



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie

Elektricky vodivé spoje

The Electrically Conductive Joins

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí projektu: Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D.

Jakub Slavata

Praha 2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Slavata** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **466341**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Elektricky vodivé spoje

Název bakalářské práce anglicky:

The Electrically Conductive Joins

Pokyny pro vypracování:

1. Uveďte a popište vlastnosti a materiály pájek a elektricky vodivých lepidel, které se používají pro vytváření elektricky vodivých spojů.
2. Popište technologie používané pro pájení a vodivé lepení.
3. Porovnejte pájené a lepené spoje z různých hledisek (např. z pohledu používaných technologií, vlastností atd.).
4. Vytvořte vzorky s pájenými a lepenými spoji s různými typy pájek a lepidel. Měřte a vyhodnotte parametry vodivých spojů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Mach, P., Skočil, V., Urbánek, J.: Montáž v elektronice, ČVUT Praha 2001
- [2] Žalská, P.: Stárnutí spojů vytvořených elektricky vodivými lepidly, diplomová práce, ČVUT, Praha 2017
- [3] Ebnesajjad, S.: Handbook of Adhesives and Surface Preparation – Technology, Applications and Manufacturing, 2011, ISBN: 978-1-4377-4461-33.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **05.02.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Řípka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení autora práce

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne _____

Podpis autora práce

Poděkování

Rád bych poděkoval paní Ing. Ivaně Beshajové, Ph.D. za odborné a pedagogické vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat všem lidem, které jsem během měření potkával v laboratoři, za příjemné pracovního prostředí a v neposlední řadě bych chtěl také poděkovat mé rodině za podporu během celého studia na ČVUT.

V Praze dne _____

Podpis autora práce

Anotace

Cílem této bakalářské práce je seznámení čtenáře s vlastnostmi pájených a elektricky vodivých lepených spojů. V teoretické části jsou uvedeny základní požadavky na elektricky vodivé spoje, jejich vlastnosti, materiály, ze kterých jsou tvořeny, výhody a nevýhody použití různých materiálů a používané technologie. Praktická část je zaměřena na přípravu vzorků, měření elektrických a mechanických parametrů, popis pracoviště a na vyhodnocení výsledků měření. Samotné vyhodnocení je zaměřeno na srovnávání elektricky vodivých spojů z hlediska použitých rezistorů, povrchové úpravy desek plošných spojů (DPS) a použitého materiálu k vytvoření samotného spoje. Spoje byly vytvořeny z pájek typu SAC, SnBi a z lepidel 70MN, 12 LVT.

Annotation

A goal of the bachelor thesis is to introduce the reader with characteristics of electrically conductive joins, which are made of solders or electrically conductive adhesives. Theoretical part of this thesis is focused on basic requirement of electrically conductive joins, its characteristics, materials which are used for it, pros and cons of various materials and used technology. Practical part is focused on preparation of samples, measurement of electrical and mechanical parameters, description of workplace and assessment of measured results. The assessment is focused on comparison of electrically conductive joins from point of view of used resistors, surface finishing of printed circuit boards (PCB) and material which is used for creation of the join. The joins were created from solders (SAC, SnBi) and from adhesives (70MN, 12 LVT).

Klíčová slova

elektricky vodivé spoje, pájení, pájka, intermetalické vrstvy, tavidla, elektricky vodivá lepidla, materiály pro zhotovení elektricky vodivých spojů, povrchové úpravy DPS, metody pájení, srovnání vlastností pájek a elektricky vodivých lepidel

Key words

electrically conductive joins, soldering, solder, intermetallic structures, fluxes, electrically conductive adhesives, materials for creations of electrically conductive joins, surface finishing of PCB, soldering methods, comparison of solders and electrically conductive adhesives

Obsah

OBSAH.....	6
1 ÚVOD	8
2 TEORETICKÁ ČÁST	9
2.1 PÁJENÉ SPOJE.....	9
2.1.1 Pájení.....	9
2.1.2 Intermetalické vrstvy	10
2.1.3 Tavidla	10
2.1.4 Materiály pro zhotovení pájených spojů (pájky)	11
2.1.5 Olovnaté / bezolovnaté pájení	11
2.1.6 Pájecí slitiny.....	12
2.1.6.1 Slitiny Sn-Ag	12
2.1.6.2 Slitiny Sn-Cu	12
2.1.6.3 Slitiny Sn-Ag-Cu (SAC)	12
2.1.6.4 Slitiny Sn-Bi	12
2.1.7 Pájecí pasty	13
2.2 LEPENÉ SPOJE.....	13
2.2.1 Složení elektricky vodivých lepidel.....	14
2.2.2 Materiály pro zhotovení lepených spojů	15
2.2.2.1 Stříbro (Ag)	15
2.2.2.2 Zlato (Au)	15
2.2.2.3 Měď (Cu).....	16
2.2.2.4 Nikl (Ni).....	16
2.2.2.5 Grafit	16
2.3 POVRCHOVÉ ÚPRAVY DPS.....	16
2.3.1 OSP (Organic Surface Protectives).....	17
2.3.2 Pocínování – HASL (Hot Air Surface Levelling).....	17
2.3.3 Postříbření – IS (Immersion Silver).....	18
2.3.4 Pozlacení – ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)	18
2.4 TECHNOLOGIE SPOJOVÁNÍ (PÁJENÍ A LEPENÍ)	19
2.4.1 Pájení vlnou (FLOW)	19
2.4.1.1 Nanášení tavidla	19
2.4.1.2 Předehřev	20
2.4.1.3 Vlna.....	20
2.4.1.4 Chlazení	21
2.4.1.5 Čištění.....	21
2.4.2 Pájení přetavením (REFLOW)	21
2.4.2.1 Pájení vedením tepla	22
2.4.2.2 Pájení prouděním tepla (konvekční).....	22
2.4.2.3 Pájení infračervenými zářiči.....	23
2.4.2.4 Pájení kondenzací par.....	23
2.4.2.5 Pájení laserem	24
2.5 VLASTNOSTI PÁJENÝCH A LEPENÝCH SPOJŮ	24
3 PRAKTICKÁ ČÁST	26
3.1 EXPERIMENT	26
3.1.1 Popis experimentu.....	26
3.1.2 Materiály použité pro vytvoření elektricky vodivých spojů.....	27
3.1.3 Použité povrchové úpravy pro DPS typu FR4.....	29

3.1.4	<i>Použité nulové SMD rezistory</i>	29
3.1.5	<i>Popis použitého vybavení</i>	30
3.1.6	<i>Očekávání</i>	34
3.2	NAMĚŘENÁ DATA	36
3.2.1	<i>Elektrické vlastnosti</i>	36
3.2.2	<i>Mechanické vlastnosti</i>	39
3.3	SROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ	41
3.3.1	SAC	41
3.3.2	<i>SnBi – nová (AMTECH)</i>	46
3.3.3	<i>SnBi – stará (Senju)</i>	51
3.3.4	AX 70 MN	54
3.3.5	12LVT	59
3.3.6	<i>Statistické hodnoty</i>	62
3.4	VYHODNOCENÍ VLASTNOSTÍ	64
4	ZÁVĚR	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ	70
	SEZNAM TABULEK	71
	SEZNAM ZKRATEK	72
	CITOVANÁ LITERATURA	73

1 Úvod

Elektricky vodivé spoje jsou neodmyslitelnou součástí veškerých elektrických zařízení, bez kterých se v dnešním světě neobejdeme. Jsou to zařízení, jako například počítače, mikro kontroléry, mobilní telefony, televize nebo třeba mikrovlnné trouby. Všechny elektrické zařízení se skládají z jednotlivých součástí (komponent), které zajišťují správnou funkci daného zařízení. Tyto komponenty musí být mezi sebou vhodným způsobem propojeny, aby mezi nimi byl zajištěn přenos informace ve formě elektrické energie. Jako rozhraní pro spojení mezi jednotlivými komponenty slouží desky plošných spojů (DPS), ke kterým jsou dané komponenty připevněny pomocí elektricky vodivých spojů. Tyto spoje jsou provedeny tak, aby umožnily maximálně bezztrátový přenos elektrické energie (informace) a zároveň zajistily mechanické upevnění dané komponenty k desce plošných spojů. Na elektricky vodivé spoje jsou kladeny vysoké nároky z hlediska elektricky vodivých a mechanických vlastností, a to zejména proto, že jsou nejčastějším místem v elektrickém obvodu, na kterém dochází k značným ztrátám, a zároveň jsou nejčastějším místem poruchy z důvodu nedostatečné mechanické odolnosti proti vibracím či nárazům.

Elektricky vodivé spoje se nejčastěji vytvářejí pomocí pájení. Přibližně do roku 2006 byly nejrozšířenější pájky na bázi cín-olovo, které byly nařízením Evropského parlamentu zakázány. Jedná se o nařízení RoHS, které bylo schváleno v roce 2003 a vešlo v platnost v roce 2006. Proto se začal klást důraz na vývoj nových možností spojení, která nepoužívají olovnaté látky. Výsledkem tohoto vývoje je vytváření spojů pomocí bezolovnatých pájek a elektricky vodivých lepidel. Technologie lepených spojů má oproti pájeným spojům stále mnoho nevýhod, jako například horší elektrickou vodivost, menší mechanickou pevnost, absence vlastnosti smáčení a také vyšší cenu. I přesto vodivá lepidla v současné době nemají v jistých aplikacích žádný substitut. Mezi tyto aplikace patří zejména spojování součástek, které nesnesou vysoké teploty, jelikož lepené spoje nepotřebují k vytvrzování tak vysoké teploty, jako spoje pájené. Toho je například využito při kontaktování LCD displejů. Další velkou výhodou vodivých lepidel je možnost anizotropní vodivosti, které lze využít při velmi malé rozteči mezi vývody.

Kvalita elektricky vodivých spojů je ovlivněna použitými technologiemi, materiály, povrchovou úpravou DPS a padů samotných součástek, které mají být k DPS připojeny.

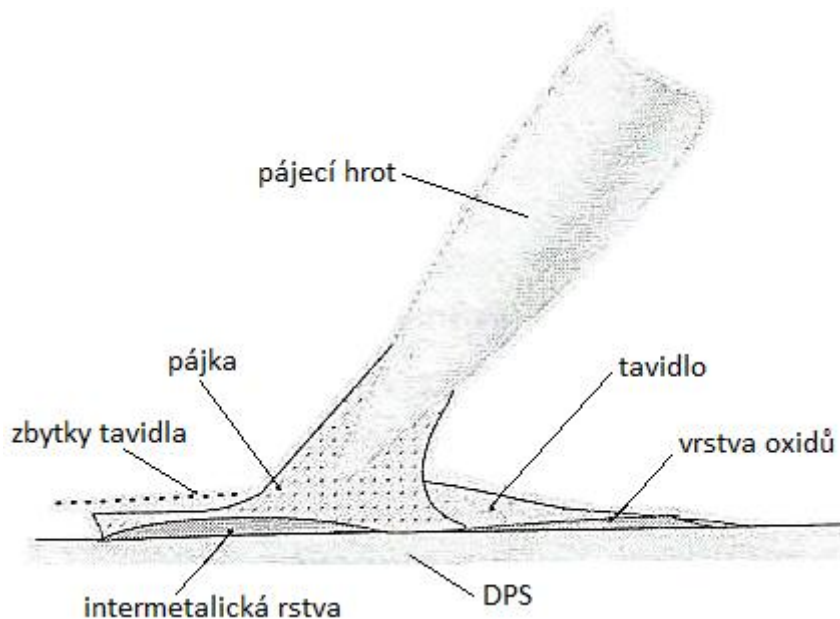
2 Teoretická část

2.1 Pájené spoje

2.1.1 Pájení

Pájení je proces, při kterém dochází k spojení dvou kovových částí pomocí přidaného materiálu (pájky). Lze využít několika druhů pájek, které se volí podle vlastností, jež jsou vyžadovány od pájeného spoje. Atomy, které jsou na povrchu základních materiálů (spojovaných kovů), se promísí s atomy roztavené pájky, čímž dojde ke vzniku intermetalické vrstvy. Tato vrstva zajistí mechanické a elektricky vodivé propojení dvou různých materiálů kovového charakteru. Pájení se dělí na měkké a tvrdé, přičemž v oblasti elektrotechnické montáže se používá hlavně pájení měkké, kterým se tato práce bude nadále zabývat. Toto pájení se vyznačuje tím, že jsou k sobě pomocí pájky připojovány různé součástky, přičemž se taví a tuhne pouze pájka. Teploty tohoto pájení nepřesahují 450 °C a základní materiál je vždy ohřátý na nižší teplotu, než je jeho teplota tání. Takovýto teplot je dosaženo například odporovým ohřevem. [1] [2] [3]

Pájení lze realizovat vícero způsoby, ale vždy v podstatě stačí dodat roztavenou pájku na místo, na kterém má vzniknout elektricky vodivý spoj. Toho dosáhneme například při ručním pájení, při kterém hrotem mikropájky nahřejeme místo určené k pájení, a poté do tohoto místa přidáme pájku v podobě trubičkového drátu, kterou přetavíme. Dále je také možné použít například strojní pájení vlnou, při kterém je spodní okraj desky plošných spojů smáčen v roztavené pájce, nebo lze použít metodu přetavení, při které se na pájecí plošky nanese pájecí pasta, která se nechá přetavit v peci.

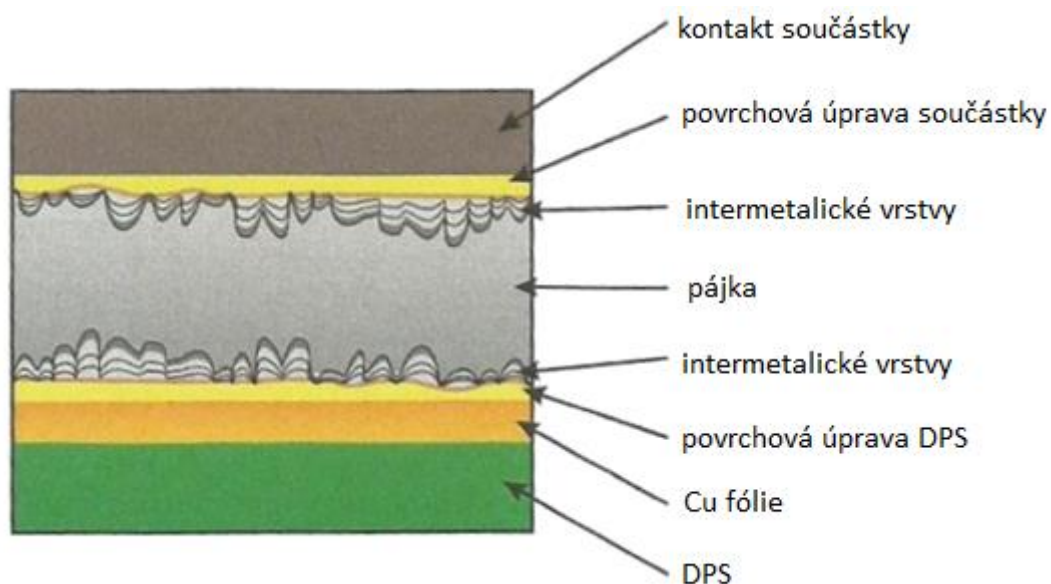


Obr. 1 Detail pájecího hrotu [4]

Obdobou pájení je svařování, u kterého má přidaný materiál většinou stejné chemické složení jako materiál základní. Oba tyto materiály jsou při svařování roztaveny a spojeny, čímž dojde ke vzniku sváru. Při svařování je tedy nutno dosáhnout mnohonásobně vyšších teplot než při měkkém pájení, proto je třeba využít speciálních zdrojů tepla. Těmito zdroji může být například elektrický oblouk (svařování s obalovanou elektrodou) nebo plazmový hořák.

2.1.2 Intermetalické vrstvy

Intermetalické vrstvy jsou sloučeniny minimálně dvou odlišných prvků kovového charakteru, které vznikají na rozhraní dvou spojovaných materiálů. Právě tyto sloučeniny vytváří adhezí vrstvu, která zajistí mechanické a elektricky vodivé propojení dvou různých kovových materiálů. Vlastnosti tohoto propojení závisí na mikrostruktuře nově vzniklého spoje, která je ovlivněna samotným procesem pájení a pozdějším stárnutím. Příliš velká tloušťka této vrstvy nebo její absence negativně ovlivňuje spolehlivost spojů. Při absenci této vrstvy nedojde k metalurgickému spojení naopak její nadměrná tloušťka způsobí zvýšenou křehkost pájeného spoje. Velikost intermetalické vrstvy je úměrná teplotě a času, po který tato teplota působí na spojované materiály. [2]



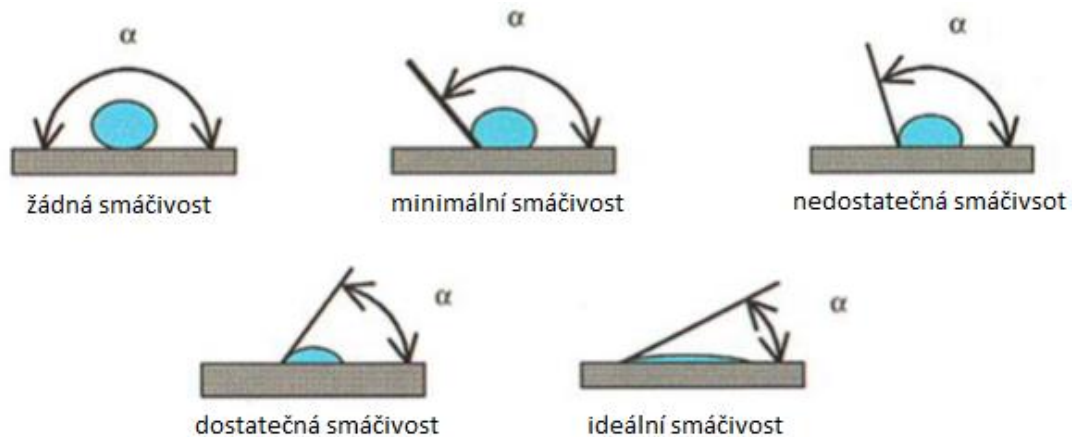
Obr. 2 Mikrostruktura pájeného spoje [4]

2.1.3 Tavidla

Tavidla jsou používána za účelem rychlého odstranění povrchových nečistot (oxidantů) z ploch, které jsou určeny k pájení. Zároveň zabraňuje oxidaci během samotného pájení a podporuje maximální roztékavost a smáčivost pájky a pájeného povrchu, čímž přispívá k lepšímu vytvoření pájeného spoje. Při nepoužití tavidla během procesu pájení se může stát, že pájka nesmočí prostor určený k pájení, nedojde ke vzniku intermetalické vrstvy a pájka jenom odteče stranou a zformuje kuličku. Viz Obr. 3. [2] [3] [5]

Tavidla mohou být ve formě plynné, kapalné, nebo pevné a obsahují přísady (aktivátory), které zajistí, že tavidlo začne plnit svojí funkci až při zvolených podmínkách. Po dokončení

procesu pájení musí být zbytky tavidla odstraněny, protože by mohly začít chemicky reagovat s pájenými spoji a tím zrychlit jejich degradaci. Z tohoto důvodu se stále častěji používají tzv. no-clean tavidla, která není třeba z pájených ploch odstraňovat. V případě pájky ve formě pasty je tavidlo smícháno přímo s částicemi pájky, v případě trubičkových pájek je tavidlo náplní trubičky. Nejstarším a běžně používaným tavidlem při ručním pájení je kalafuna (tj. destilát z pryskyřice borovic). Je to směs slabých organických kyselin. Při pokojové teplotě je kalafuna v pevné formě s vysokým elektrickým odporem a je netečná vůči kovům. Při 120 °C začíná být plně kapalná a při teplotách 200 °C má schopnost rozrušit tenké vrstvy oxidů. [3] [5]



Obr. 3 Úrovně smáčivosti [3]

2.1.4 Materiály pro zhotovení pájených spojů (pájky)

Nejvíce používané pájky jsou nejčastěji dvousložkové nebo třísložkové slitiny. Každá složka v této slitině mění její vlastnosti, jako například pevnost spoje, roztékavost a smáčivost. Pájecí slitiny se dají rozdělit do dvou kategorií na olovnaté a bezolvnaté pájky. [6]

Od pájek je vyžadováno:

- musí mít vždy menší teplotu tání než základní materiál
- dobrá smáčivost a roztékavost (závisí na vlastnostech pájky a na tavidle)
- vysoká čistota použitého materiálu
- dobrá pevnost v tahu / ve smyku a tvrdost
- požadavky dle technologického procesu (např. nižší / vyšší bod tání, vyšší odolnost vůči korozi a oxidaci atd.)

2.1.5 Olovnaté / bezolvnaté pájení

Nejnámější olovnatá pájka je Sn63Pb37, která má 63 % cínu a 37 % olova. Tato pájka je charakteristická nízkou teplotou tání (183 °C) a při tuhnutí přechází z kapalně fáze rovnou do tuhé. To znamená, že neprochází skrz plastickou fázi, která je nežádoucí z důvodu negativního vlivu na mechanické a elektrické vlastnosti spoje.

