vlastnosti, které pocházejí z přidání nanočástic (např.: lepší výsledky solder ball testu). Dalším výzkumem by bylo

potřebné zjistit, jak vzniklá uhlíková vrstva ovlivní pájecí pastu, spoje, desky a podobně za delší dobu, a jak ji ovlivňuje zejména v oblasti elektrických vlastností na DPS. Maximální množství pasty by ovšem mělo být 1 % aby se zamezilo problémům s tiskem pasty. Měření by se mělo zaměřit na ještě menší než 0,5% obsah nanočástic. Je možné, že menší množství těchto nanočástic bude přinášet lepší výsledky, jelikož nebude trpět hlavně zvýšenou viskozitou a zvýšenou teplotou přetavení, kterou všechny vzorky s těmito nanočásticemi prodělaly.

Literatura

- [1] STARÝ, Jiří a Miroslav ZATLOUKAL. *Montážní a propojovací technologie* [online]. 2014. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014. [cit. 2016-12-15]
- [2] *Nevo-Solder* [online]. 2016 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://www.nevo-solder.com/datasheets-and-technical-documents/>
- [3] LIU, Johan, Cristina ANDERSSON, Yulai GAO a Qijie ZHAI. Recent Development of Nano-solder Paste for Electronics Interconnect Applications. *2008 10th Electronics Packaging Technology Conference* [online]. IEEE, 2008, , 84-93 [cit. 2016-12-15]. DOI: 10.1109/EPTC.2008.4763416. ISBN 978-1-4244-2117-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4763416/>
- [4] LIU, Ping, Xiaolong GU, Haifeng FU a Yang LIU. The effects of Cu nanoparticles addition in Sn-3.0Ag-0.5Cu solder paste on the microstructure and shear strength of the solder joints. *2016 17th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)* [online]. IEEE, 2016, , 852-855 [cit. 2016-12-15]. DOI: 10.1109/ICEPT.2016.7583264. ISBN 978-1-5090-1396-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7583264/>
- [5] BUKAT, Krystyna, Marek KOSCIELSKI, Janusz SITEK, Malgorzata JAKUBOWSKA a Anna MLOZNIAK. Properties of the SAC solder paste with different nanoparticles. *Proceedings of the 2011 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* [online]. IEEE, 2011, , 537-541 [cit. 2016-12-15]. DOI: 10.1109/ISSE.2011.6053944. ISBN 978-1-4577-2111-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6053944/>
- [6] SHAFIQ, I., Y.C. CHAN, Janusz SITEK, Malgorzata JAKUBOWSKA a Anna MLOZNIAK. Improved electro-migration resistance in nano Ag modified Sn-58Bi solder joints under current stressing. *2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering* [online]. IEEE, 2011, , 374-379 [cit. 2016-12-15]. DOI: 10.1109/ICQR2MSE.2011.5976634. ISBN 978-1-4577-1229-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5976634/>
- [7] KOSCIELSKI, Marek, Krystyna BUKAT, Malgorzata JAKUBOWSKA a Anna MLOZNIAK. Application of silver nanoparticles to improve wettability of SnAgCu solder paste. *33rd International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2010* [online]. IEEE, 2010, , 473-477 [cit. 2016-12-15]. DOI: 10.1109/ISSE.2010.5547345. ISBN 978-1-4244-7849-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5547345/>
- [8] *IPC – Association Connecting Electronics Industries* [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <https://www.ipc.org/test-methods.aspx>

[9] DUSEK, Karel, Ivana BESHAIJOVA PELIKANNOVA, David BUSEK a Marek ZEIDLER. Measurements of solder paste viscosity during its tempering and aging. In: *Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology* [online]. IEEE, 2014, s. 189-192 [cit. 2017-12-13]. DOI: 10.1109/ISSE.2014.6887590. ISBN 978-1-4799-4455-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6887590/>

[10] PELC, M. *Výzkum spolehlivost bezolovnatých pájených spojů – diplomová práce*. Brno, 2011. 80 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc. FEKT VUT v Brně

Seznam obrázků

Obrázek 1: Fázový diagram Sn-Pb [1]	9
Obrázek 2: Doporučený reflow profil pasty Sn63-Pb37 [2].....	10
Obrázek 3: Ternární diagram SAC [1]	10
Obrázek 4: Doporučený reflow profil pasty SAC-305 [2]	11
Obrázek 5: Doporučený reflow profil pasty SnBi [2]	11
Obrázek 6: Vliv množství nanočástic SAC na pevnost ve střihu pasty Sn-Bi [3].....	13
Obrázek 7: Nanočástice Cu v pájce SAC – SEM [4]	14
Obrázek 8: Velikost střižné síly v závislosti na počtu nanočástic [4]	14
Obrázek 9: Vliv množství nanočástic na kvalitu spoje (a) SAC305 (b) SAC305+0,5%Cu (c) SAC305+1%Cu (d) SAC305+3%Cu [4]	15
Obrázek 10: Vliv teploty a množství nanočástic na plochu roztékání [5].....	15
Obrázek 11: Rozdíl maximální síly střihu mezi obyčejnou Sn-Bi pastou a Sn-Bi pastou s 2 %wt Ag [6].....	16
Obrázek 12: Mikrostruktura Ag ₃ Sn vytvořená ve spoji při 4 % obsahu 21 nm nanočástic v pastě [7]	17
Obrázek 13: Možné výsledky solder ball testu [8]	18
Obrázek 14: Destička č.1 na slump test [8]	19
Obrázek 15: Destička č.2 na slump test [8]	19
Obrázek 16: Zařízení na míchání pájecí pasty.....	24
Obrázek 17: Na levém obrázku pasta před mícháním, na pravém po míchání	25
Obrázek 18: Balení pasty do nádobek	25
Obrázek 19: Nádoba s nanočásticemi.....	27
Obrázek 20: Vsypávání nanočástic do připravených vzorků	28
Obrázek 21: Centrifuga	29
Obrázek 22: Pasta 4 s tavidlem	30
Obrázek 23: Viskozimetr Malcom PCU-203	31
Obrázek 24: Výsledky měření viskozity Obrázek 25: Centrifuga.....	32
Obrázek 26: Zařízení Medingen E20 na ohřívání pasty	33
Obrázek 27: Kontrola teploty pasty rtuťovým teploměrem	34
Obrázek 28: Příklad měření teplotních profilů	36
Obrázek 29: Teplotní profil na keramické desce.....	37
Obrázek 30: Teplotní profil na měděné desce pro PF602-P (pasta 1).....	38