Ovšem v roce 2003 byla Evropskou unií vydána směrnice RoHS (The Restriction of Hazardous Substances), která zakazuje (značně omezuje) používání zdraví škodlivých látek, které obsahují následující chemické sloučeniny: benzen, kyanidy, rtuť, chrom a olovo. Tato směrnice je od roku 2006 platná jak pro členské státy EU, tak pro státy, které leží mimo ni, a zakazuje na území EU prodávat jakékoliv výrobky s obsahem výše zmíněných sloučenin. Olovo bylo touto směrnicí zakázáno zejména kvůli tomu, že vyřazené elektronické přístroje často končí na skládkách komunálních odpadů, čímž je znemožněna jejich recyklace. V kombinaci s kyselým deštěm se olovo rozpouští ve vodě a dochází ke kontaminaci podzemních vod. Jediná výjimka, na kterou se tato směrnice nevztahuje, jsou aplikace, kde je spolehlivost a funkčnost na prvním místě. Mezi tyto aplikace patří například armáda nebo lékařství. Díky výše popsaným důvodům je snaha o vyvinutí bezolovnatých pájek, které by se svými elektrickými a mechanickými vlastnostmi přiblížili co nejvíce k pájkám olovnatým. Tyto pájky musí být v souladu s nejnovějšími směrnicemi a legislativou. [2] [6]

2.1.6 Pájecí slitiny

2.1.6.1 Slitiny Sn-Ag

Slitina cínu a stříbra je nejčastěji využívána v poměru 96,5 % Sn a 3,5 % Ag. Teplota tání činí 221 °C a dosahuje skoro totožné smáčivosti jako Sn-Pb pájka. Výhodou této slitiny je vysoká teplota tání, které se může hodit zejména při vysokoteplotních aplikacích, jako třeba v automobilovém a leteckém průmyslu. [2]

2.1.6.2 Slitiny Sn-Cu

Tato slitina cínu a mědi je nejčastěji využívána při poměru 99,3 % Sn a 0,7 % Cu. Teplota tání činí 227 °C. Nevýhoda této pájky je vysoká teplota tání a špatné mechanické vlastnosti. Její výhodou je nízká cena, díky čemuž má uplatnění při pájení vlnou, kde je třeba většího množství pájky na vytvoření vlny. [2]

2.1.6.3 Slitiny Sn-Ag-Cu (SAC)

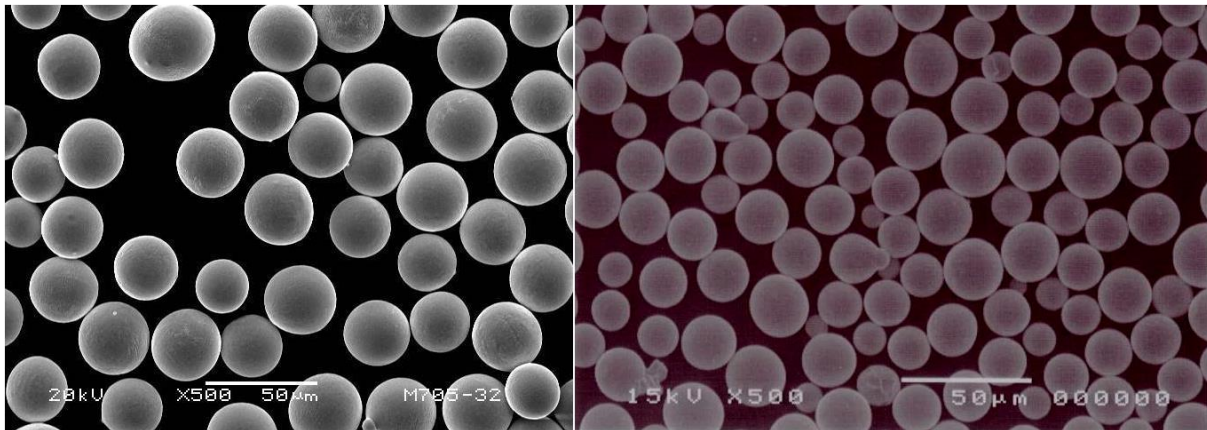
Slitiny cínu, stříbra a mědi tvoří tří složkovou pájku, která má teplotu tání 217 °C. Složení těchto pájek se pohybuje v rozmezí 94 – 96,5 % Sn, 3 – 4 % Ag, 0,5 – 2 % Cu. Díky přidané mědi je u této pájky dosaženo nižší teploty tavení a lepší smáčivosti, než u pájky Sn-Ag. Díky tomu je to nejpoužívanější bezolovnatá pájka, která se v dnešní době používá. Oproti pájce Sn-Pb je zde nevýhoda v podobě teploty tání, která je o 34 °C vyšší. Při této teplotě již dochází k oxidaci cínu, vytvořený spoj má tudíž větší povrchové napětí. [2]

2.1.6.4 Slitiny Sn-Bi

Tato slitina je složena z cínu a bismutu v poměru 58 % Sn a 42 % Bi. Bismut zde zajišťuje značně sníženou teplotu tání, která činí pouhých 138 °C. Díky tomu je této pájky využíváno zejména v aplikacích, které nesnesou velké teploty. [2]

2.1.7 Pájecí pasty

Pájecí pasty jsou směsi kovové a organické složky. Jako složka kovová slouží pájecí zrna, která se vyrábějí ve formě prášku a nejčastěji mají tvar kuliček. V dnešní době pájecí zrna nesmí obsahovat olovo a musí být odolná vůči oxidaci. Pájecí zrna se mohou skládat ze směsi prvků jako je například: Sn-Ag-Cu, Sn-Bi a v minulosti používaných Sn-Pb-Ag a Sn-Pb. Jako složka organická slouží tavidla, která se skládají z pryskyřice, aktivátoru a aditiva. Poměr složení pasty je obvykle 90 % pájecích zrn a 10 % tavidla. V pastách se zásadně používají tzv. no-clean tavidla, která není třeba omývat. Vzhledem k vysoké hustotě osazení součástek, které mají malé rozměry a jemné rastry, je nutno, aby pasty měly velmi jemná a rovnoměrně rozložená zrna. Za tímto účelem je vyráběno vícero typů past, které se liší velikostí zrn, a tudíž i možnostmi aplikace. Pasty s nejemnějším zrněním mají zrna o velikosti pouhých jednotek μm . Navíc čím jemnější je zrnění, tím více je omezeno množství oxidu, které by mohlo způsobovat problémy se smáčivostí pájky. Na obrázku níže lze vidět pájecí zrna ve tvaru kuliček o velikosti 25 – 36 μm a 15 – 25 μm . [2] [6] [4] [7] [8]



Obr. 4 Pájecí pasta M31-GRN360-K-V typ 4 a 5 [7]

Pájecích past je vícero druhů, kromě velikostí zrn a prvků, ze kterých se skládají vodivé částice, se tyto pasty liší také použitým tavidlem. Správná pasta se volí podle toho, jakou teplotu snesou pájené součástky a jakou potřebujeme pružnost, odolnost a přilnavost pájky. Největší výhodou pájecích past je možnost nanášení na konkrétní pájecí plošky, což se hodí při velké hustotě osazení. Pájecí pasty navíc v nepřetaveném stavu působí, jako lepidlo, tudíž není třeba osazené součástky dodatečně přilepovat, jako je tomu například při pájení vlnou. Nanášení je provedeno pomocí dispenzeru, sítotisku nebo tiskem přes šablonu. [2] [4] [6]

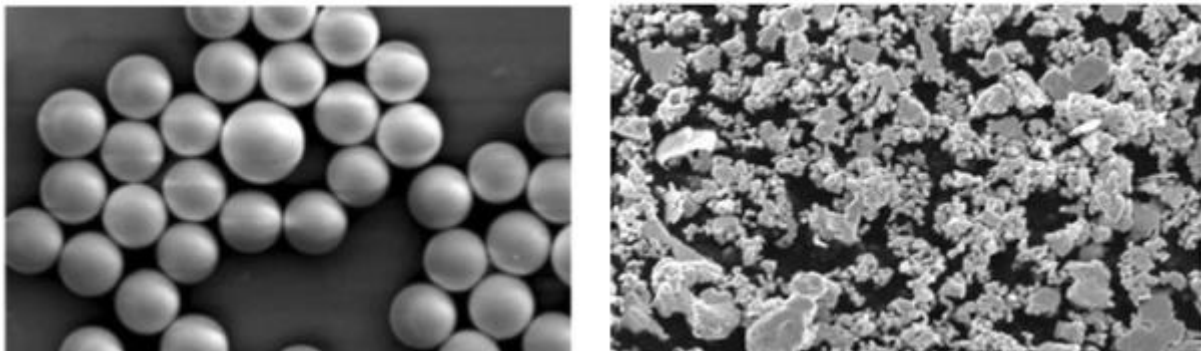
2.2 Lepené spoje

Současný trend používání pro spojování materiály neobsahující olovo a některé vybrané aplikace, dali vzniknout naprosto nové technologii spojování. Touto technologií je vytváření elektricky vodivých spojů pomocí lepidel. Kromě toho, že jsou lepidla bezolovnatá, je jejich další výhodou nízká teplota potřebná pro vytvrzení spoje. Teploty potřebné pro vytvrzování se pohybují v rozmezí 20 až 180 $^{\circ}\text{C}$. Díky tomu se tohoto spojování využívá zejména u spojování součástek, které nesnesou velké teploty. Těchto lepidel je tedy použito například při kontaktování LCD displejů, při montáži některých integrovaných obvodů nebo třeba při

kontaktování tepelných fólií. Další výhodou je také možnost spojování součástek s malou roztečí kontaktů (cca do 0,1 mm), a to díky možnosti anizotropní vodivosti lepidla. Elektricky vodivá lepidla se podobně, jako pájecí pasty vytvrzují například v peci dle požadavků uvedených v datasheetu daného lepidla. [6] [9] [10] [11] [12]

2.2.1 Složení elektricky vodivých lepidel

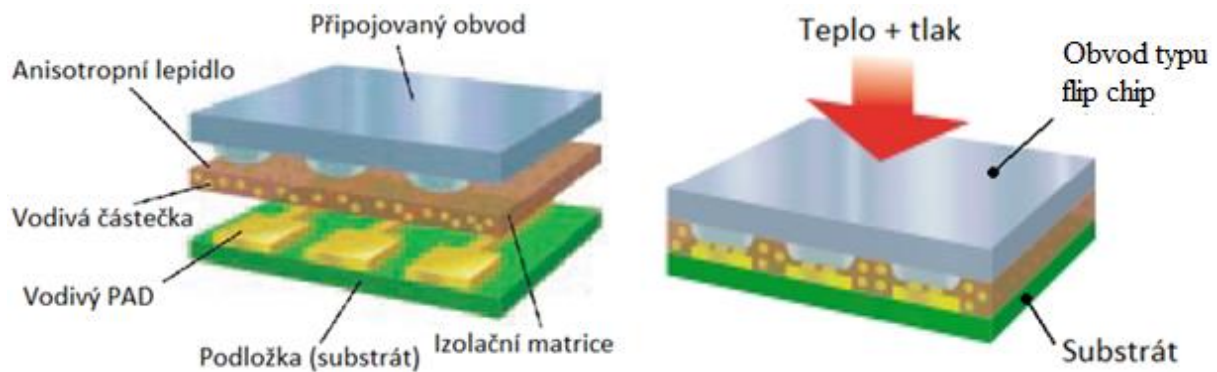
Elektricky vodivá lepidla jsou kompozitní materiály, které se skládají z vazební a vodivé složky. Vazební složka je složka pojivá a její funkcí je zajištění pevného, adhesivního a klimaticky odolného spoje. Pojivo se skládá z epoxidové nebo silikonové pryskyřice a může být jednosložkové nebo dvousložkové. Lepidla s jednosložkovým pojivem je třeba vytvrzovat při teplotě 100 až 180 °C. Lepidla s dvousložkovým pojivem navíc obsahují tvrdidlo (cca 5 % objemu pryskyřice) a je možné je vytvrzovat i při pokojových teplotách. Obecně platí, čím menší vytvrzovací teplota, tím delší doba vytvrzování, která se může pohybovat i v řádech desítek hodin pro vytvrzování při pokojové teplotě. Tepelná odolnost těchto spojů se pohybuje od -30 do 150 °C při použití epoxidové pryskyřice. Pokud použijeme silikonovou pryskyřici, spoj může krátkodobě snést až 470 °C. Vodivá složka tvoří v lepidle plnivo, a jak už název napovídá, zajišťuje, aby byl lepený spoj elektricky a tepelně vodivý. Plnivo se tedy skládá z elektricky a tepelně vodivých částic, nejčastěji stříbrných (Ag). V praxi se ale také používá zlato (Au), nikl (Ni), palladium (Pd), nebo grafit, případně lze použít měděné (Cu) nebo polymerové částice, které jsou postříbřeny. Tyto částice mají nejčastěji tvar kuliček nebo šupin. [6] [9]



Obr. 5 Částice el. vodivého lepidla – kuličky a šupinky [1]

Elektricky vodivá lepidla se dělí dle typu vodivosti na izotropní a anizotropní. Izotropní lepidla mají stejnou elektrickou a tepelnou vodivost nezávislou na směru a lze je použít pro kontaktování běžných součástek. Vodivé částice tvoří 55 až 80 % objemu lepidla a použití tohoto typu lepidel je limitováno hustotou osazení vývodů. Anizotropní lepidla jsou vodivá pouze ve směru kolmém k desce plošných spojů (mezi kontaktem součástky a ploškou na DPS). Částice tohoto typu lepidla jsou větší než částice izotropního typu a jejich množství je obvykle pouze 8 – 15 % objemu lepidla. Tato koncentrace je příliš malá na to, aby vedla ve všech směrech, ale je dostatečná na to, aby vedla ve směru požadovaném. Anizotropní lepidla se proto využívají při kontaktování integrovaných obvodů s velkou hustotou osazení vývodů. Pro tyto účely se v praxi využívá lepidel, která nemají pastovou formu, ale mají podobu fólie, na kterou se přilepí integrovaný obvod za zvýšené teploty a tlaku. Ukázka anizotropního

lepeného spoje je na obrázku 6, na kterém také můžeme vidět, že se vodivé částičky v izolační matrici navzájem nedotýkají, tudíž nevedou. V místě kontaktu součástky je izolační matrice stlačena, čímž dojde k elektrickému propojení padu, vodivé částičky a kontaktu z připojovaného obvodu. [6] [9]



Obr. 6 Ukázka anizotropního vodivého spoje [1]

Hranice mezi izotropní a anizotropní vodivostí lepidla je popsána perkolační teorií. Dle této teorie je většina polymerů za normálních okolností izolantem. Pokud do polymeru budeme přidávat vodivé částičky, dojde v určitém okamžiku k prudkému nárůstu vodivosti a z izolantu se stane vodič. Tomuto okamžiku se říká perkolační práh. Při dalším přidávání vodivých částiček dochází k minimálnímu nárůstu vodivosti, proto nemá smysl koncentraci částic nadále zvyšovat. [6] [9]

2.2.2 Materiály pro zhotovení lepených spojů

2.2.2.1 Stříbro (Ag)

Stříbro je nejčastěji používaný materiál pro zhotovení plnidla vodivých lepidel zejména díky jeho dobré elektrické a tepelné vodivosti. Další jeho výhodou je snadné zpracování do různých tvarů a velikostí částic. Nevýhodou stříbra je efekt zvaný migrace stříbra, při kterém ionty stříbra migrují z vytvrzené pryskyřice do obvodu, čímž může dojít k přemostění izolační mezery na desce plošných spojů a ke zkratu. Tento jev lze potlačit využitím homogenní vrstvy molekul SAM (Self-Assembled Monolayer). Zjednodušeně řečeno je to vrstva molekul, která se nanese na pájecí plošku, na které tyto molekuly bez působení vnějších sil zformují homogenní a celistvou vrstvu, která zabrání iontům stříbra opustit oblast pájecí plošky. [9] [13] [14]

2.2.2.2 Zlato (Au)

Zlato je také vhodné jako plnidlo pro vodivá lepidla. V porovnání se stříbrem je více chemicky stabilní, na druhou stranu má o něco horší elektrickou a tepelnou vodivost. Největší nevýhodou zlata je ovšem jeho vysoká cena. [9]

2.2.2.3 Měď (Cu)

Měď lze také využít jako plnidlo vodivého lepidla, má velmi dobrou elektrickou a tepelnou vodivost, ale ve vlhkém a horkém prostředí je velice náchylná k oxidaci. Oxidaci lze do jisté míry omezit za pomoci antioxidantů. Vlastnosti mědi lze také zlepšit jejím postříbřením, pozlacením nebo pocínováním, ovšem nikdy nebude mít tak kvalitní vlastnosti jako stříbro. [9]

2.2.2.4 Nikl (Ni)

Nikl je další materiál, který lze použít jako plnidlo. Na rozdíl od mědi méně podléhá oxidaci a je chemicky i teplotně stabilnější. Oproti stříbru je značně levnější, ale na druhou stranu má přibližně 24x větší měrný odpor než stříbro. [9] [15]

2.2.2.5 Grafit

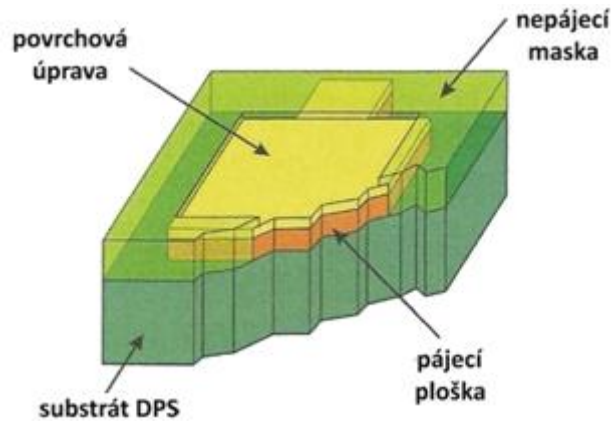
Grafit je cenově velice výhodný materiál pro zhotovení plnidla vodivých lepidel. To je dáno zejména nízkou cenou grafitu a také zdatelně menším množstvím částic, které je potřeba k zajištění vodivosti lepidla oproti ostatním materiálům. Grafit má menší vodivost, což je řešeno stejně jako u mědi postříbřením. Díky možnosti pokovení tenkou vrstvou lze použít pro výrobu plniva další anorganické nekovové materiály, jako třeba bazalt. [9]

2.3 Povrchové úpravy DPS

Povrchové úpravy DPS hrají velmi podstatnou roli při procesu pájení a při skladování samotných DPS. Jejich význam je ochrana pájecích plošek na DPS před oxidací a degradací, které mají negativní vliv na smáčivost. Další význam je zlepšení růstu intermetalických vrstev během samotného procesu pájení. [4] [16]

Požadavky na povrchové úpravy DPS:

- vytvoření ochranné vrstvy pro minimalizaci rozpouštění mědi během montážních technologií
- ochrana mědi při vícenásobném teplotním cyklu a ochrana před oxidací
- zachování dobré smáčivosti povrchu
- dobré mechanické a elektrické vlastnosti
- rovinnost povrchu
- tloušťka vrstvy 0,1 – 0,5 μm
- vhodnost pro aplikace s velmi jemnou roztečí vývodů a možnost kontaktování (wire bonding)
- dlouhodobá skladovatelnost
- kompatibilita s environmentálními vlivy (např. migrace stříbra a růst intermetalických vrstev)



Obr. 7 Povrchová úprava pájecí plošky na DPS [4]

2.3.1 OSP (Organic Surface Protectives)

OSP je ochranný tenký film o tloušťce okolo 0,1 μm , který je nanesený na pájecí plošku a chrání ji před oxidací. OSP je kompatibilní se všemi druhy kovů a takto ošetřené DPS lze skladovat až půl roku. [4] [16] [17]

Výhody:

- prodloužení doby skladování (odolnost vůči oxidaci)
- dobrá rovinnost
- nízká cena

Nevýhody:

- degradace při vysokých teplotách (nevhodné pro vícenásobné přetavení)
- nízká smáčivost

2.3.2 Pocínování – HASL (Hot Air Surface Levelling)

Při této úpravě se DPS svisle ponoří do roztavené pájky (cínová lázeň). Poté je deska pomalu vytažena a pomocí horkovzdušných nožů je odstraněna přebytečná pájka, aby vrstva cínu měla odpovídající tloušťku. HASL lze provést taky pro různé slitiny (Sn-Ag-Cu, Sn-Cu-Ni). [4] [16] [18] [17]

Výhody:

- dobrá smáčivost povrchu při pájení
- dlouhodobá skladovatelnost (ochrana před oxidací a degradací)
- možnost vícenásobného teplotního cyklu
- nízká cena, vhodné pro velkovýrobu

Nevýhody:

- nesterhomerná tloušťka povrchu (horší spolehlivost procesu)
- teplotní šok (možná deformace DPS)
- nevhodné pro velmi jemné rozteče jako např. “fine pitch“ a “ultra fine pitch“

2.3.3 Postříbření – IS (Immersion Silver)

Po zavedení bezolovnatého pájení došlo ke značnému nárůstu používání stříbra k povrchovým úpravám DPS, a to zejména díky tomu, že má stříbro velmi dobrou smáčivost. Při špatném skladování však dochází k oxidaci a zčernání stříbra, proto je nutné takto ošetřené DPS skladovat ve speciálních podmínkách, nebo na ně nanést ochranou vrstvu OSP. [4] [16] [18] [17]

Výhody:

- velmi dobrá smáčivost
- přesná tloušťka a rovinnost
- vhodné pro jemné rozteče vývodů “fine pitch“ a “ ultra fine pitch“
- odolá několikanásobnému ohřátí

Nevýhody:

- nutnost speciálního skladování, nebo potažení organickým filmem, který se časem opotřebuje
- skladovatelnost 6 – 12 měsíců, při rozbalení z ochranného obalu 24 h

2.3.4 Pozlacení – ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)

Tato povrchová úprava vzniká chemickým nanesením niklu (3 – 6 μm), na který se poté nanese zlato (0,05 – 0,1 μm). Nikl zde slouží jako vhodná vrstva pro nanesení zlata. Při této úpravě by se mohlo zdát, že pozlacená pájecí ploška bude mít menší odpor než měděná ploška. Ovšem díky tomu, že má nikl skoro 23x větší měrný odpor než měď, celkový odpor pájecí plošky nepatrně vzroste. [4] [16] [18] [17]

Výhody:

- vynikající ochrana před korozi (dlouhodobá skladovatelnost v rámci několika let)
- vynikající smáčivost (lepší než cín, nebo stříbro)
- výborná rovinnost
- vhodné pro jemné rozteče vývodů “fine pitch“ a “ ultra fine pitch“
- možnost více násobného teplotního zatížení

Nevýhody:

- dražší výroba
- možnost vzniku “Black Pad“ (vrstva niklu se oddělí od pájecí plošky)

2.4 Technologie spojování (pájení a lepení)

2.4.1 Pájení vlnou (FLOW)

Je to jeden z nejrozšířenějších hromadných způsobů pájení vhodný pro povrchovou montáž SMT. Touto metodou lze pájet jednovrstvé, dvouvrstvé nebo vícevrstvé desky plošných spojů, včetně SMD. Princip pájení spočívá v tekuté pájce umístěné v kontejneru, ve kterém jsou vytvořeny vlny. Deska plošného spoje s osazenými součástkami prochází nad vlnami roztavené pájky, které smáčejí povrch spodní strany desky plošného spoje. Tím dojde k zapájení ploch určených k pájení. Ostatní plochy, které nejsou určeny k pájení, musí být zakryty ochrannou nepájivou vrstvou. Součástky pro povrchovou montáž musí být k povrchu desky přilepeny lepidlem, aby během procesu pájení nedošlo k jejich utržení. Použité lepidlo musí mít dobrou adhezi, malou roztékavost, nesmí měknout s teplotou, nesmí být elektricky vodivé, nesmí chemicky ovlivňovat desku ani součástku a nesmí být toxické. [1] [19]

Proces pájení vlnou:

1. nanášení tavidla
2. přehřev
3. pájení
4. chlazení
5. čištění

2.4.1.1 Nanášení tavidla

Tavidlo je používáno za účelem rychlého odstranění povrchových nečistot a lze ho nanést následujícími způsoby:

Ultrazvukový dávkovač: Nejmodernější typ dávkování. K přenosu tavidla dochází díky zvukovému vlnění, které vzniká na rezonátoru. Tavidlo díky tomuto vlnění tryská skrze vhodně vytvarovanou trysku na DPS. [19]

Sprejový dávkovač: Kapalné tavidlo je rozprášeno stlačeným vzduchem. Množství rozprášeného tavidla závisí na tvaru trysky a na tlaku vzduchu. Tento způsob lze kombinovat s ultrazvukovým rozkmitáním dávkovací hlavy, díky čemuž budou rozprášené kapičky tavidla jemnější. [19]

Pěnový dávkovač: Vhodný pro levnější zařízení. Pěna je vytvořena tlakovým vzduchem přes provzdušňovač, který je ponořený v tekutém tavidle. [19]

Dávkovač s rotujícím kartáčem: Jednotlivá vlákna rotačního kartáče jsou namáčena v tavidle, které se díky odstředivé síle dostávají na DPS, která jede na dopravníku nad kartáčem. [19]

2.4.1.2 Předehřev

Eliminuje teplotní šok, odstraňuje rozpouštědla a aktivuje tavidla. Používají se dva typy předehříváků.

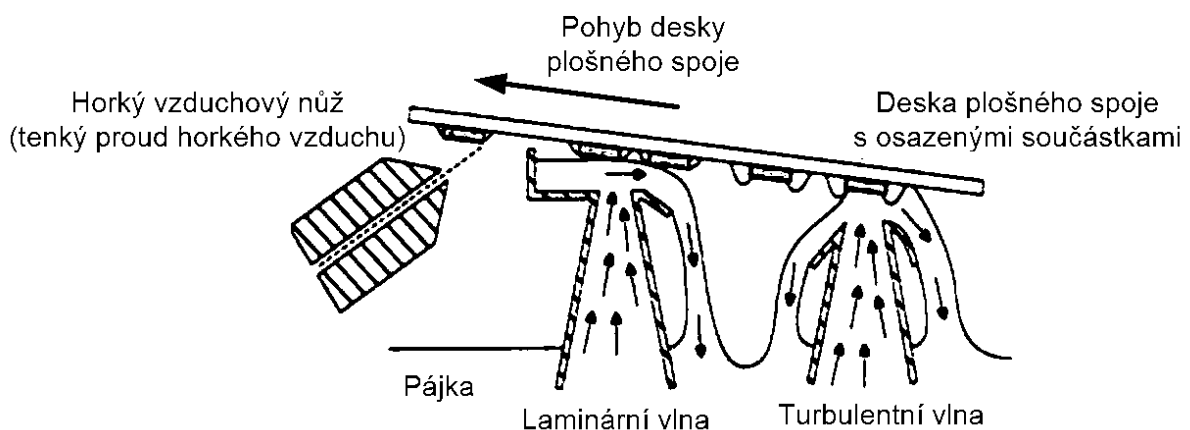
Horkovzdušné: Optimální řešení předehřevu. [19]

Infračervené: Mají problém s rovnoměrným ohřevem povrchu kvůli nerovnoměrné absorpci IR záření. Jsou nevhodné pro vyšší rychlosti dopravníků, protože se deska nestihne prohřát. [19]

2.4.1.3 Vlna

Zařízení se skládá z elektricky vyhřívaného kontejneru, čerpadla, trysek a z horkovzdušného nože. V kontejneru je umístěna roztavená pájka, jejíž teplota je v rozmezí 240 – 260 °C. V nádrži nesmí kolísat teplota, proto je vhodné zvolit větší velikost nádrže, což nám zajistí teplotní stabilitu. Dále zde máme čerpadla a trysky, které vytvoří a zformují pájecí vlny. Na pájecí vlně se nachází roztavené tavidlo, které zajišťuje kvalitu pájeného spoje. Pro pájení vlnou se nejvíce využívá dvou vln (viz obr. 8). První vlna se nazývá turbulentní a podporuje funkci tavidla, které dokonale očistí pájené plochy. Druhá vlna se nazývá laminární, tato vlna zajistí dokonalé a homogenní zapájení spoje. Na závěr deska projde nad plynovou tryskou, z které tryská úzký proud velmi horkého vzduchu (horkovzdušný nůž) o teplotě 380 °C, jenž odstraní přebytečnou pájku (ve směru pohybu desky se mohou při pájení vytvářet “krápníky“, které jsou takto odstraněny). [1] [19]

Při pájení vlnou může být problém se součástkami, které nesnesou vysoké teploty, jako například elektrolytické kondenzátory, součástky v plastových pouzdrech atd. Tyto součástky nesmí být vysokou teplotou poškozeny, a proto jsou osazeny dodatečně a připájeny jinou technologií pájení. [1] [19]



Obr. 8 Pájení vlnou [1]

2.4.1.4 Chlazení

Pájené spoje se po pájení chladí za účelem zamezení nadměrného růstu intermetalických sloučenin (sloučenina odlišných prvků kovového charakteru), které vznikají na rozhraní dvou spojovaných materiálů. [19] [2]

2.4.1.5 Čištění

V případě použití agresivního tavidla je nutno po pájení zbytky tohoto tavidla odstranit, čímž se zamezí zrychlení degradace spoje v podobě koroze. Protože je v praxi nutno mít na toto čištění speciální stanici, používají se tzv. no-clean tavidla, která není třeba omývat. [19]

2.4.2 Pájení přetavením (REFLOW)

Tento typ pájení je další hromadný a velice rozšířený způsob pájení vhodný v aplikacích, kde je vysoká pravděpodobnost vzniku můstků mezi vývody sousedních součástek (např. pouzdrění typu “fine pitch“ a “ultra fine pitch“, kde rozteč mezi vývody může být jen 0,3 mm). Pájení přetavením funguje na opačném principu než pájení vlnou nebo ruční pájení, kde se na pájené místo přivádí roztavený pájecí materiál. Pájecí materiál se zde nejprve nanese na pájecí plošky ve formě pasty, která je poté přetavena dodáním energie ve formě tepla. Díky tomu je tento typ pájení vhodný také pro součástky, které nesnesou velké teploty (tj. součástky, které nejsou vhodné pro pájení vlnou). Výhodou pájení přetavením je, že není nutno osazené součástky dodatečně lepit k DPS, jako je tomu při pájení vlnou. Pasta samotná zde poslouží jako lepidlo. [1] [3]

Nanášení pájecí pasty na pájecí plošky je provedeno stejně jako při nanášení tlustých vrstev, sítotiskem, šablonovým tiskem nebo disperzerem (vytlačování pasty dutým hrotem). Poté je deska plošného spoje osazena jednotlivými součástkami. Moderní zařízení umí provést oba tyto kroky, tzn. nanést pájecí pastu na pájecí plošky a osadit desku součástkami. Dále následuje sušení pájecí pasty, čímž se aktivuje tavidlo, které je součástí pasty, a zároveň se zbavíme kapalných složek pasty. Teplota sušení se volí podle složení pasty, obvykle okolo 120 °C. Tato metoda spojování se dá s menšími úpravami využít také pro elektricky vodivé lepené spoje. [1] [3]

Při samotném pájení je možné využít všech možných přenosů tepla, které lze prakticky uskutečnit, tj. vedení (kondukce – přenos tepla skrz tuhé, kapalné i plynné látky), proudění (konvekce – proudění kapalných, či plyných látek) a záření (radiace – tepelná energie je přenesena elektromagnetickým vlněním). Jednotlivé pájecí metody (přetavení pájecí pasty) lze rozdělit podle způsobu ohřevu: [1] [3]

- pájení vedením tepla
- pájení prouděním tepla (konvekční)
- pájení infračervenými zářiči
- pájení kondenzací par
- pájení laserem

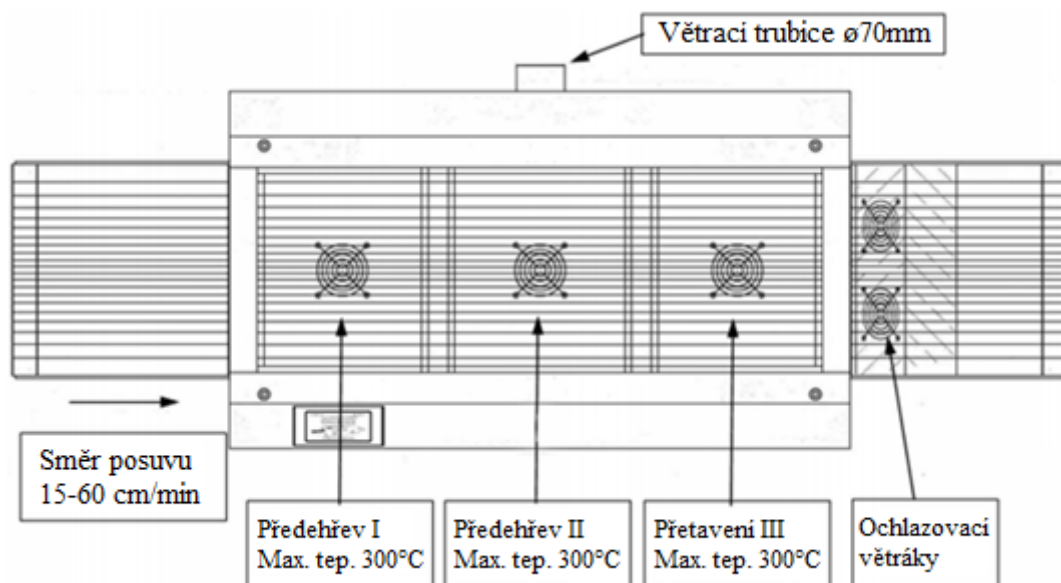
2.4.2.1 Pájení vedením tepla

Vedení tepla je nejčastěji využito u různých typů páječek, kde je rozžhavený hrot s roztavenou pájkou v přímém kontaktu s pájenými částmi. Pájecí hrot je vytvořen hlavně z mědi, která má vysoký přenos tepla, a je pokryt ochrannou vrstvou niklu. Tohoto typu vedení tepla se nejčastěji využívá například při opravách nebo při dodatečném osazování součástek, které jsou nevhodné pro pájení vlnou, protože jsou příliš těžké nebo nesnesou vysoké teploty. Mezi tyto součástky například patří transformátory, tlumivky, elektrolytické kondenzátory atd. [1] [3]

Tento druh přenosu tepla využívají například starší pece, které nejsou uzpůsobeny pro konvekční ohřev, nebo tunelové pece určené pro hromadnou výrobu. K přenosu tepla dochází vedením vzduchem. Vzduch je ohříván například odporovým vinutím. Tyto pece lze také využít pro vytvrzování elektricky vodivých lepidel. V praxi se však mnohem častěji používají konvekční tunelové pece. [1] [3]

2.4.2.2 Pájení prouděním tepla (konvekční)

Tento typ pájení / vytvrzování se nejčastěji využívá v tunelových pecích, které využívají pro přenos tepla nějaké plynné médium, tj. zejména vzduch. Tunelová pec má více zón, přičemž každá může být ohřívána na jinou teplotu. To umožňuje nastavení různých teplotních profilů, díky čemuž lze docílit lepší kvality pájeného spoje. Vzduch v jednotlivých zónách je ohříván například odporovým vinutím a poté je rozfoukán pomocí ventilátorů, tím dojde k cirkulaci velkého objemu vzduchu, který zajistí rychlý, rovnoměrný a účinný přenos tepla na desku plošných spojů. Posun desky plošných spojů skrz pec je zajištěn pomocí dopravníku, který nesmí bránit cirkulaci vzduchu v dané zóně. Výsledné teplo přenesené na desku plošných spojů lze tedy regulovat pomocí samotného ohřevu vzduchu, pomocí ventilátorů a pomocí rychlosti dopravníku. Tunelové pece a běžné konvekční pece lze také využít pro vytvrzování elektricky vodivých lepidel. [1] [3] [20]

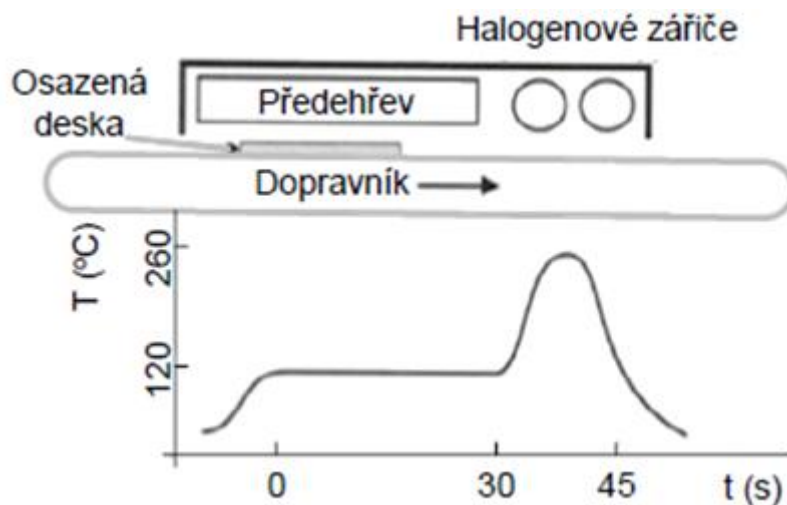


Obr. 9 Ukázka nákresu třízónové tunelové pece Mistral 260 [20]

Tohoto typu přenosu tepla je také využito při pájení horkým plynem. Toho se využívá pouze pro pájení v malém rozsahu, tj. při opravě desek plošných spojů. Princip tkví v trysce o průměru cca 2 mm, kterou proudí pracovní plyn o teplotě 350 až 400 °C, rychlostí 1 až 5 l/min. Jako pracovní plyn se užívá vzduch, případně nějaký inertní plyn (např. dusík), pokud by hrozila oxidace. Tlak (rychlost), kterou je plyn vyfukován z pájecí hlavy, musí být vhodně regulován, aby při pájení nedocházelo k odfukování součástek. Výhodou je, že není možné touto pájecí metodou mechanicky poškodit pájecí plošky. Nevýhoda je vyšší míra oxidace pájecí pasty a malá účinnost přenosu tepla (20 až 30 %). [1] [3]

2.4.2.3 Pájení infračervenými zářiči

Tento typ pájení lze například využít při pásovém pájení, které používá halogenové zářiče jako finální pájecí krok. Pro ohřev se využívá záření o vlnové délce 0,8 – 400 μm (čím vyšší je teplota zdroje, tím kratší je vlnová délka záření). Výhodou tohoto způsobu pájení je vysoká účinnost procesu, která se pohybuje okolo 60 až 70 %. Značnou nevýhodou je nehomogenní ohřev, který je způsoben mnoha faktory, jako je například barva a drsnost povrchu, směr dopadajícího záření, tvar součástek (může dojít k zastínění) atd. Další nevýhodou je také velký rozdíl teplot ve směru posunu. Tento typ vedení tepla se dá také využít pro vytvrzování elektricky vodivých lepidel. [1] [3]

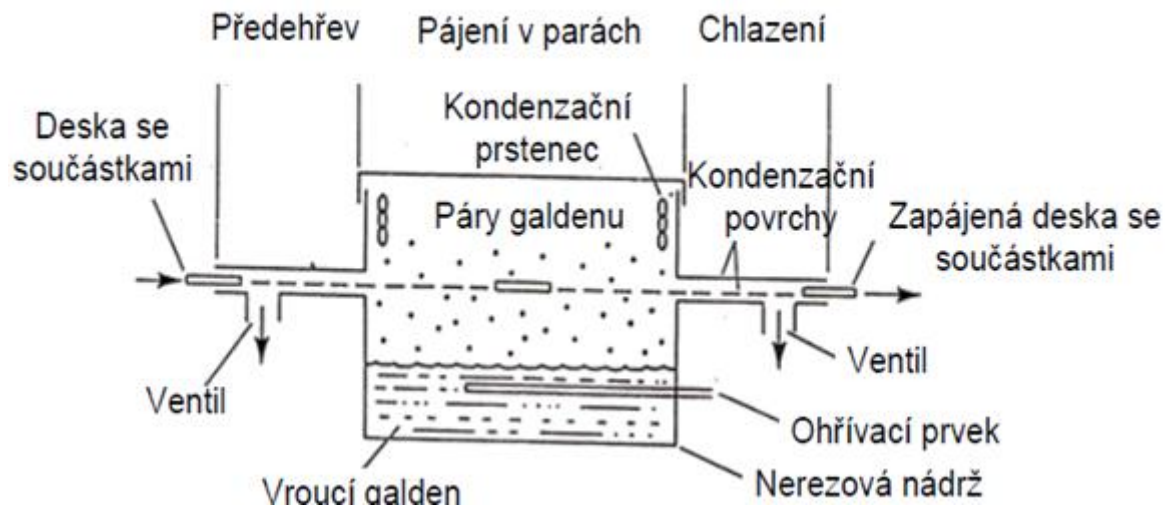


Obr. 10 Pájení infračervenými zářiči [1]

2.4.2.4 Pájení kondenzací par

Princip pájení v parách spočívá v odpařování a kondenzování nějakého inertního média (např. galden), čímž dojde k předání tepla desce plošných spojů. Toto médium je uloženo v nádobě, kde je odporovým ohřevem ohřáto na bod varu, při kterém se začne odpařovat. Tím vznikne hustá a těžká pára, která vytlačí všechny ostatní lehčí plyny a dojde k vytvoření ochranné atmosféry. Tato pára kondenzuje na chladnějším povrchu, což je v našem případě deska plošných spojů. Takto je desce předáno teplo a pracovní médium v kapalně formě skape zpět do nádoby. Největší výhodou této metody je pájení v ochranné atmosféře, vysoká účinnost přenosu tepla a dokonale rovnoměrné ohřátí pájené desky. Další plus je, že nelze pájenou

desku ohřát na vyšší teplotu, než je teplota odpařování pracovního média. Ukázka kontinuálního pájení v parách je vyobrazena na obrázku níže. [1] [3]



Obr. 11 Pájení v parách (kontinuální) [1]

2.4.2.5 Pájení laserem

Této možnosti pájení není využíváno v hromadné výrobě. Využívá se zde programově řízeného laseru, díky čemuž lze dosáhnout velmi přesného zacílení. Laser navíc ohřívá pouze plochu, na kterou je namířen. Lze ho tedy využít zejména v aplikacích, kde je nutné velmi přesné a lokální přetavení pasty. To znamená připájení součástek, které nelze připájet vlnou, nebo hromadným přetavením kvůli teplotní citlivosti součástek. Ohřev pájecí pasty laserem je velmi krátký, čímž je vyloučen nadměrný růst intermetalických sloučenin. Paradoxně nevýhodou pájení laserem je právě lokální přetavení pasty, proto této metody nelze využít k zapájení celých osazených desek plošných spojů. To by se nevyplatilo zejména z časových a finančních důvodů. [1] [3]

2.5 Vlastnosti pájených a lepených spojů

Tato kapitola je zaměřena na porovnání elektricky vodivých spojů vytvořených pomocí pájecích past a elektricky vodivých lepidel. U těchto spojů nás zajímají zejména následující vlastnosti: typ vodivosti (izotropní / anizotropní), teplota vytvrzování / přetavení, odpor, mechanická pevnost a cena. Další aspekty jsou například šum, stabilita, odolnost proti navlhání, spolehlivost a doba životnosti. Při porovnání pájecích past a elektricky vodivých lepidel nelze říct, že je jedna metoda jednoznačně lepší než metoda druhá. Každá metoda má své výhody i nevýhody, dokonce jsou zde aplikace, ve kterých lze použít pouze jednu z uvedených metod. Například pokud potřebujeme udělat spoj za nízké teploty nebo v dané aplikaci potřebujeme anizotropní vodivost (velká hustota osazení), musíme použít vodivá lepidla. Ty mají oproti pájeným spojům horší mechanické a elektrické vlastnosti a vyšší cenu. Pokud tedy nejsme omezeni teplotou a typem vodivosti, je ekonomicky výhodnější možnost pájení přetavením pomocí pájecích past. Celkově lze říct, že jsou pájecí pasty ve většině výše zmíněných ohledech lepší, avšak nelze je použít v určitých speciálních aplikacích. Proto je

spojování elektricky vodivými lepidly stále používanou metodou, kterou nelze jen tak nahradit. V tabulce níže je vyobrazeno jednoduché porovnání mezi pájecími pastami a elektricky vodivými lepidly. [6]

Vlastnosti	Pájecí pasty	Elektricky vodivá lepidla
Typ vodivosti	Pouze izotropní	Izotropní / Anizotropní
Teplota vytvrzování	Vyšší	Nižší
Odpor	Nižší	Vyšší
Šum	Nižší	Vyšší
Stabilita	Nižší	Vyšší
Cena	Nižší	Vyšší
Mechanická pevnost	Vyšší	Nižší
Odolnost proti navlhání	Vyšší	Nižší
Spolehlivost	Vyšší	Nižší
Doba životnosti	Vyšší	Nižší

Tabulka 1 Porovnání metod spojování

Zeleně je zvýrazněno, která z metod je v daném ohledu lepší.

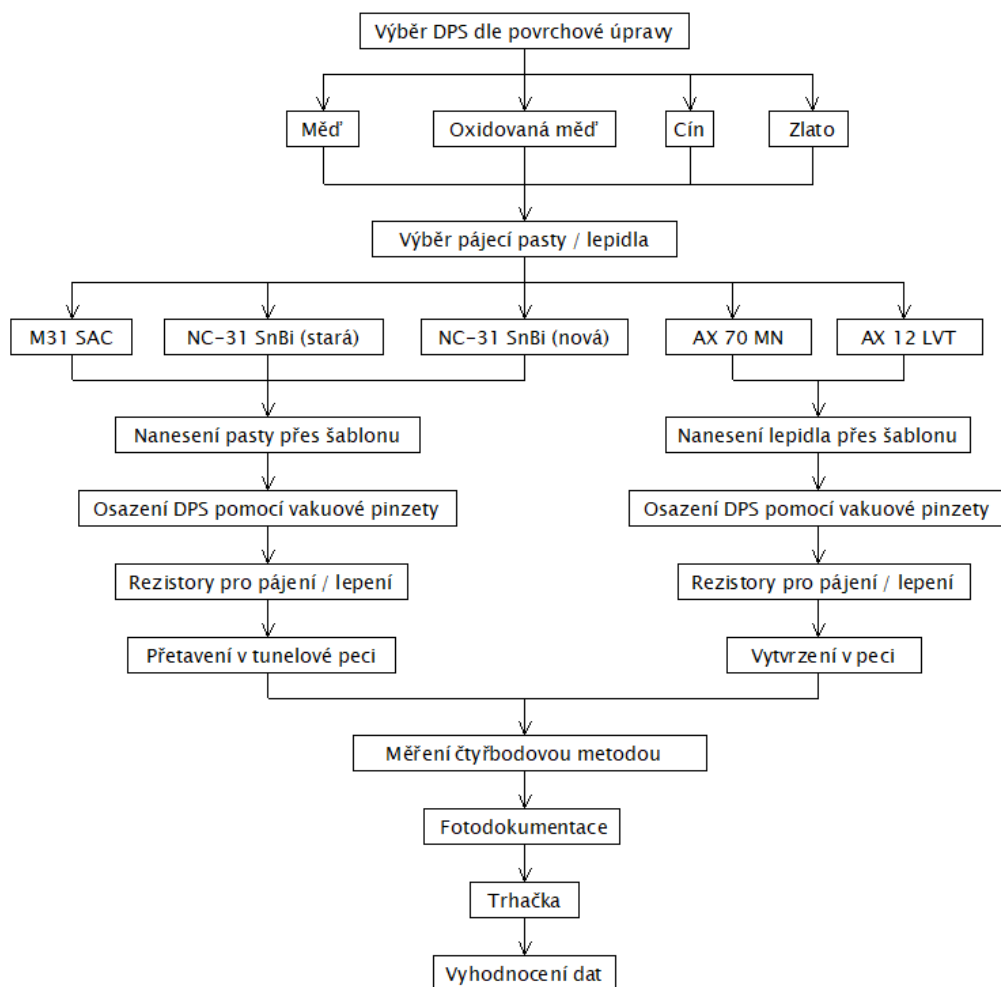
- u pájecí pasty nelze vytvořit anizotropní vodivost a nelze ji přetavit při pokojové teplotě
- odpor lepených spojů může být klidně více než 10x větší než odpor spojů pájených
- lepené spoje mají při vyšších frekvencích větší šum, který je způsoben jejich nehomogenitou
- lepené spoje jsou dražší zejména díky vysokému obsahu stříbrných částic (cca 70 % pro lepidla s izotropní vodivostí)
- epoxidová pryskyřice použitá v lepeném spoji má menší odolnost vůči navlhání a je méně odolná vůči slunečnímu světlu, díky čemuž má lepený spoj menší životnost
- lepené spoje mají horší mechanickou pevnost kvůli špatné smáčivosti a roztékavosti, pájecí pasta při přetavení lépe přilne k pájeným plochám, což má značný vliv na kvalitu spoje

3 Praktická část

3.1 Experiment

3.1.1 Popis experimentu

Experiment se zabývá závislostí elektrického odporu vodivého spoje na použité pájecí pastě / elektricky vodivém lepidlu, na povrchové úpravě DPS a na použitých nulových SMD rezistorech. Dále je zkoumáno, jak výše zmíněné faktory ovlivní mechanickou odolnost daného spoje. Pájecí pasty / elektricky vodivá lepidla byly pomocí stěrky a šablony ručně nanášeny na pájecí plošky DPS. Za použití vakuové pinzety byly DPS ručně osazeny nulovými rezistory. Poté byly DPS s lepidlem vytvrzeny v peci a DPS s pájecí pastou přetaveny ve více zónové tunelové peci. Takto připravené vzorky byly popsány a jejich odpor byl změřen pomocí čtyřbodové metody. Dále bylo od každého druhu vzorku pořízeno pomocí mikrokamery několik detailních fotografií. Část vzorků prošla destruktivní zkouškou tahem (strhávání rezistorů za pomoci trhačky). Hodnoty získané ze čtyřbodového měření, data z trhačky a detailní fotografie jsou použity k vyhodnocení a srovnání vlastností vytvořených vzorků.