Obrázek 31: Zvýšený teplotní profil na měděné desce.....	38
Obrázek 32: Profil pro pájení DPS	39
Obrázek 33: Detail tisku pasty 3 přes 0,1 mm šablonu	41
Obrázek 34: Natisknuté pasty přes šablonu.....	42
Obrázek 35: Solder ball test pasty 1	44
Obrázek 36: Solder ball test pasty 2	44
Obrázek 37: Solder ball test pasty 3	45
Obrázek 38: Solder ball test pasty 4	45
Obrázek 39: Zbytky pasty po neúplném přetavením pasty 4	47
Obrázek 40: Kuličky solder ball testu všech past.....	47
Obrázek 41: Natisknuté pasty přes šablonu.....	48
Obrázek 42: Očištěný vzorek pasty 4	49
Obrázek 43: Vzorek zalitý dentacrylem ve formě.....	51
Obrázek 44: Vzorky po broušení a leštění.....	51
Obrázek 45: Rotační bruska a leštička Metasimex a vzadu čistička Kraittek	52
Obrázek 46: Výsledný mikrovýbrus pasty 2 v optickém mikroskopu	53
Obrázek 47: Smáčecí úhel pasty 1	53
Obrázek 48: Mikrovýbrus pasty 2	54
Obrázek 49: Mikrovýbrus pasty 3	55
Obrázek 50: Mikrovýbrus pasty 4	55
Obrázek 51: Prvková analýza pasty 2	56
Obrázek 52: Prvková analýza uhlíkové vrstvy na povrchu vzorku pasty 2	57
Obrázek 53: Výskyt uhlíku v pastě 4	58
Obrázek 54: Výskyt bismutu a cínu v pastě 4	58
Obrázek 55: Prvková analýza kuličky po solder ball testu pasty 3	59
Obrázek 56: Tloušťka IMC past 1 a 2	60
Obrázek 57: Tloušťka IMC past 3 a 4	61
Obrázek 58: Prvková analýza IMC mikrovýbrusu pasty 2	61
Obrázek 59: Používaná DPS.....	62
Obrázek 60: Zařízení pro osazování rezistorů.....	63
Obrázek 61: Zapájená DPS pasty 1	63
Obrázek 62: DPS zapájená pastou 4 - po trhání rezistorů	64
Obrázek 63: Zařízení pro trhání rezistorů.....	65

Obrázek 64: Síla trhání v závislosti na čase – součástky na DPS zapájené pastou 1..... 65

Seznam tabulek

Tabulka 1: Naměřené hodnoty vlivu teploty na viskozitu pájecích past [9]	22
Tabulka 2: Vzorky pasty s nanočásticemi	28
Tabulka 3: Vliv viskozity na pastu	34
Tabulka 4: Viskozita pasty 4 před přidáním tavidla.....	35
Tabulka 5: Viskozita pasty 4 po přidáním tavidla	35
Tabulka 6: Vyhodnocení výsledků pro pastu 1 (PF602-P).....	40
Tabulka 7: Vyhodnocení výsledků pro pastu 4	41
Tabulka 8: Výsledky cold slump testu	42
Tabulka 9: Výsledky hot slump testu	43
Tabulka 10: Teploty formování primární kuličky past.....	46
Tabulka 11: Výsledky wetting testu	49
Tabulka 12: Určování bodů při wetting testu	49
Tabulka 13: Vypočtený a změřený smáčecí úhel past.....	54
Tabulka 14: Změřená tloušťka uhlíkové vrstvy	56
Tabulka 15: Změřené tloušťky IMC	60
Tabulka 16: Hodnoty odporu testovaných DPS	64
Tabulka 17: Výsledky mechanické zkoušky	66

Seznam symbolů a zkratk

SnBi	pájecí slitina ve složení cín a bismut
SnPb	pájecí slitina ve složení cín a olovo
SAC	pájecí slitina ve složení cín, stříbro, měď
IPC-TM	Association Connecting Electronics Industries® test methods
Ag	stříbro – chemická značka
Cu	měď – chemická značka
Sn	cín – chemická značka
Bi	bismut – chemická značka
C	uhlík – chemická značka
Ni	nikl – chemická značka
Co	kobalt – chemická značka
Mo	molybden – chemická značka
Zn	zinek – chemická značka
Br	brom – chemická značka
FR-4	typ základního materiálu desek plošných spojů
Wt%	hmotnostní procento
η	dynamická viskozita
τ	tečné napětí
DPS	deska plošných spojů
PCB	printed circuit board
RSS	Ramp Soak Spike – sedlový teplotní profil
IMC	intermetalická sloučenina – Intermetallic Compound