Obr. 12 Postup experimentu

3.1.2 Materiály použité pro vytvoření elektricky vodivých spojů

- pájka Senju M31-GRN360-K1MK-V (Sn95,75Ag3,5Cu0,75)
- pájka Senju NC-31 – prošlá lhůta expirace (90% vodivých částic Sn42Bi56)
- pájka AMTECH-NC-31 – nově koupená (90% vodivých částic Sn42Bi56)
- lepidlo Elpox AX 70MN (70% stříbrných částic)
- lepidlo Elpox AX 12LVT (dvousložkové) – prošlá lhůta expirace (55% stříbrných částic)

Měrný odpor: [15]

- | | |
|----------------|----------------------------|
| - cín (Sn) | 10,1 $\mu\Omega\text{cm}$ |
| - stříbro (Ag) | 1,629 $\mu\Omega\text{cm}$ |
| - měď (Cu) | 1,75 $\mu\Omega\text{cm}$ |
| - bismut (Bi) | 107 $\mu\Omega\text{cm}$ |



M31 SAC

NC-31 SnBi (stará)

NC-31 SnBi (nová)

Obr. 13 Použité pájecí pasty



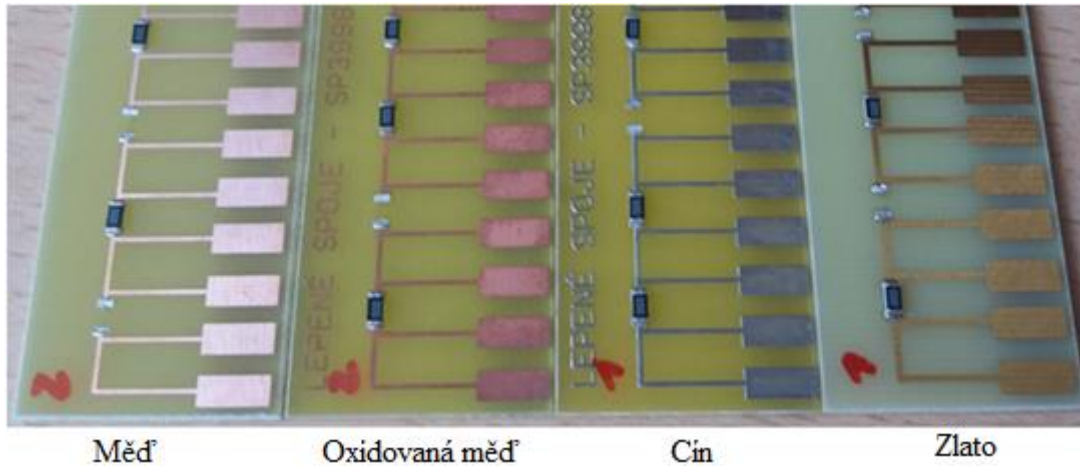
Elpox AX 70 MN

Elpox AX 12LVT (dvousložkové)

Obr. 14 Použitá elektricky vodivá lepidla

3.1.3 Použité povrchové úpravy pro DPS typu FR4

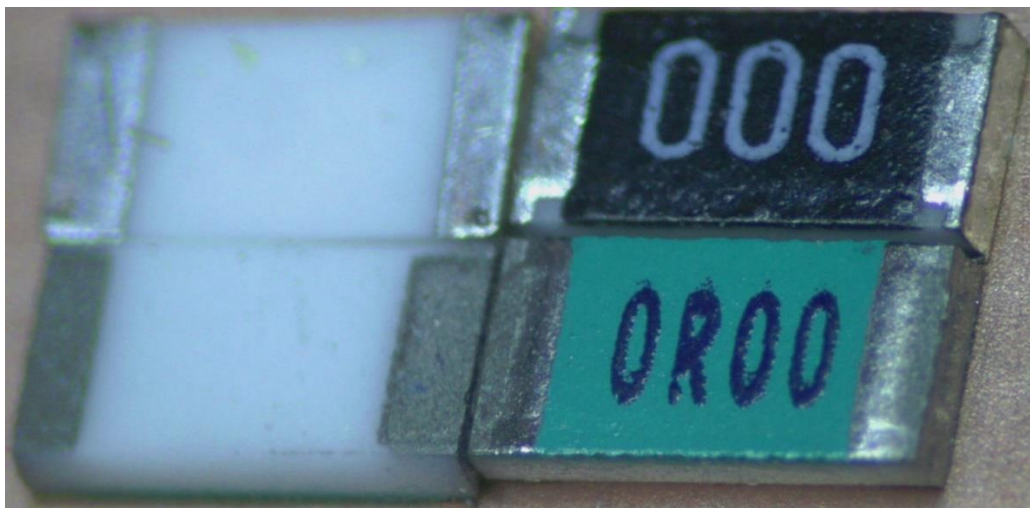
- měď (měrný odpor mědi $1,75 \mu\Omega\text{cm}$) [15]
- oxidovaná měď
- pocínování – HASL (měrný odpor cínu $11,5 \mu\Omega\text{cm}$) [15]
- pozlacení – ENIG (měrný odpor niklu $40 \mu\Omega\text{cm}$ a zlata $2,35 \mu\Omega\text{cm}$) [15]



Obr. 15 Použité povrchové úpravy

3.1.4 Použité nulové SMD rezistory

- rezistor určený k pájení (černý – 000 – pocínovaný – $6 \text{ m}\Omega$)
- rezistor určený k lepení (zelený – 0R00 – poniklovaný – $18 \text{ m}\Omega$ – degradovaný)

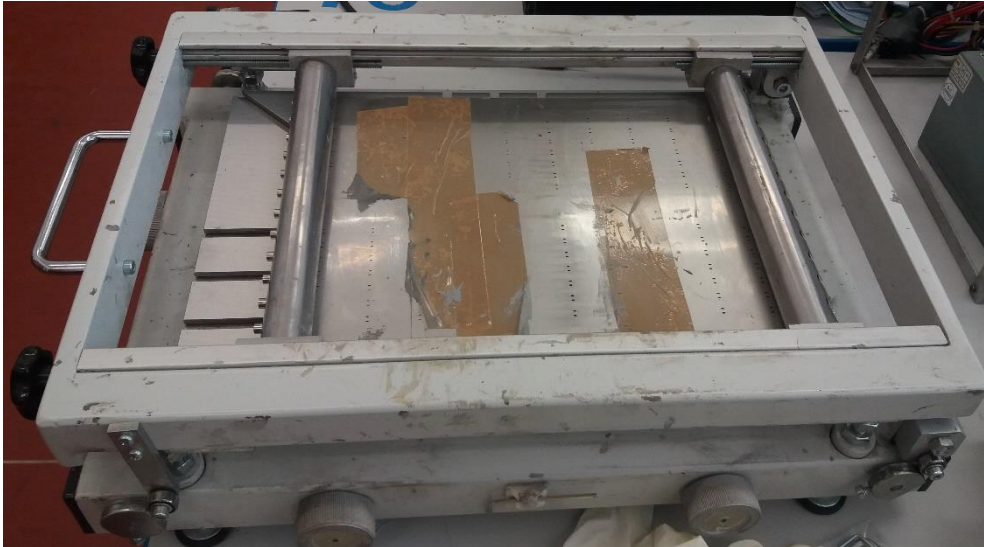


Obr. 16 Použité rezistory

3.1.5 Popis použitého vybavení

Nanášecí šablona

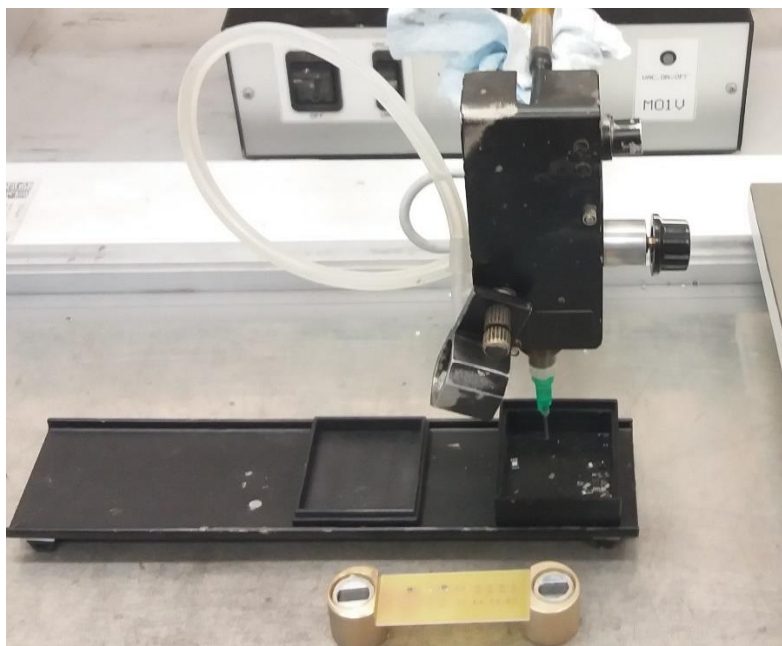
Pro nanesení past / lepidel na DPS bylo použito klasické ruční nanášecí šablony. Při otevření se do vymezeného prostoru vložila DPS tak, aby plošky určené k pájení pasovaly přesně na děrování v šabloně, poté byla pomocí třerky nanesena pasta / lepidlo.



Obr. 17 Nanášecí šablona

Vakuová pinzeta

Pro osazení DPS bylo použito rameno s vakuovou pinzetou, díky kterému bylo možné snadno a rychle osadit DPS. Možnost natáčení jehly umožnila precizní manipulaci s SMD součástkami.



Obr. 18 Vakuová pinzeta

Tunelová pec Mistral

Teplotní profily pro přetavení byly zvoleny dle údajů z datasheetů a podle zkušeností vedoucího práce:

- Sn_{95,75}Ag_{3,5}Cu_{0,75}: 150, 180, 250 °C
- Sn₄₂Bi₅₆: 100, 120, 175 °C



Obr. 19 Tunelová pec Mistral

Horkovzdušná pec

Vytvrzení lepidel bylo provedeno v klasické horkovzdušné peci dle parametrů uvedených tučně. Parametry pro vytvrzení byly získány z datasheetů: [10] [11] [12]

- AX 70MN: **180 °C (6 - 10 min)**, 200 °C (3 - 4 min)
- AX 12LVT: 80 °C (25 min), **100 °C (15 min)**, 120 °C (10 min)

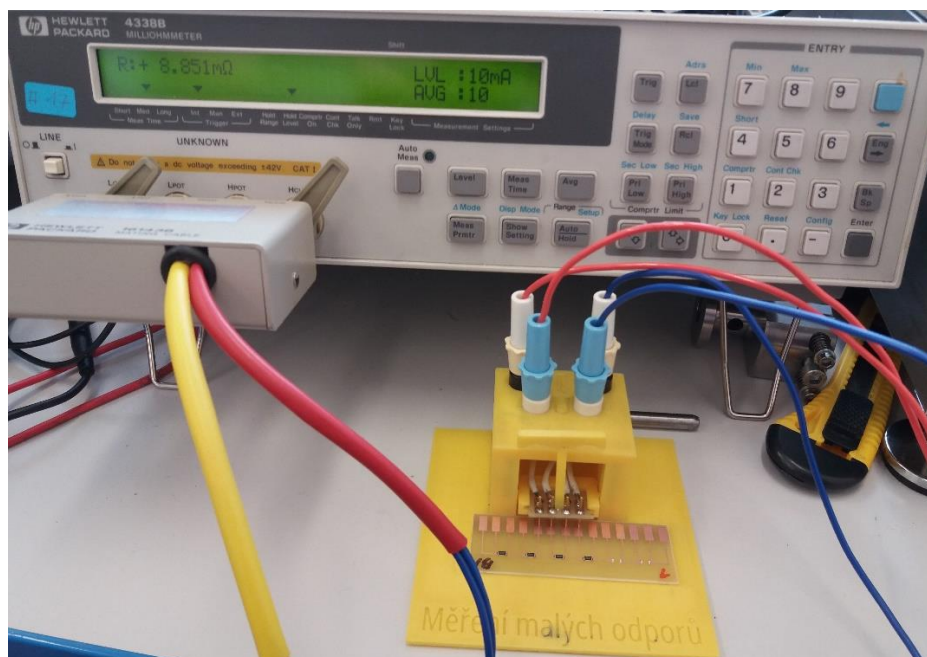
- k přirovnání AX 15S: 20 °C (24 hodin) 60 °C (120 min) 80 °C (100 min)



Obr. 20 Horkovzdušná pec

Čtyřbodové měření odporu

Na obrázku níže můžeme vidět čtyřbodovou metodu, tedy oddělené napěťové a proudové svorky. Napěťové svorky (jehly) jsou umístěny přímo na plošky, které jsou hned u kořene spoje. Proudové svorky (jehly) jsou umístěny na vnější plošky tak, aby se k změřenému odporu nemohl přičíst odpor vodičů a tenké vrstvy na DPS.



Obr. 21 Čtyřbodové měření odporu

Mikrokamera

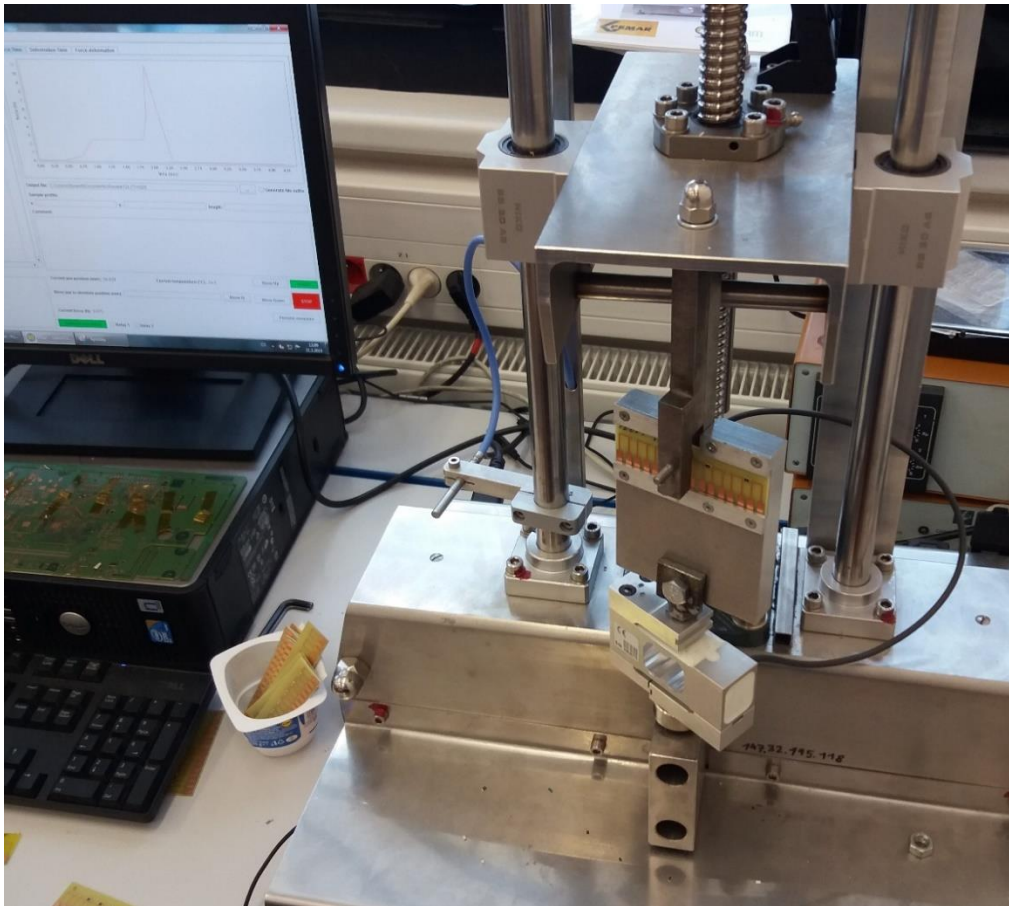
Mikrokamera na obrázku níže je vybavena LED osvětlením a zrcadlovým modulem, který umožňuje fotit pozorované vzorky ze stran (3D efekt).



Obr. 22 Mikrokamera

Trhačka

Trhačka byla připojena k PC, pomocí kterého byla také řízena. Všechny naměřené údaje byly v reálném čase importovány do PC, ve kterém se automaticky vygenerovaly grafy závislosti působené síly na čase. Tyto grafy byly dále použity pro zjištění maxima síly, které bylo zapotřebí ke stržení rezistoru a k výslednému porovnání mechanických vlastností jednotlivých vzorků.



3.1.6 Očekáváníí

Je očekáváno, že spoj, který má větší elektrický odpor, bude méně kvalitní, tudíž by měl vydržet menší sílu při strhávání trhačkou. Ovšem tento předpoklad může platit pouze při srovnávání výsledků ve stejné kategorii vzorků, nikoli mezi jednotlivými kategoriemi. Každá testovaná pasta / lepidlo má různé složení, a tudíž má i různé mechanické a elektrické vlastnosti. Aby toto očekávání platilo, musely by být všechny vzorky vyrobeny naprosto totožně. Toho však nešlo dosáhnout, protože všechny kroky výroby vzorků, až na přetavení / vytvrzení, byly provedeny ručně. Díky tomu mohlo být na některé plošky naneseno méně pasty / lepidla, nebo mohlo dojít ke křivému osazení rezistorů. Například křivě připájený rezistor může mít skvělé elektrické vlastnosti, ale trhačka bude při strhávání působit silou na roh rezistoru, nikoli na celou stranu. Díky tomu dojde k nerovnoměrnému rozložení síly a rezistor odpadne při nižší síle, než kdyby byl připájen rovně.

Očekáváníí – Materiály pro spojování

Od použitých materiálů je očekáváno, že pájky budou mít lepší mechanické i elektrické vlastnosti než elektricky vodivá lepidla. To by se mělo projevit tím, že pájené spoje budou mít menší elektrický odpor a připájené rezistory vydrží větší sílu, než dojde k jejich stržení trhačkou. Naopak od lepených spojů je očekáváno, že budou mít i 10x větší elektrický odpor a vydrží maximálně sílu o velikosti jednotek, až desítek N. Od pájecích past je očekáváno, že

pasta SAC bude mít lepší elektrické vlastnosti než pasty SnBi, což by mělo být způsobeno menším podílem cínu v pastě SnBi. Dále se dá očekávat, že nově koupená pasta SnBi bude mít lepší elektrické i mechanické vlastnosti než pasta s prošlou lhůtou expirace. To by mělo být způsobeno tím, že starší SnBi pasta bude obsahovat nadměrné množství oxidů, které by při přetavení měly “vyplavat“ na povrch. Co se elektricky vodivých lepidel týče, je očekáváno, že díky většímu obsahu stříbrných částic bude mít jednosložkové lepidlo AX 70MN lepší elektrickou vodivost než dvousložkové lepidlo AX 12LVT. Na druhou stranu by lepidlo AX 12LVT mělo vydržet větší sílu při strhávání, protože obsahuje větší množství pojivové složky.

Očekávání – Povrchová úprava DPS

Od povrchových úprav DPS se pro pájené spoje očekává následující. Jelikož má měď nejmenší měrný odpor, spoje na DPS s měděnými ploškami by měly mít nejmenší odpor. Spoje na degradované měděné DPS by měly mít jednoznačně horší elektrické i mechanické vlastnosti. To by mělo být způsobeno díky oxidaci pájecích plošek, což by mělo znatelně snížit kvalitu výsledného spoje. Spoje na pocínované DPS by měly mít o něco horší elektrické vlastnosti než DPS s měděnými ploškami, ale zároveň by měly mít lepší elektrické vlastnosti než pozlacené DPS. I přesto, že má zlato nižší měrný odpor než cín, je stále naneseno na vrstvě niklu, který má asi 4x větší měrný odpor než cín. Spoje na pozlacené DPS by tedy měly mít větší elektrický odpor než pocínované DPS, ale neměly by mít horší vlastnosti než DPS s degradovanou mědí.

Očekávání – Rezistory

Vzhledem k tomu, že jsou plošky rezistorů, které jsou určeny pro pájení pocínovány, a plošky rezistorů, které jsou určeny pro lepení poniklovány, dá se očekávat, že kontakty rezistorů pro lepení budou mít větší odpor a horší smáčivost. Rezistory určené pro lepení jsou navíc staré a degradované, což může v případě pájení způsobit ještě větší problém se smáčivostí. Díky tomu lze očekávat, že odpory určené pro lepení budou mít celkově horší výsledky.

3.2 Naměřená data

Pomocí čtyřbodové metody byly naměřeny elektrické odpory jednotlivých vzorků, tj. odpor obou spojů + odpor rezistoru. Tzn., že bylo třeba naměřené hodnoty přepočítat na odpory jednotlivých spojů. Za tímto účelem byl od naměřené hodnoty odečten odpor rezistoru (6 / 18 mΩ) a výsledná hodnota byla vydělena dvěma, čímž jsem získal průměrnou hodnotu odporu jednoho spoje. Z naměřených grafů závislosti síly na čase byla odečtena maximální hodnota síly, která působila na rezistor v momentě jeho stržení.

Rezistory byly strhávány při různých rychlostech. Zeleně jsou vyznačeny hodnoty odporu rezistorů, které byly strženy na trhačce rychlostí 10 mm/min. Žlutě jsou vyznačeny hodnoty, které byly strženy rychlostí 4 mm/min pro lepené spoje a 2 mm/min pro spoje pájené. Červeně jsou vyznačeny hodnoty rezistorů, které odpadly ještě před samotným trháním a hvězdičkou * jsou vyznačeny hodnoty, které nebyly započteny do statistiky (srovnání) elektrických odporů. Zkratka PÚ znamená povrchová úprava a R – xxx udává, jestli daný sloupec odpovídá rezistorům vhodným pro pájení, nebo pro lepení. Jednotky, ve kterých jsou udávány naměřené hodnoty, jsou napsány vždy v hranatých závorkách v nadpisu každé tabulky.

3.2.1 Elektrické vlastnosti

Senju M31-GRN360-K1MK-V (Sn95,75Ag3,5Cu0,75) [mΩ]									
č. desky (vzorku)	č. rezistoru na desce	PÚ - Měď		PÚ - Oxidovaná měď		PÚ - Cín		PÚ - Zlato	
		R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení
1	1	0,9	20,5	1,5	23,5	1,4	22	1,5	27
	2	0,85	19,5	1,5	21,5	1,1	24,5	1,4	27
	3	1,05	22	1,4	22	1,25	28	1,45	32,5
	4	0,55	25	1,65	22,5	1,25	27	1,8	25
	5	1,05	18,5	1,35	22	1,1	23	1,6	25
	6	1,2	25	1,75	27,5	1,35	21,5	1,6	23,5
	7	0,55	21,5	1,5	25	1,25	31,5	1,95	24,5
2	1	1,3	24,5	1,5	25,5	1,25	25,5	1,6	24,5
	2	0,6	17,5	1,6	23,5	1,15	24	1,55	27,5
	3	0,75	22	1,85	24	1,05	23,5	1,55	25,5
	4	0,95	23	1,8	22,5	1,3	27,5	1,5	28
	5	0,6	24	1,9	23,5	1,4	24,5	1,5	29
	6	1,15	24,5	1,95	22,5	1,2	25	1,2	26,5
	7	0,65	23	1,65	25,5	1,6	23	1,6	27,5
3	1	0,9	N/A	1,7	N/A	1,7	N/A	1,35	N/A
	2	1,4		1,55		1,35		1,35	
	3	1,25		1,55		1,4		1,4	
	4	1,2		1,6		1,6		1,6	
	5	1,35		1,65		1,6		1,5	
	6	0,85		1,75		1,6		1,2	
	7	1,45		1,65		1,45		1,4	

Tabulka 2 Elektrický odpor spojů SAC

AMTECH-NC-31 - nově koupená (90% vodivých částic Sn42Bi56) [mΩ]									
č. desky (vzorku)	č. rezistoru na desce	PÚ - Měď		PÚ - Oxidovaná měď		PÚ - Cín		PÚ - Zlato	
		R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení
1	1	1,1	22,5	2,25	26	1,5	26	1,55	26,5
	2	1	20,5	2,15	25,5	1,7	25	1,2	22,5
	3	1,3	23,5	2,2	27,5	1,75	26	1,7	*167
	4	1,6	22,5	2,05	27	1,55	22	1,8	24,5
	5	1,4	25,5	2,4	23,5	1,25	24	1,4	*378,5
	6	1,25	22,5	2,3	25	1,45	28,5	1,35	24
	7	1,35	28	2,15	24,5	1,15	25	1,25	25
2	1	1,05	N/A	2,15	N/A	1,8	N/A	1,5	N/A
	2	1,2		1,85		1,1		1,75	
	3	1,4		2,2		1,4		1,55	
	4	1,6		1,9		1,5		1,9	
	5	1,6		2,45		1,1		1,6	
	6	1,25		1,95		1,8		1,75	
	7	1,45		2,25		1,55		1,35	

Tabulka 3 Elektrický odpor spojů SnBi – nová

Senju NC-31 - prošlá lhůta expirace (90% vodivých částic Sn42Bi56) [mΩ]									
č. desky (vzorku)	č. rezistoru na desce	PÚ - Měď		PÚ - Oxidovaná měď		PÚ - Cín		PÚ - Zlato	
		R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení
1	1	1,7	26	2	*114	2	24,5	2,5	23,5
	2	2,2	23,5	2,5	27	1,6	27,5	1,65	27,5
	3	1,55	30,5	2,5	27,5	2	26	2	24,5
	4	1,35	22,5	2	*54,5	2,5	26,5	1,9	29
	5	2,3	27,5	2,5	28,5	2,5	27,5	1,85	29,5
	6	1,1	24	2	29,5	2,5	25	1,15	22
	7	1,2	25	1,65	32	2,5	24	1,45	27,5
2	1	1,8	21	2	23,5	2	27	2,5	24
	2	1	26	1,95	25,5	1,75	27	2	27
	3	1,55	21,5	2,3	26	1,9	27,5	1,9	24
	4	1,05	23	2,15	28	2	23,5	1,85	25
	5	1	24	2	29,5	2	29	1,65	28,5
	6	1,25	23	1,85	26	1,6	28	1,9	27
	7	2,1	24	2,5		1,55	*71	1,95	
3	1	1,05	N/A	2,5	N/A	1,8	N/A	2,5	N/A
	2	1,4		2,5		1,95		1,8	
	3	1,65		2		2		1,8	
	4	1		1,9		2		1,2	
	5	1,05		2,3		2		2	
	6	1,1		1,9		1,65		1,55	
	7	1,15		2,6		2		1,95	

Tabulka 4 Elektrický odpor spojů SnBi – stará

Elpox AX 70MN (70% stříbrných částic) [mΩ]									
č. desky (vzorku)	č. rezistoru na desce	PÚ - Měď		PÚ - Oxidovaná měď		PÚ - Cín		PÚ - Zlato	
		R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení
1	1	*190,5	44,5	62,5	45,5	*268	60,5	93,5	49,5
	2	*104,5	49	112	79	*205	85	77	46
	3	33,15	54	115	39,05	144	*170,5	82	35,25
	4	49	41,5	135,5	*140,5	94	85,5	27,95	59,5
	5	74	44,5	67	39,7	61	58	48,5	57,5
	6	79	47	*181	75,5	*298,5	101	61	35,8
	7	*238,5	42,5	86,5	50	*225,5	124	*235	
2	1	71,5	34,45	*174,5	47	57	61	65,5	47
	2	76,5	39,25	90,5	56,5	134	64	109	39,8
	3	59,5		110,5	90	146,5	98	85	43,5
	4	60	44,5	*218	49	89	110	115,5	43
	5	78	44,5	*176,5		109	102	87	50
	6	64,5	38,5	78		*161	85,5	112	38,75
	7	63,5	97	*192,5	*309,5	138,5	66	42,1	43
3	1	93,5	46	119,5	55,5	43,05	95,5	34,75	39
	2	*177,5	*119	*158,5	47,5	57	95	73	*641
	3	59,5	54	110,5	68,5	79	67,5	97	41
	4	65	38,8	117,5	50,5	109	98,5	120	60
	5	67	53,5	106,5	53,5	*187	77,5	47,5	69
	6	96	44		59,5	*355	88,5	65	35,5
	7	*127	54	55,5	56	38,6	70	148	44

Tabulka 5 Elektrický odpor spojů AX 70MN (jednosložkové lepidlo)

Elpox AX 12LVT - proslá lhůta expirace (55 % stříbrných částic) [Ω]									
č. desky (vzorku)	č. rezistoru na desce	PÚ - Měď		PÚ - Oxidovaná měď		PÚ - Cín		PÚ - Zlato	
		R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení
1	1	0,0465		3,3	8,75	30	7,5	3,25	9,5
	2	0,0235	2,4	0,46	4,75	28	126,5	1,2	11
	3	0,091	2,5	1,3	2,3	187,5	13,5	9,5	7,5
	4	0,17	2,4	2,5	1,25	31	90	2,1	4,9
	5	0,152	1,85		12,3	17,5	30	6	6,5
	6	0,65	2,85		15,3	31	21,5	40	5,5
	7	0,1145	6,5				24,5	16,5	7,5
2	1	4,4	7,5	0,47					
	2	39		0,2375					
	3	18,5		0,15					
	4	7		0,25					
	5	10,5	4,1	1,4					
	6	17,5	10	0,275					
	7	45,5		0,12					

Zbylé cca 3/5 vzorků nebyly měřeny a uvedeny do tabulky z důvodu nadměru vysokých odporů a velkého množství odpadnutých rezistorů.

Tabulka 6 Elektrický odpor spojů AX 12LVT (dvousložkové lepidlo)

3.2.2 Mechanické vlastnosti

Senju M31-GRN360-K1MK-V (Sn95,75Ag3,5Cu0,75) [N]							
PÚ - Měď		PÚ - Oxidovaná měď		PÚ - Cín		PÚ - Zlato	
R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení
110	27,5	85	35	90	53	74	70
82	33,5	101	16,8	85	42	65	43
80	58	74	17	84	57	85	54
106	32,5	60	12	72,5	50	63	55
95		100	37,5	109		108	
83		78	10	66		80	
82		57					
72		90					
100		59					
65							
76							
75							
78							
115							

Tabulka 7 Kritická síla pro rezistory připájené pomocí SAC

AMTECH-NC-31 - nově koupená (90% vodivých částic Sn42Bi56) [N]							
PÚ - Měď		PÚ - Oxidovaná měď		PÚ - Cín		PÚ - Zlato	
R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení
115	7	105	6,5	57,5	5,7	115	22,5
115	9	90	4,5	83	13,5	80,5	9
86		91		80		114	3,3
105		62,5		57		82	
85							
100							

Tabulka 8 Kritická síla pro rezistory připájené pomocí SnBi – nová

Senju NC-31 - prošlá lhůta expirace (90% vodivých částic Sn42Bi56) [N]							
PÚ - Měď		PÚ - Oxidovaná měď		PÚ - Cín		PÚ - Zlato	
R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení
100	11	98	9,2	90	15	130	8,4
80	10,6	94	17,5	90	9,7	100	12
100	7	60	4	72	12,5	55	7,3
105		71	7,6	100	8,4	85	10
106		80		90		86	
76		100		122		76	
						105	

Tabulka 9 Kritická síla pro rezistory připájené pomocí SnBi – stará

Elpox AX 70MN (70% stříbrných částic) [N]							
PÚ - Měď		PÚ - Oxidovaná měď		PÚ - Cín		PÚ - Zlato	
R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení
10	3,5	10	6,5	8,5	6,4	5,5	7,6
5	3,6	8,5	4,5	5,6	2,6	11,1	6,3
3,6	3,5	7,3	2,6	6	7,3	5	7,5
2,6	2,8	7,1	2,4	5,4	9,4	10,5	10
9,2	7	7,5	4,4	14,8	10,5	9,5	12,2
13	4,7	8,1	7	9,5	6,2	4,5	6,7
11,2	7,5		4,5	3,3	7	4,8	8,5
11,1	5,3			12			
3,3	5,6			12,5			
6	5,1			9			

Tabulka 10 Kritická síla pro rezistory přilepené pomocí AX 70MN

Elpox AX 12LVT - prošlá lhůta expirace (55% stříbrných částic) [N]							
PÚ - Měď		PÚ - Oxidovaná měď		PÚ - Cín		PÚ - Zlato	
R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení
25	9,4	16,3	9,4	30	13,6	43	15
30	5,2	33	6,7	30	7,2	12,5	11,5
40	11	27					
12							
7,3							

Tabulka 11 Kritická síla pro rezistory přilepené pomocí AX 12LVT

3.3 Srovnání vlastností

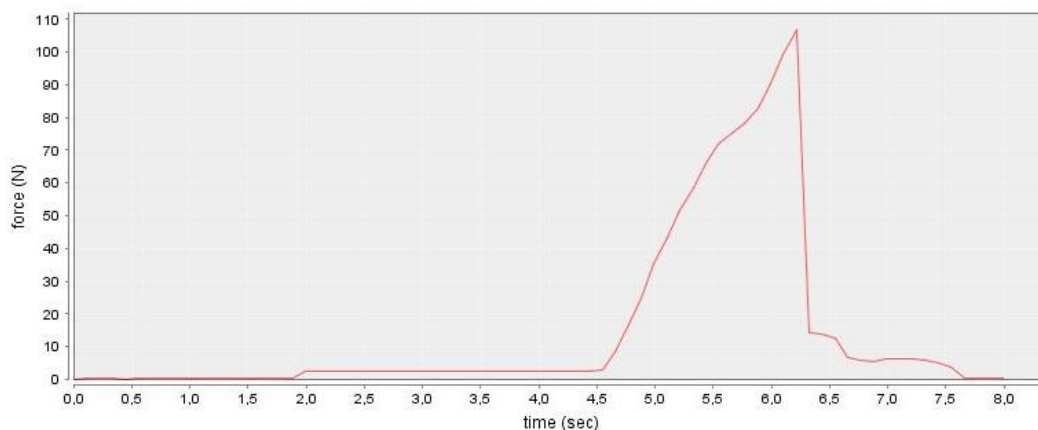
Vzorky jsou pojmenovány následovně:

Povrchová úprava – typ rezistoru – číslo DPS a číslo rezistoru na DPS (zkratka)

3.3.1 SAC

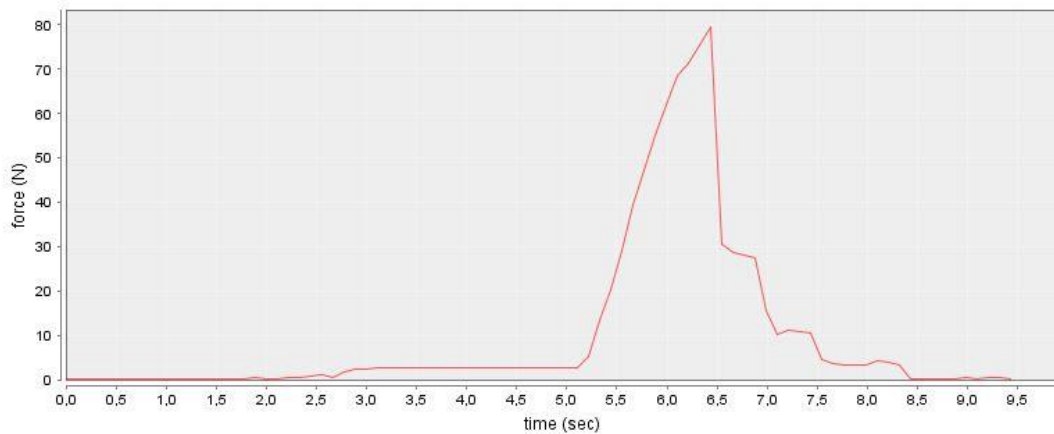
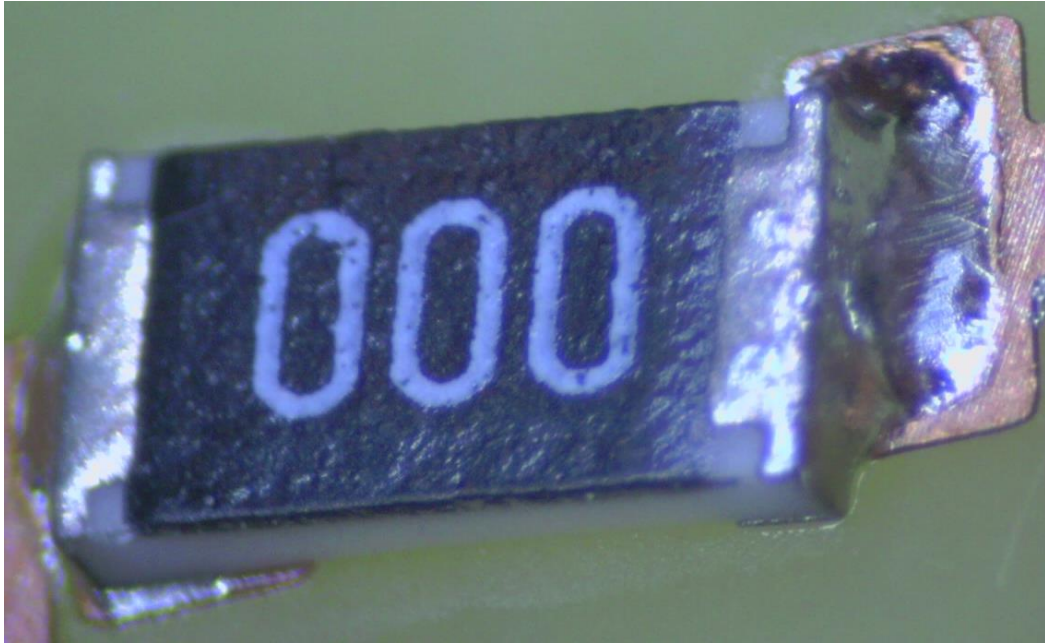
Měď – pájení – 14 (mp14)

Na obrázku níže můžeme pozorovat vynikající smáčivost pájecí pasty SAC. Pájka dobře smáčí jak kontakt rezistoru, tak pájecí plošku DPS. Spoj má odpor 0,55 mΩ a vydržel sílu 110 N.



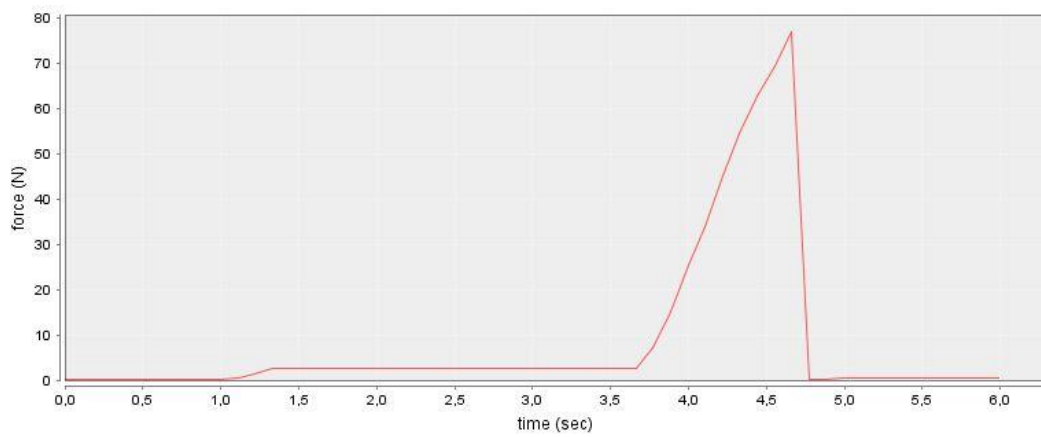
Měď – pájení – 13 (mp13)

Na tomto obrázku můžeme vidět křivě umístěný rezistor na pájecích ploškách DPS. Protože pájka smáčí pouze kovové plošky DPS, kontakt rezistoru není dostatečně smočen. To má negativní vliv na kvalitu spoje, který vydržel sílu o velikosti pouhých 80 N a má odpor o velikosti 1,05 mΩ. Na průběhu strhávání můžeme pozorovat, že po stržení rezistoru (dosažení maxima) trhačka začala strhávat zbylou pájku na ploškách DPS.



Oxidovaná měď – pájení – 22 (omp22)

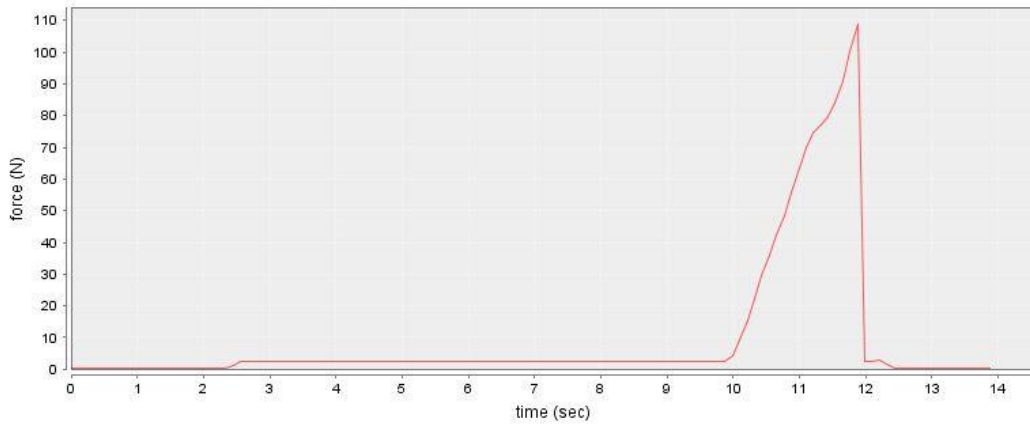
Přestože je kontakt na DPS silně oxidovaný, na tomto obrázku můžeme pozorovat velmi dobrou smáčivost pájky. Tavidlo, které je obsaženo v pastě, rozrušilo vrstvy oxidů a vytlačilo je ven z pájecího prostoru. Ačkoli spoj vypadá celkem spolehlivě, nedosahuje stejné kvality jako spoj na čisté měděné podložce. Spoj má odpor 1,6 m Ω a vydržel pouze sílu 80 N.



Cín – pájení – 12 (cp12)

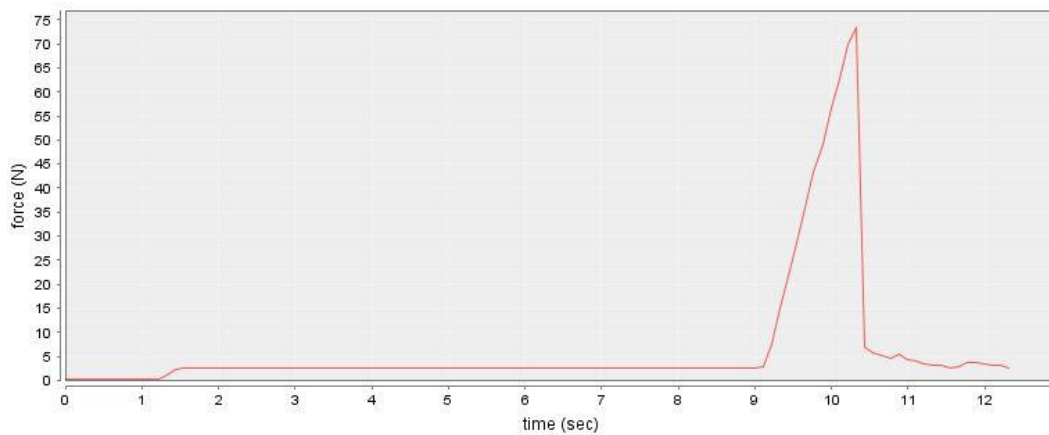
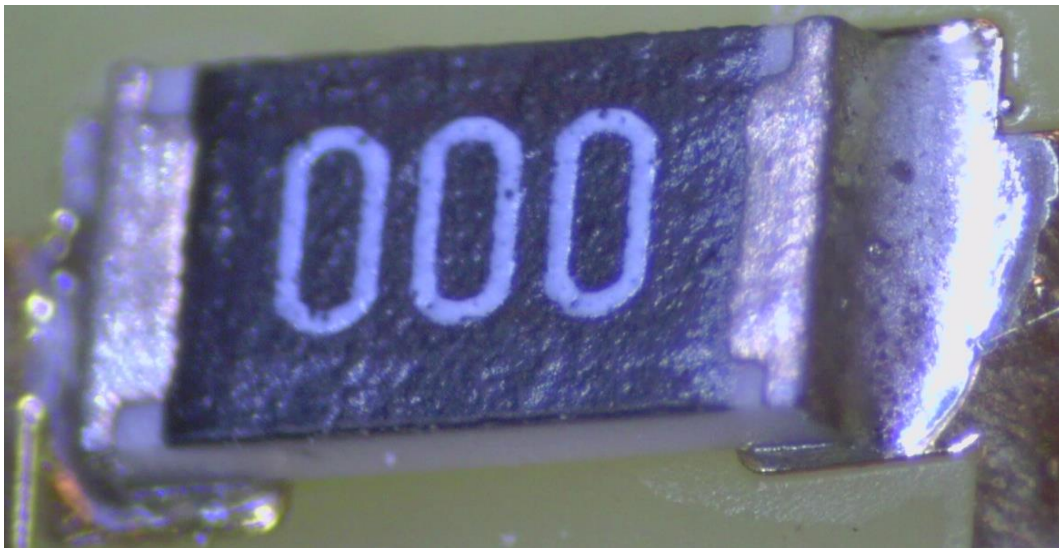
Na tomto obrázku vidíme velmi dobrou smáčivost pájky vůči cínovému povrchu na DPS a kontaktu rezistoru. V podstatě ani není možné rozeznat, kde končí spoj a kde začíná povrch DPS. Tento spoj vydržel sílu 110 N a má odpor 1,1 m Ω .





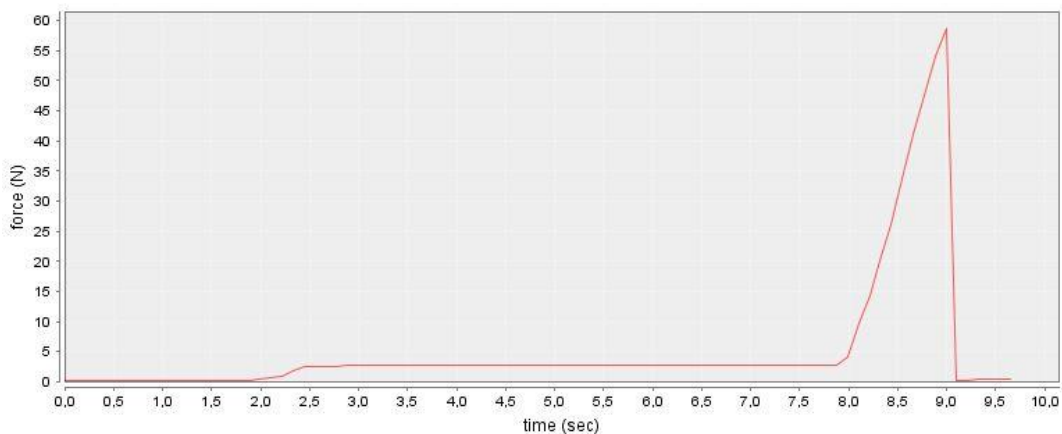
Zlato – pájení – 12 (zp12)

Na tomto vzorku můžeme pozorovat vynikající smáčení pájky s DPS a s kontaktem rezistoru. Přechod mezi pájkou a pozlaceným povrchem vypadá naprosto hladce, což vypovídá o vynikající smáčivosti zlata. Avšak oproti měděné podložce vydržel tento spoj jen sílu 74 N a má odpor 1,4 mΩ.



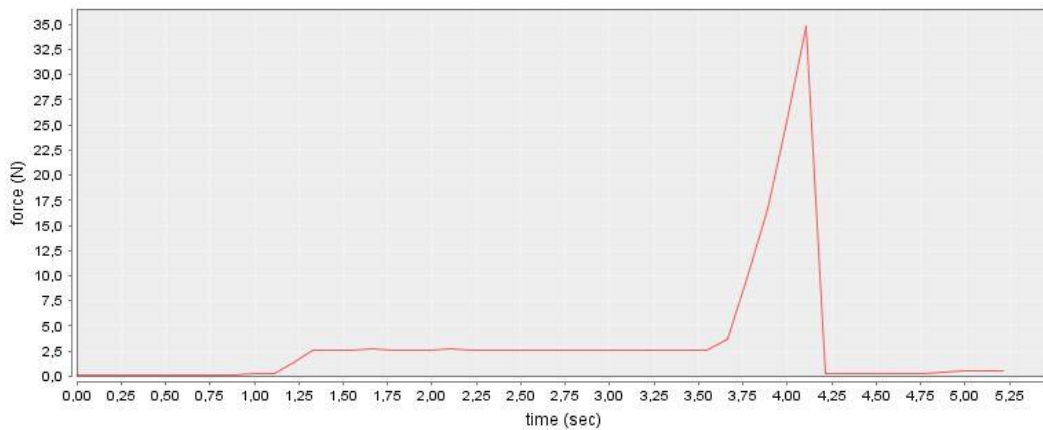
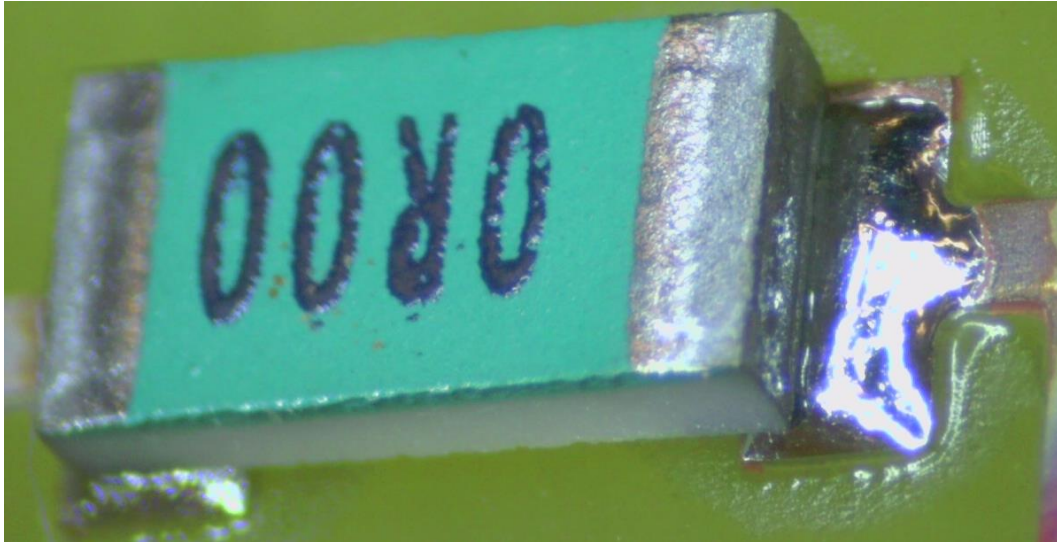
Měď – lepení – 22 (ml22)

Tento obrázek ukazuje velice špatnou smáčivost pájky SAC vůči rezistorům určených k lepení. To může být způsobeno degradací rezistorů, nebo tím, že jsou vývody poniklovány. I přes velmi špatnou smáčivost spoj vydržel sílu 58 N, odpor spoje činí 17,5 mΩ.



Oxidovaná měď – lepení – 12 (oml12)

Na tomto obrázku je vidět opět velmi špatná smáčivost kontaktu rezistoru. Pájecí pasta vytvořila po přetavení na DPS kopeček, který dokonce vytlačil rezistor vzhůru. Spoj má odpor 21,5 mΩ a vydržel pouze sílu 35 N. Ostatní typy povrchových úprav na tom byly podobně, proto již nebyly dále uváděny.

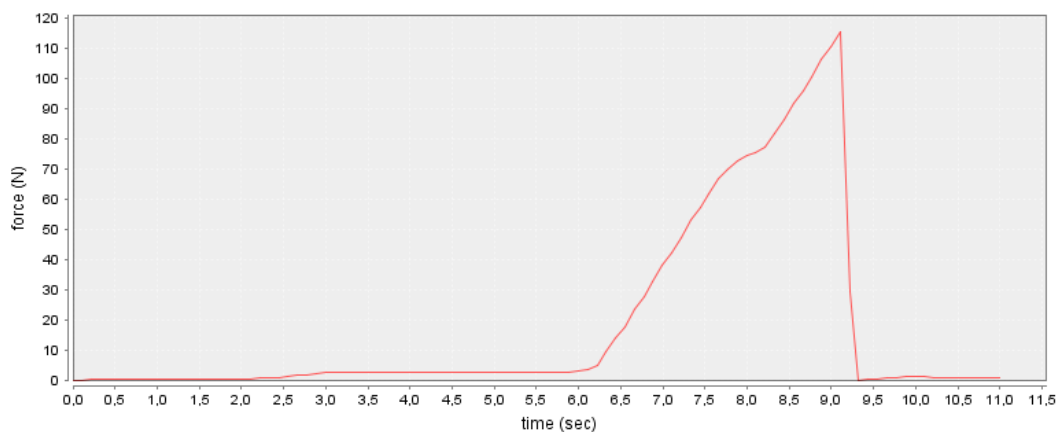


3.3.2 SnBi – nová (AMTECH)

Měď – pájení – 11 (mp11)

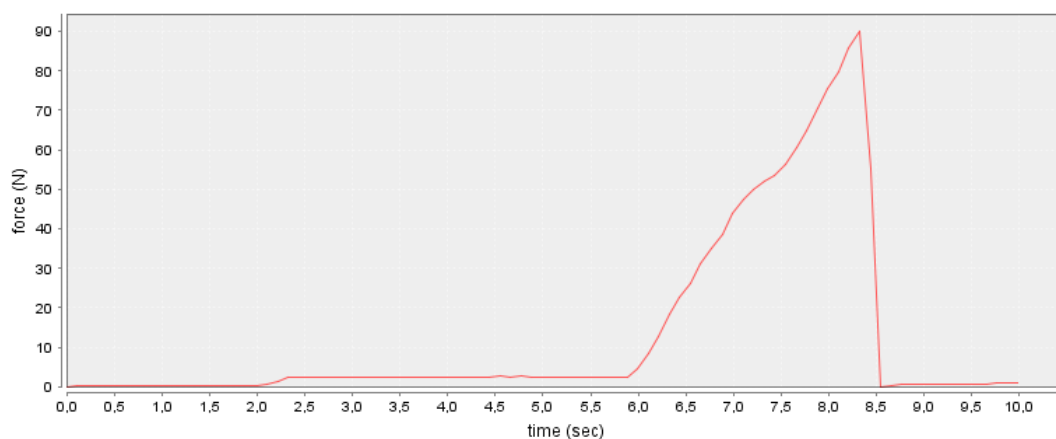
Na tomto obrázku můžeme pozorovat dobré smáčení pájecí pasty SnBi od firmy AMTECH a to jak s povrchem DPS, tak s rezistorem. Na spoji jsou sem tam malé bublinky, což jsou oxidy, které při přetavení vyplavaly na povrch. Spoj vydržel sílu 115 N a má odpor 1,1 m Ω .





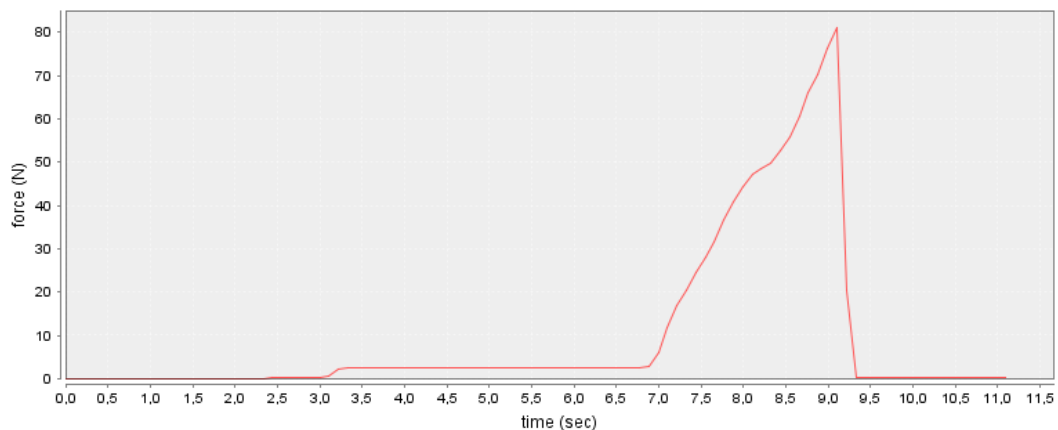
Oxidovaná měď – pájení – 15 (omp 15)

Na tomto obrázku lze v podstatě pozorovat to samé jako na předchozím, až na to, že spoj není tak kvalitní kvůli oxidované pájecí plošce na DPS. Díky tomu vydržel spoj pouze sílu 90 N a má relativně velký odpor 2,4 mΩ.



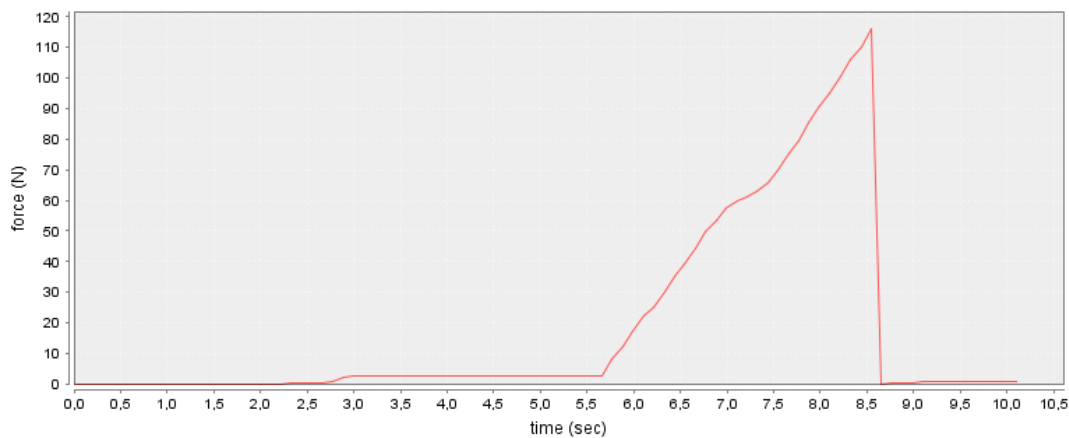
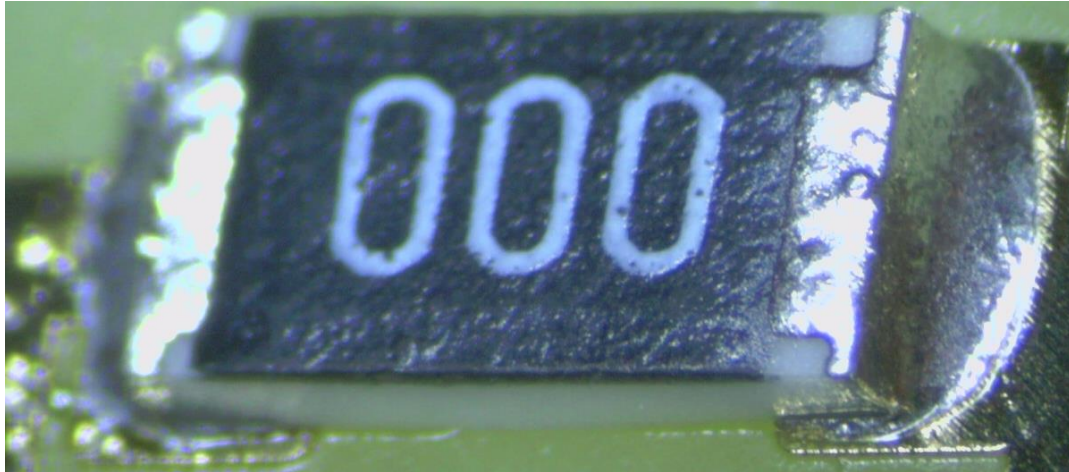
Cín – pájení – 22 (cp22)

Na tomto obrázku je vidět, že SnBi pasta od firmy AMTECH má problém se smáčivostí na cínovém povrchu. Pájka poměrně dobře smáčí kontakt rezistoru, ale na DPS tvoří spíše hroudu, místo toho, aby se rozlila po povrchu DPS. Spoj tedy vypadá mohutně a bytelně, avšak vydržel pouze sílu 80 N, na druhou stranu má spoj odpor jen 1,1 mΩ. Ostatní vzorky s touto pastou dopadly na cínovém povrchu podobně, z toho vyplývá, že je SnBi pasta od firmy Senju s prošlou lhůtou expirace lepší než pasta nová.



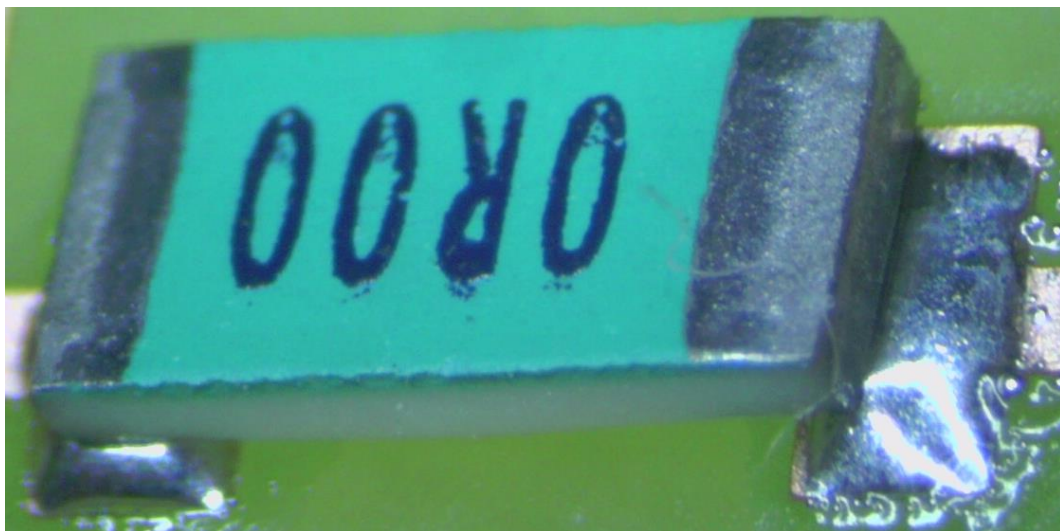
Zlato – pájení – 17 (zp17)

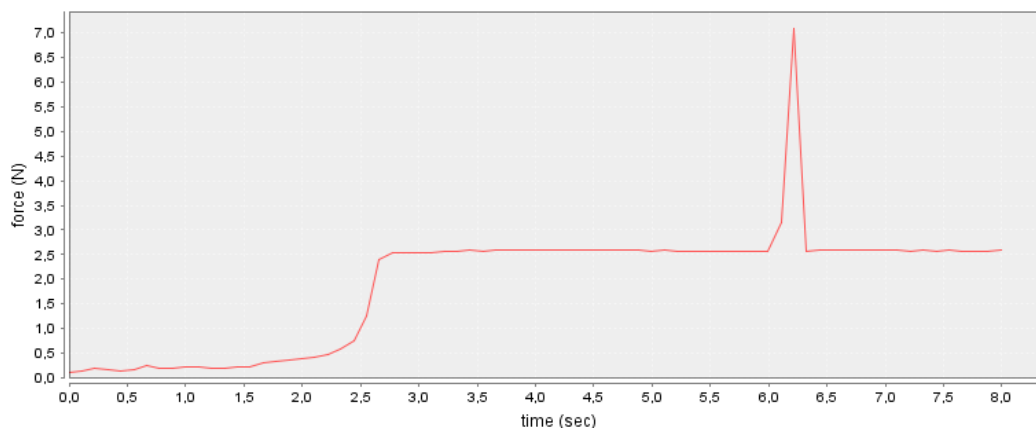
Oproti předchozímu obrázku je pájka na pozlacené DPS více rozlita a jakoby prohnutá. Spoj nemá tvar hroudy, ale je krásně roztažen po povrchu DPS, což svědčí o dobré smáčivosti této pájky na pozlaceném povrchu. Spoj vydržel sílu 114 N a má odpor 1,25 mΩ.



Měď – lepení – 11 (ml11)

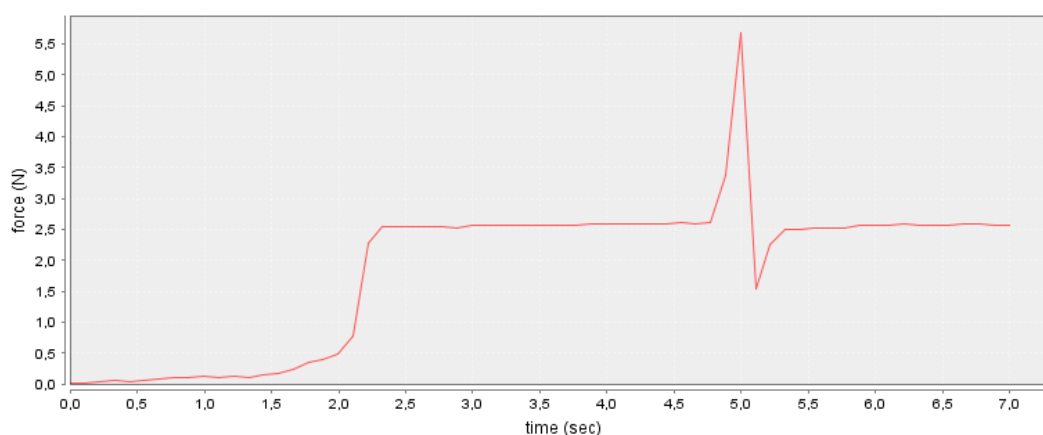
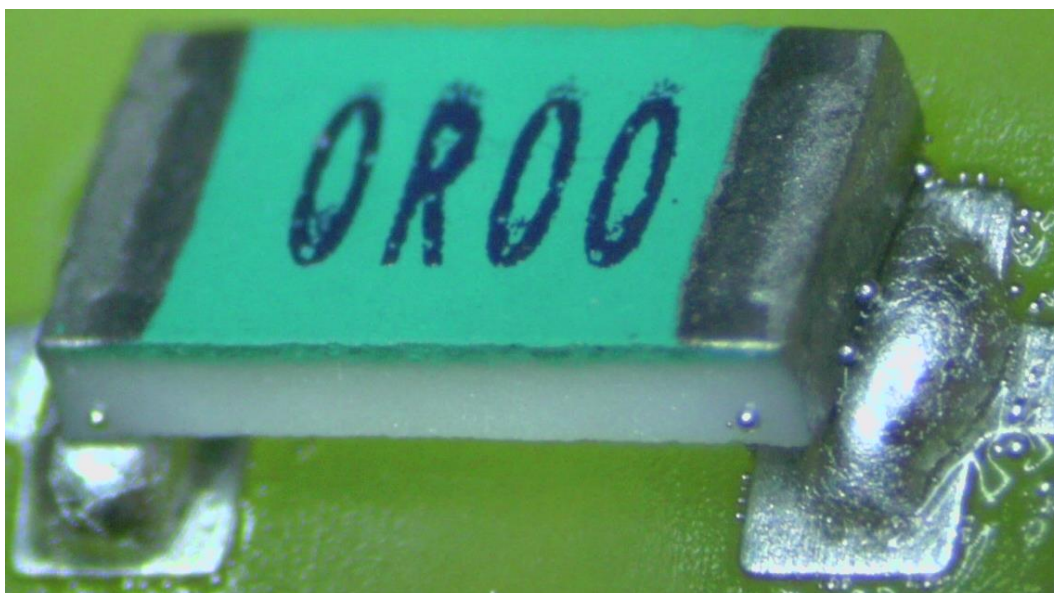
Na tomto obrázku lze pozorovat, že pasta SnBi od firmy AMTECH naprosto vůbec nesmáčí poniklovaný povrch rezistoru určeného pro lepení, který byl nadzvednut na obou padech. Smáčivost s povrchem DPS je celkem obstojná, spoj však vydržel sílu pouhých 7 N a má odpor o velikosti 22,5 mΩ. Pro DPS s oxidovanou mědí a pozlacením jsou výsledky obdobné, proto nebyly dále uváděny.





Cín – lepení – 12 (cl12)

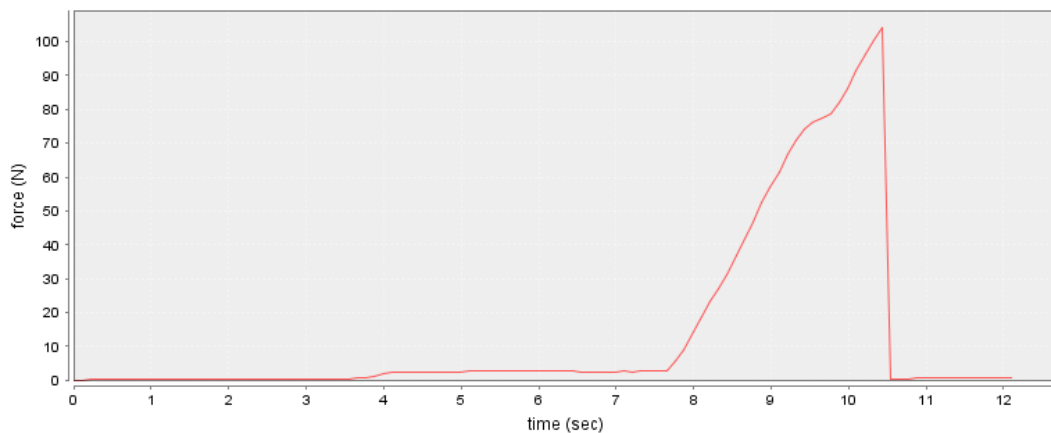
Na tomto obrázku lze ještě lépe pozorovat velice špatnou vlastnost smáčení pasty SnBi od firmy AMTECH na cínovém povrchu. Oproti předchozímu obrázku se pájka nerozlila ani po celém padu a vytvořila hrudku. Spoj má odpor 25 mΩ a vydržel sílu 5,7 N.



3.3.3 SnBi – stará (Senju)

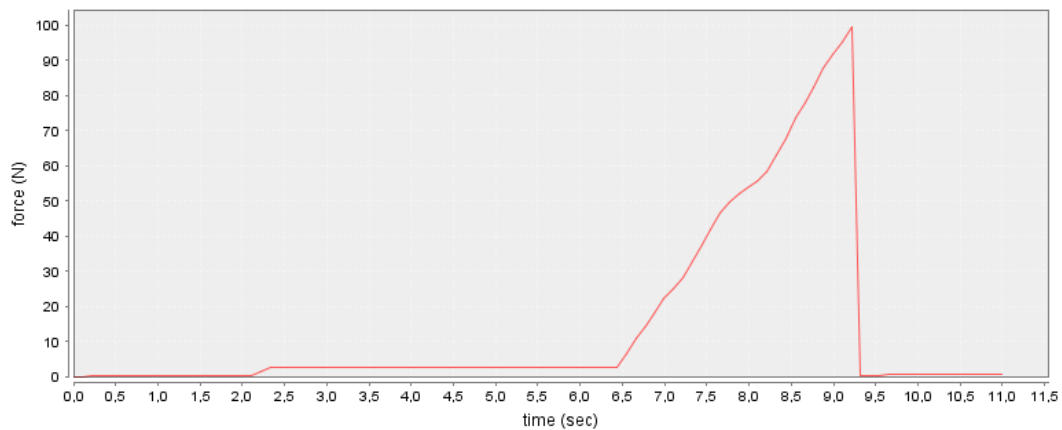
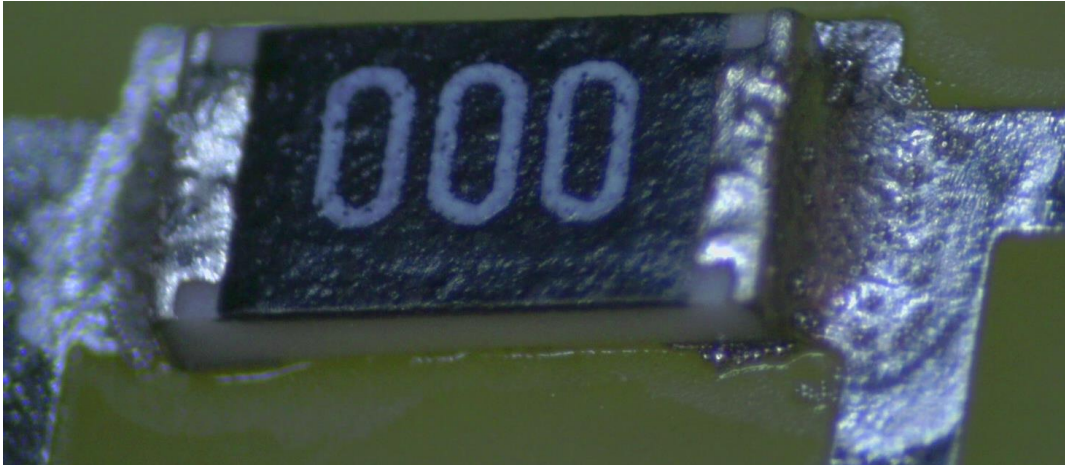
Měď – pájení – 16 (mp16)

Na tomto obrázku lze vidět, že i přes stáří a znatelnou oxidaci pájecí pasty od firmy Senju došlo k celkem slušnému smáčení rezistoru i DPS. Na povrchu spoje je vidět znatelné množství bublinek, které vznikly díky oxidům, které z pasty vyplavaly při přetavení. Spoj má odpor 1,1 m Ω a vydržel sílu o velikosti 105 N. Pro oxidovanou měď a pozlacený povrch je výsledek obdobný, proto tyto vzorky nebyly dále uváděny.



Cín – pájení – 26 (co26)

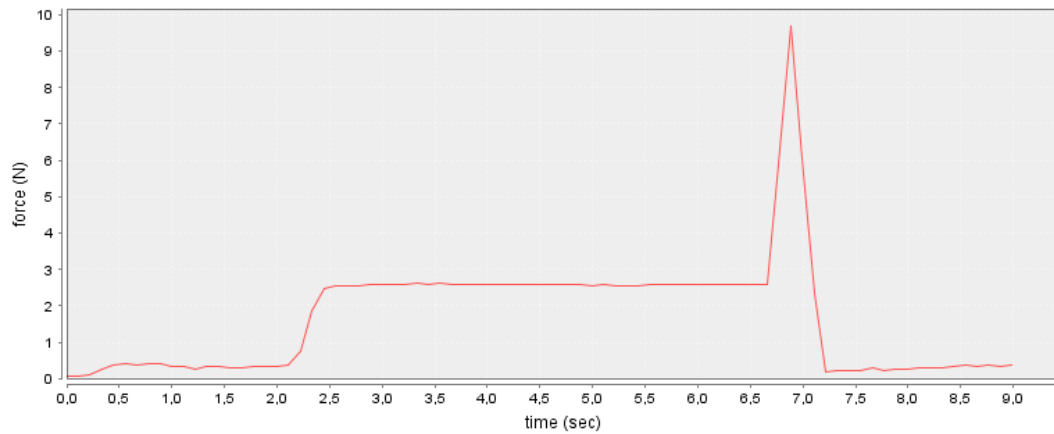
Na rozdíl od pasty SnBi od AMTECH, pasta od Senju velice efektivně smáčí cínový povrch DPS a roztekla se po celé ploše kontaktu. Díky tomu vzorky s pájecí pastou SnBi od Senju vydržely v průměru větší sílu. Tento spoj vydržel sílu 100 N a má odpor 1,6 m Ω .



Cín – lepení – 13 (cl13)

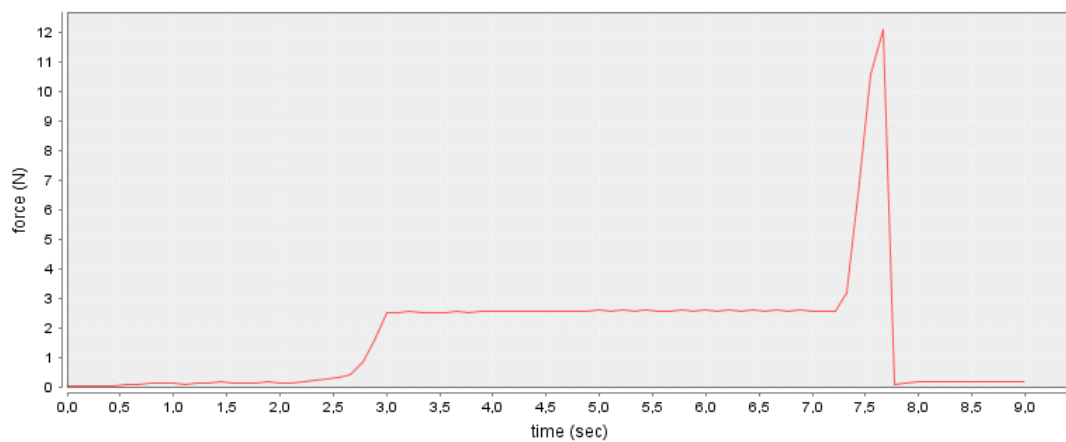
Na tomto vzorku je vidět opět velmi dobrá smáčivost pájky na cínovém povrchu DPS a velmi špatná smáčivost vůči rezistorům určeným k lepení. Na obrázku lze vidět, že se pájka ve velkém množství rozlila mimo pájecí plošku a v podstatě odtekla pryč od kontaktu poniklovaného rezistoru. Tento spoj vydržel sílu pouhých 9,7 N a má odpor 26 m Ω .





Zlato – lepení – 14 (zl14)

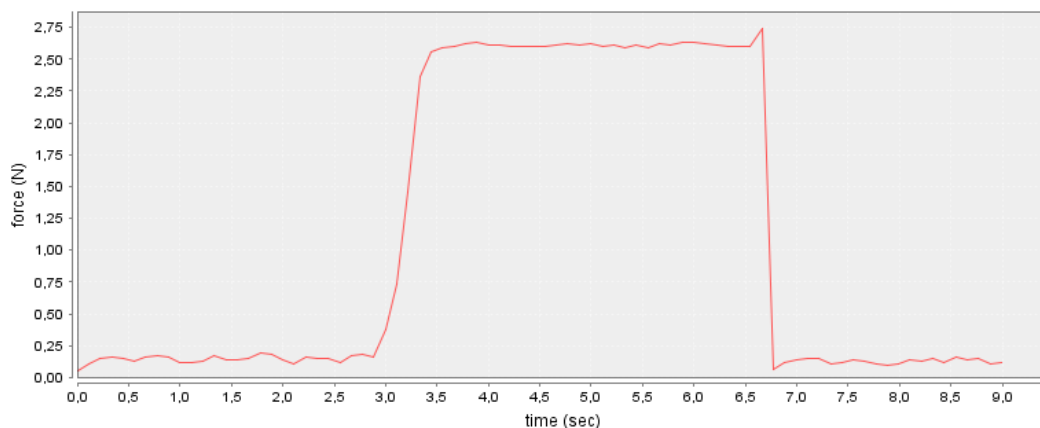
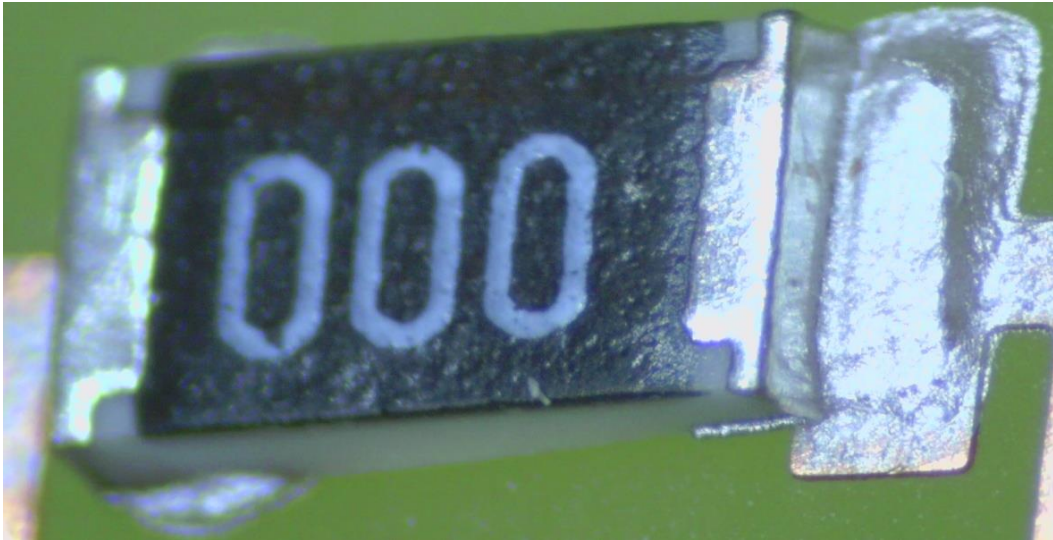
Na tomto obrázku lze opět pozorovat, že kontakty rezistoru pro pájení vůbec nebyly smočeny a rezistor byl nadzvednut. Smáčení plošek DPS je v pořádku. Spoj vydržel sílu 12 N a má odpor 29 mΩ. Vzorky pro měděné povrchy dopadly obdobně, proto již nebyly dále uváděny.



3.3.4 AX 70 MN

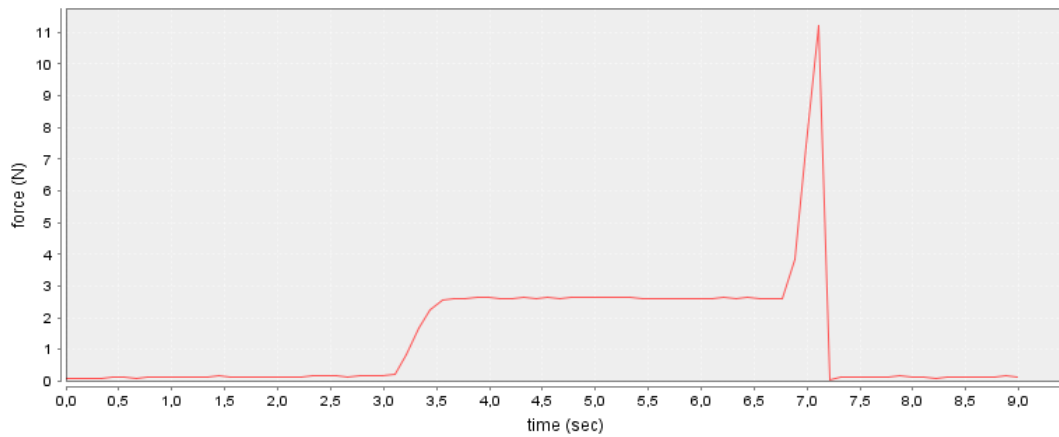
Měď – pájení – 17 (mp17)

Rezistor na tomto vzorku byl umístěn přímo na pájecí plošky DPS a poté byl odsunut do strany. Na pravé pájecí plošce lze pozorovat takto vzniklý důlek v lepidle, který zde setrval i po vytvrzení lepidla. To je způsobeno absencí smáčivosti a roztékavosti u elektricky vodivých lepidel. Pájka by se při přetavení rozlila po kontaktu rezistoru a po DPS, díky čemuž by došlo k lehkému srovnání špatně osazeného rezistoru. Absencí smáčivosti a roztékavosti vydržel tento vzorek pouze sílu 2,75 N a má velmi velký odpor 238,5 m Ω .



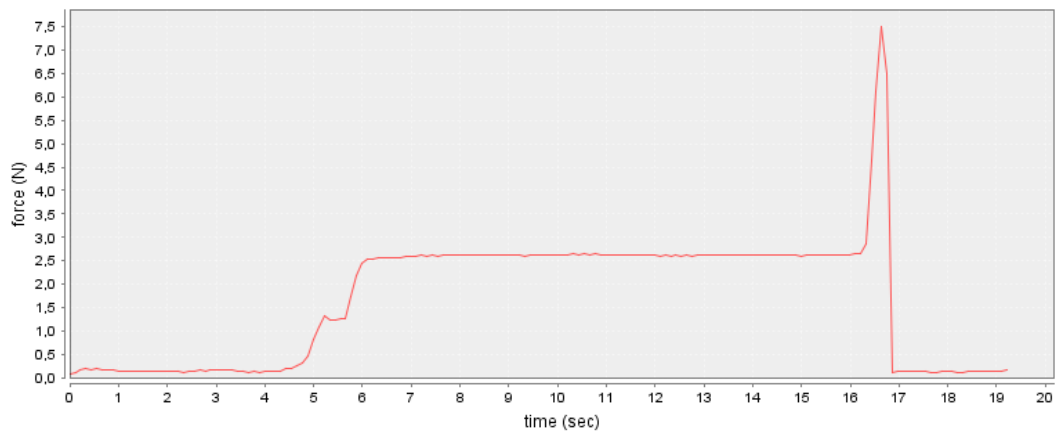
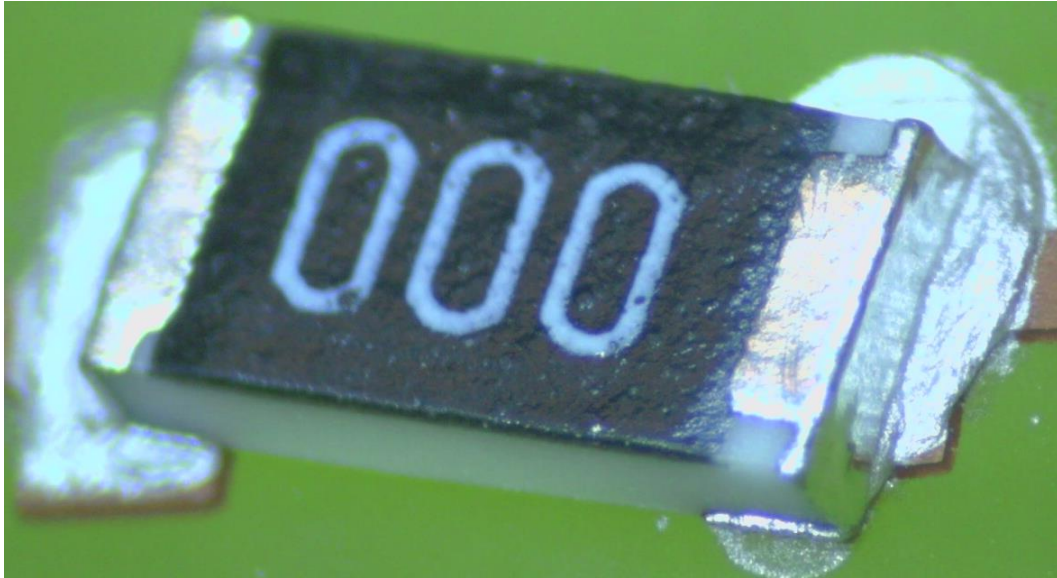
Měď – pájení – 26 (mp26)

Na tomto obrázku lze vidět, jak vypadá spoj s celkem přesně osazeným rezistorem. Rezistor byl posazen přímo na pájecí plošky a už s ním nebylo hýbáno. I přesto je vidět, že lepidlo utvořilo hroudu a nijak nesmáčí ani kontakt rezistoru, ani pájecí plošku DPS. Oproti předchozímu obrázku lze vidět, že při přesnějším osazení může spoj vydržet klidně sílu 11 N. Odpor spoje činí 78 m Ω .



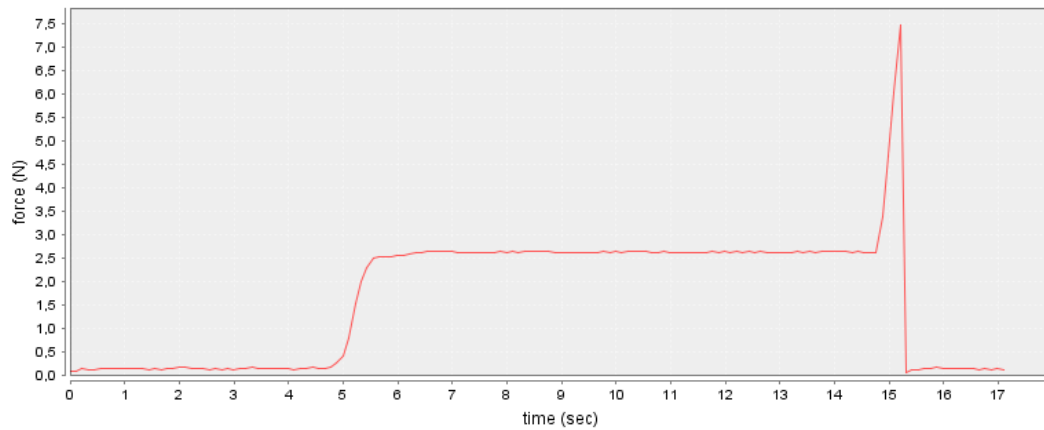
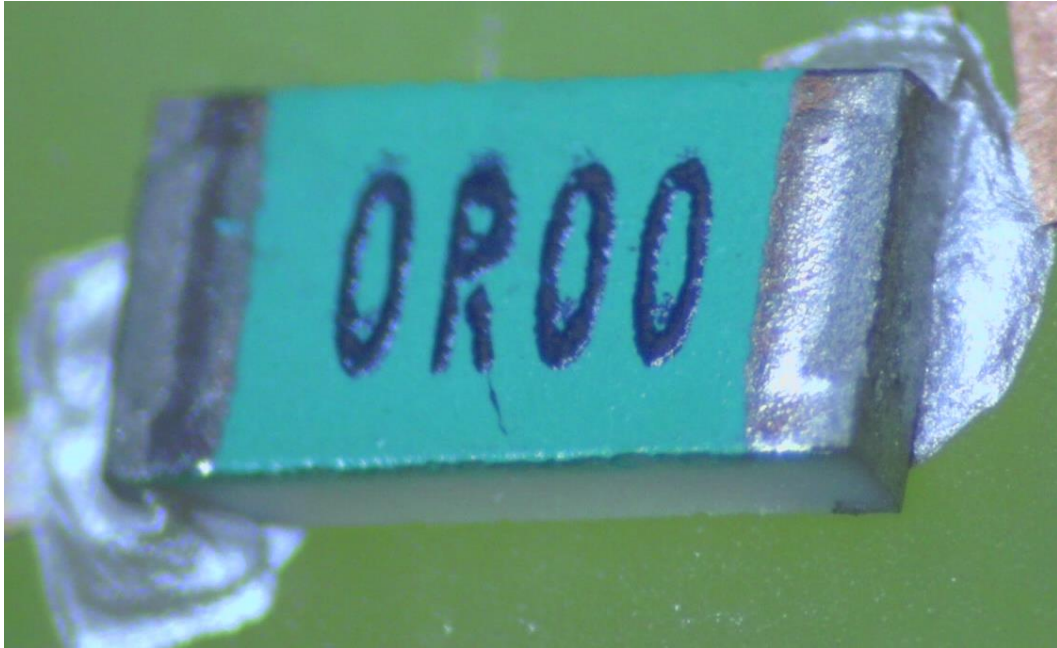
Oxidovaná měď – pájení – 35 (omp35)

Na tomto obrázku je vidět křivě osazený rezistor. Pokud by byla k vytvoření spoje použita pájka s dobrou smáčivostí, například SAC, tak by při přetavení došlo k lehkému srovnání rezistoru s pájecími plochami DPS. Lepidlo ovšem při vytvrzování neprochází skrz kapalnou formu a nemá žádnou smáčivost, tudíž rezistor zůstal přesně v takové pozici, v jaké byl na DPS osazen. Tento spoj vydržel sílu o velikosti 7,5 N a má odpor 106,5 mΩ. Ostatní povrchové úpravy mají obdobný výsledek, proto nebyly uváděny.



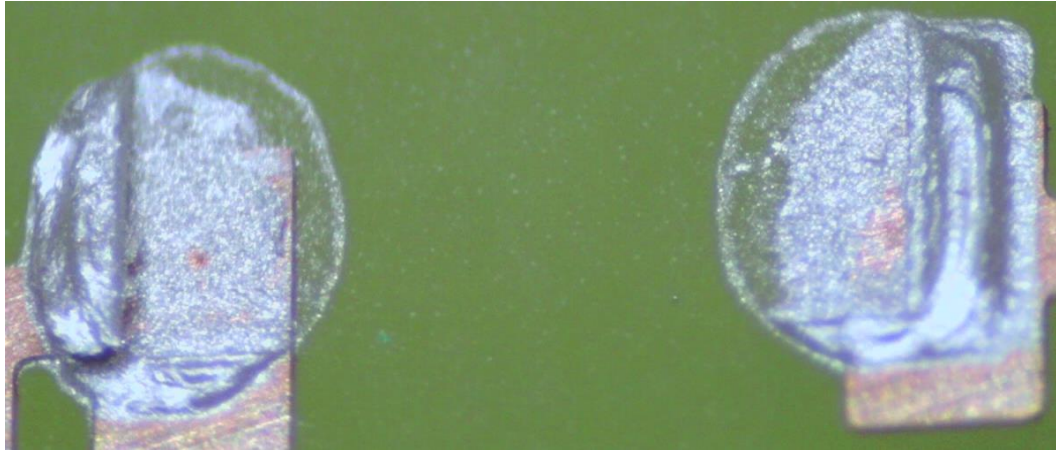
Měď – lepení – 22 (ml22)

Na tomto obrázku lze v podstatě pozorovat to samé, jako na předchozím obrázku, pouze s tím rozdílem, že byl použit rezistor určený pro lepení. V obou případech nemá lepidlo žádnou smáčivost s kontakty rezistoru a pájecími ploškami DPS. Z průběhu strhávání lze vidět, že oba vzorky mají přibližně stejný výsledek, spoj vydržel sílu 7,5 N. Odpor spoje s rezistorem určeným pro lepení činí pouze 39,25 mΩ.



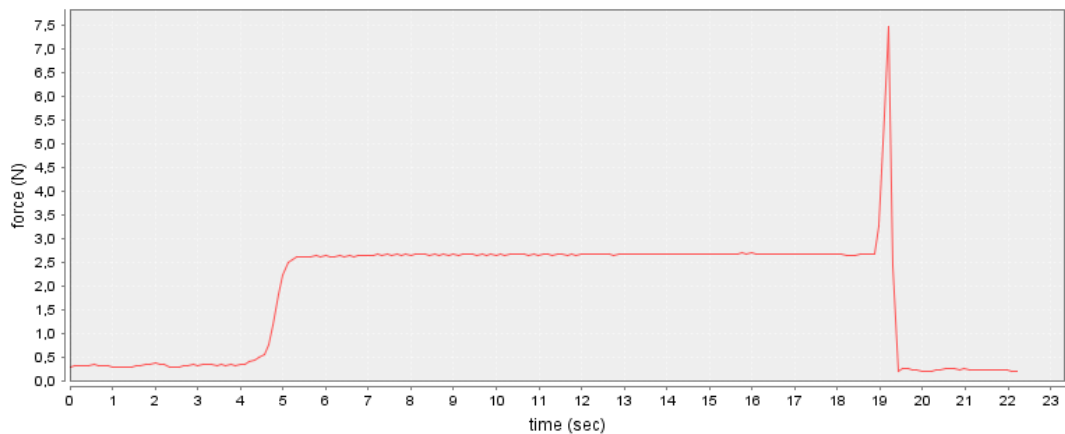
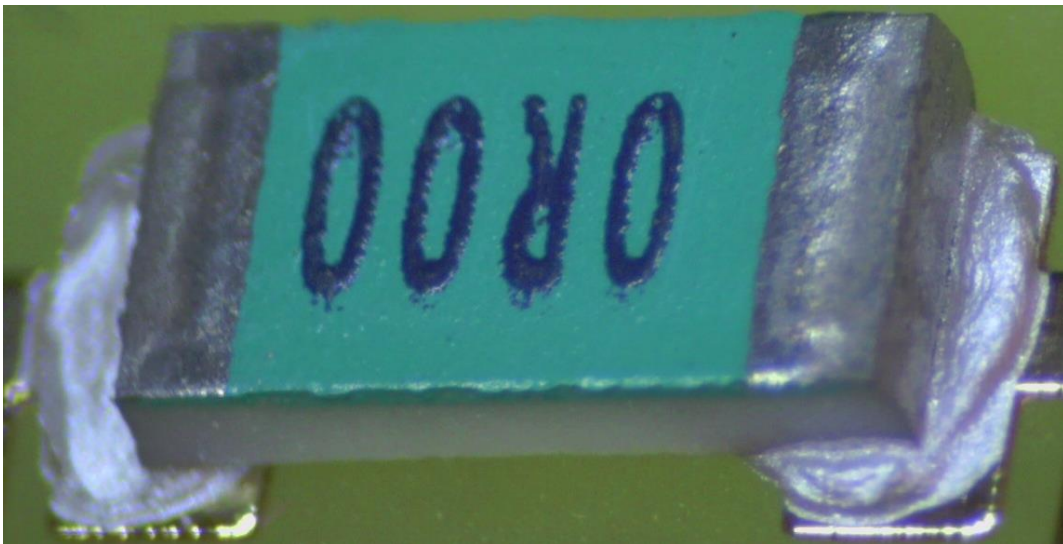
Měď – lepení – 37 (ml37)

Na tomto obrázku je vidět nedostatečné množství lepidla, které bylo nanášeno na plošky DPS. Rezistor z této DPS odpadl sám v podstatě bez vnějšího působení. Dále lze vidět, že lepidlo nepokrylo celé plošky DPS, a to ani v místě, kde byl osazen rezistor, což jen potvrzuje absenci smáčivosti u elektricky vodivých lepidel. Odpor spoje činí 54 mΩ.



Zlato – lepení – 15

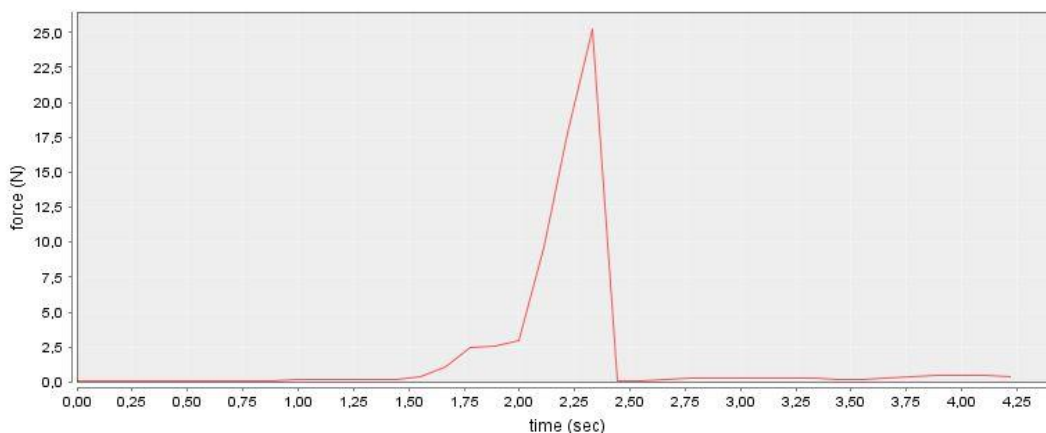
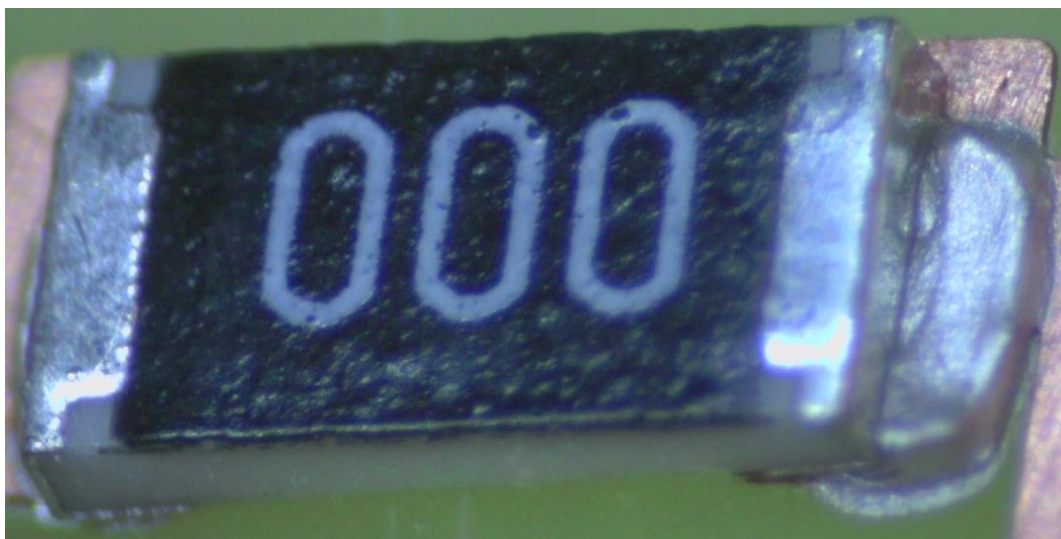
Na tomto obrázku lze vidět celkem přesně osazený rezistor určený pro lepení. I přesto výsledek při strhávání není nijak dobrý, vzorek vydržel sílu pouhých 7,5 N a odpor na jeden spoj vychází 57,5 mΩ. Pro ostatní povrchové úpravy DPS tomu je nápodobně, proto nebyly dále uváděny.



3.3.5 12LVT

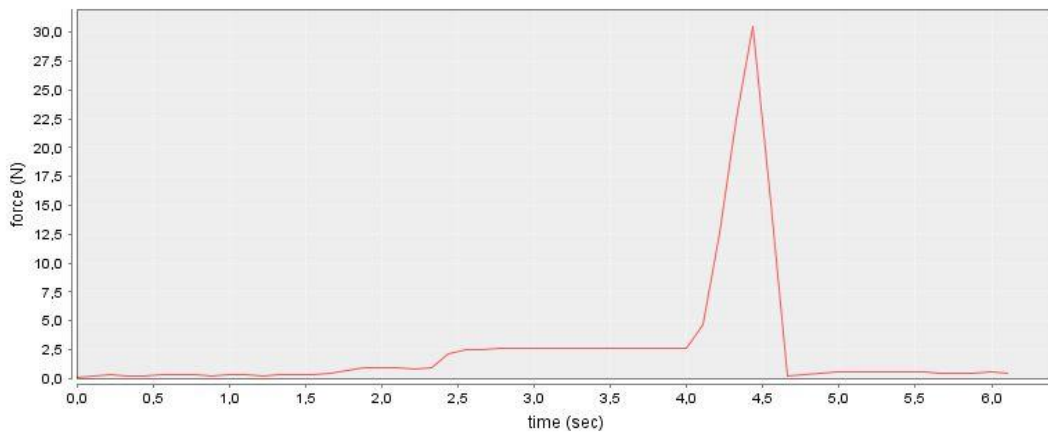
Měď – pájení – 11 (mp11)

Na tomto obrázku je vidět, že dvousložkové lepidlo 12LVT je na tom se smáčivostí obdobně, jako jednosložkové lepidlo 70MN. Tento vzorek vydržel sílu 25 N, což je přibližně průměr pro dvousložkové lepidlo. Dvousložkové lepidlo tedy vydrží přibližně dvakrát větší sílu než lepidlo jednosložkové, což je nejspíše způsobeno větším podílem pojivové složky než u lepidla jednosložkového. Odpor spoje činí 0,0465 Ω .



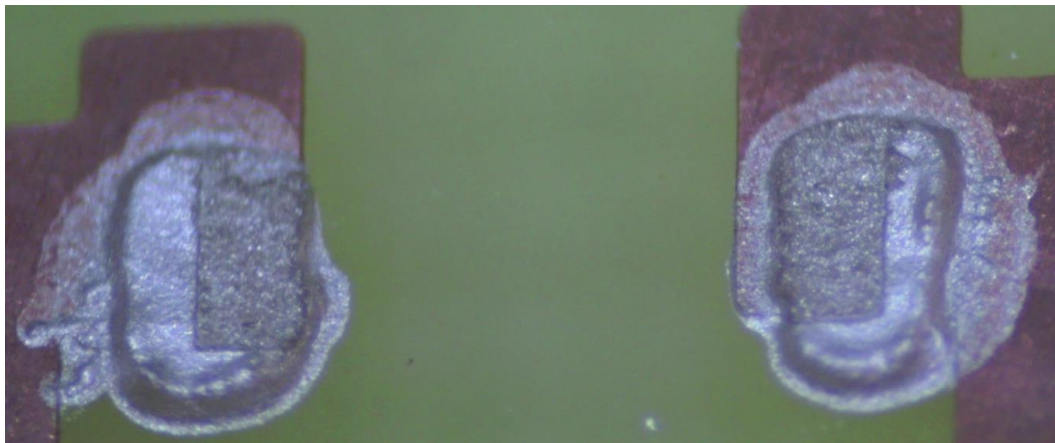
Cín – pájení – 12 (cp12)

Na tomto obrázku lze vidět podobný výsledek, jako u ostatních lepených vzorků. Zde bylo lepidlo navíc částečně nanášeno mimo plošku DPS. Vzhledem k tomu, že lepidla nemají žádnou smáčivost ani roztékavost, lepidlo se nestáhlo směrem ke kontaktu a zůstalo tak, jak bylo nanášeno. Z průběhu strhávání je vidět, že vzorek vydržel sílu 30 N, což bylo způsobeno tím, že lepidla drží i na nekovových plochách. Odpor spoje vyšel 28 Ω a takto vysoký odpor spoju dvousložkového lepidla lze vysvětlit jeho stářím. Pro ostatní povrchové úpravy je tomu podobně, proto nebyly dále uváděny.



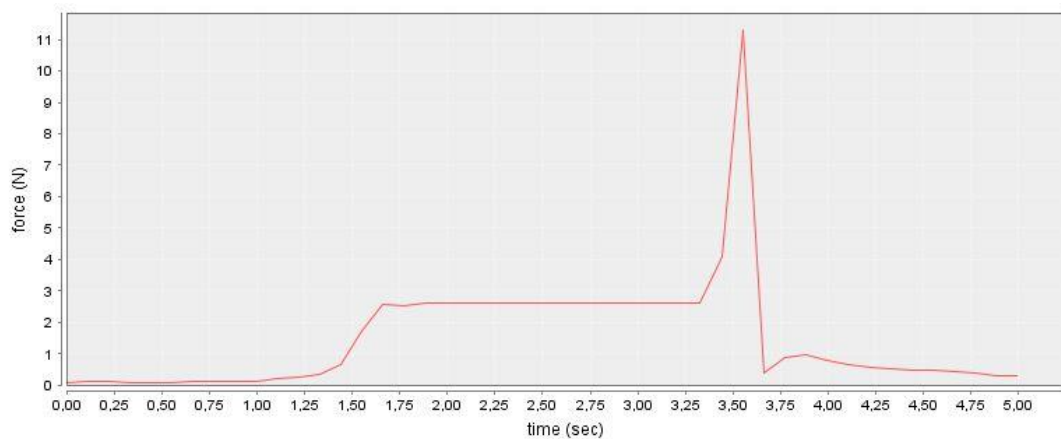
Oxidovaná měď – lepení – 17 (oml17)

Z tohoto vzorku odpadl rezistor bez použití vnější síly, a to i přesto, že byl přesně osazen a na ploškách DPS bylo dostatečné množství lepidla. Vzhledem k tomu, že dvousložkové lepidlo má velký počet vzorků, u kterých přilepený rezistor samovolně odpadl, dá se očekávat, že je to způsobeno stářím lepidla.



Zlato – lepení – 16 (zl16)

Na tomto obrázku lze pozorovat, že byl rezistor osazen přímo na lepidlo nanesené na pájecích ploškách. Ovšem při osazení nebyl rezistor dostatečně přitlačen, takže se lepidlo dotýká pouze spodní hrany kontaktů rezistoru. Díky tomu vzorek vydržel pouze sílu 11,5 N a má odpor 5,5 Ω . Ostatní povrchové úpravy vycházejí obdobně jako rezistory určené k pájení, proto nebyly dále uváděny.



3.3.6 Statistické hodnoty

Hodnoty v následujících dvou tabulkách a detailní fotografie z předchozích částí byly použity pro vyhodnocení experimentu.

Statistické hodnoty odporu spojů								
	PÚ - Měď		PÚ - Oxidovaná měď		PÚ - Cín		PÚ - Zlato	
	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení
Senju M31-GRN360-K1MK-V (Sn95,75Ag3,5Cu0,75) [mΩ]								
Minimum	0,55	17,5	1,35	21,5	1,05	21,5	1,2	23,5
Maximum	1,45	25	1,95	27,5	1,7	31,5	1,95	32,5
Průměr	0,98	22,18	1,64	23,64	1,35	25,04	1,50	26,64
AMTECH-NC-31 - nově koupená (90% vodivých částic Sn42 - Bi56) [mΩ]								
Minimum	1	20,5	1,85	23,5	1,1	22	1,2	22,5
Maximum	1,6	28	2,45	27,5	1,8	28,5	1,9	26,5
Průměr	1,33	23,57	2,16	25,57	1,47	25,21	1,55	24,50
Senju NC-31 - prošlá lhůta expirace (90% vodivých částic Sn42Bi56) [mΩ]								
Minimum	1	21	1,65	23,5	1,55	23,5	1,15	22
Maximum	2,3	30,5	2,6	32	2,5	29	2,5	29,5
Průměr	1,41	24,39	2,17	27,55	1,99	26,38	1,86	26,08
Elpox AX 70MN (70% stříbrných částic) [mΩ]								
Minimum	33,15	34,45	55,5	39,05	38,6	58	27,95	35,25
Maximum	96	97	135,5	90	146,5	124	148	69
Průměr	68,10	47,97	97,64	56,60	92,83	84,65	79,57	46,16
Elpox AX 12LVT - prošlá lhůta expirace (55% stříbrných částic) [Ω]								
Minimum	0,0235	1,85	0,12	1,25	17,5	7,5	1,2	4,9
Maximum	45,5	10	3,3	15,3	187,5	126,5	40	11
Průměr	10,26	4,46	0,95	7,44	54,17	44,79	11,22	7,49

Tabulka 12 Statistické hodnoty naměřených odporů

Statistické hodnoty strhovacích sil								
	PÚ - Měď		PÚ - Oxidovaná měď		PÚ - Cín		PÚ - Zlato	
	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení	R - pájení	R - lepení
Senju M31-GRN360-K1MK-V (Sn95,75Ag3,5Cu0,75) [N]								
Minimum	65	27,5	57	10	66	42	63	43
Maximum	115	58	101	37,5	109	57	108	70
Průměr	87,63	37,88	78,22	21,38	84,42	50,50	79,17	55,50
Minimum	72							
Maximum	110							
Průměr	86,33							
AMTECH-NC-31 - nově koupená (90% vodivých částic Sn42Bi56) [N]								
Minimum	85	7	62,5	4,5	57	5,7	80,5	3,3
Maximum	115	9	105	6,5	83	13,5	115	22,5
Průměr	101,00	8,00	87,13	5,50	69,38	9,60	97,88	11,60
Senju NC-31 - prošlá lhůta expirace (90% vodivých částic Sn42Bi56) [N]								
Minimum	76	7	60	4	72	8,4	55	7,3
Maximum	106	11	100	17,5	122	15	130	12
Průměr	94,50	9,53	83,83	9,58	94,00	11,40	91,00	9,43
Elpox AX 70MN (70% stříbrných částic) [N]								
Minimum	3,6	2,8	7,1	2,4	3,3	2,6	4,5	6,3
Maximum	13	7,5	10	7	14,8	10,5	11,1	12,2
Průměr	8,74	5,28	8,08	4,56	8,66	7,06	7,27	8,40
Minimum	2,6	3,5						
Maximum	11,2	4,7						
Průměr	6,26	3,93						
Elpox AX 12LVT - prošlá lhůta expirace (55% stříbrných částic) [N]								
Minimum	7,3	5,2	16,3	6,7	30	7,2	12,5	11,5
Maximum	40	11	33	9,4	30	13,6	43	15
Průměr	22,86	8,53	25,43	8,05	30,00	10,40	27,75	13,25

Tabulka 13 Statistické hodnoty naměřených sil

Zeleně zvýrazněné hodnoty = 10 mm/min

Žlutě zvýrazněné hodnoty pro pájení = 2 mm/min

Žlutě zvýrazněné hodnoty pro lepení = 4 mm / min

3.4 Vyhodnocení vlastností

Vliv rychlosti strhávání

Normovaná rychlost pro strhávání rezistorů je 1 – 2 mm za minutu. Co se pájených spojů týče, byl vliv rychlosti strhávání připájených rezistorů zkoumán pouze u pájky typu SAC na měděné povrchové úpravě DPS. Rozdíl mezi rychlostí 2 a 10 mm za minutu je nepatrný v řádu jednotek N. V rámci ušetření času byly tedy všechny ostatní pájené vzorky strhávány při rychlosti 10 mm za minutu.

U dvousložkového lepidla by rychlost strhávání mohla způsobit nepřesnosti, ale vzhledem k tomu, že čtvrtina rezistorů samovolně odpadla a že tyto vzorky měly mnohonásobně větší odpor spoje, byly strhány při rychlosti 10 mm za minutu.

Jednosložkové lepidlo vydrželo v průměru ze všech materiálů určených ke spojování nejmenší sílu, a proto byly tyto vzorky strhávány pomalejší rychlostí 4 mm za minutu.

Vyhodnocení materiálů pro spojování

Vyhodnocení materiálů pro spojování je vyhotoveno dle tabulek se statistickými hodnotami. Celkově nejlepší materiál pro zhotovení elektricky vodivých spojů se z hlediska elektrické vodivosti jeví pájecí pasta Sn95,75Ag3,5Cu0,75 od firmy Senju. Spoje zhotovené touto pastou mají nejmenší odpor, tj. průměrně 0,98 – 1,64 mΩ s rezistory, které jsou určeny k pájení. Co se mechanických vlastností týče, tyto spoje vydržely s rezistory určenými k pájení v průměru sílu 78 – 88 N, což není nejlepší výsledek, ale stále je velice obstojný.

Nejlepší materiál z hlediska síly je nově zakoupená pasta Sn42Bi56 od firmy AMTECH a zároveň starší pasta Sn42Bi56 od firmy Senju. Pasta od firmy AMTECH je lepší při použití rezistorů určených k pájení na všech testovaných povrchových úpravách kromě pocínovaného povrchu. To se dá vysvětlit tím, že obě pasty jsou od jiného výrobce a jediné co mají společného, je v podstatě poměr hmotnostního množství cínu ku bismutu. Pasty mají rozdílná tavidla a při daných podmínkách interagují rozličně s různými povrchovými úpravami. To znamená, že obě pasty budou mít rozdílný růst intermetalických vrstev. V případě pasty od AMTECH to může při námi zvolených podmínkách vyústit v nadměrný růst intermetalické vrstvy, což způsobí zkřehnutí spoje. Proto se dá říct, že SnBi pasta od firmy AMTECH není při našich podmínkách nejvhodnější pro používání na DPS s pocínováním. Pokud do vyhodnocení nezahrneme pocínovaný povrch, vydrží pasta od firmy AMTECH sílu v průměru 87 – 101 N, zatímco pasta od firmy Senju vydrží sílu v průměru 84 – 95 N. Co se pocínovaných DPS týče, pasta od AMTECH vydržela sílu v průměru 69 N, zatímco pasta od Senju vydržela sílu 94 N. Elektrický odpor přepočtený na jeden spoj při použití rezistorů pro pájení a DPS s oxidovaným měděným povrchem vychází pro obě pasty přibližně stejně 2,16 mΩ pro AMTECH a 2,17 mΩ pro Senju. Pro ostatní povrchové úpravy vychází jednoznačně menší odpor pro novou pastu od AMTECH, průměrně 1,33 – 1,55 mΩ. Zatímco starší pasta od Senju má v průměru 1,41 – 1,99 mΩ.

Co se lepidel týče, nemohou svými elektrickými a mechanickými vlastnostmi nijak konkurovat pájecím pastám. Elektrický odpor spojů zhotovených jednosložkovým lepidlem (70MN) se v průměru pohybuje okolo 50 – 100 mΩ. Oproti tomu mají spoje zhotovené dvousložkovým lepidlem (12LVT) odpor v přibližném rozmezí 1 – 50 Ω. Takto vysoký odpor v případě 12LVT je pro spoje nepřijatelný a dá se vysvětlit jedině prošlým datem expirace dvousložkového lepidla. Pro testování byly použity zbytky dvousložkového lepidla, které zbyly v laboratoři. Složky byly smíchány 1:1 dle návodu v datasheetu, ovšem místo očekávané lehce roztíratelné hmoty vyšla spíše hrudkovitá kaše. I přesto, že bylo dvousložkové lepidlo skladováno podle pokynů výrobce, je z hlediska elektricky vodivých spojů naprosto nepoužitelné. Co se mechanických vlastností týče, je paradoxně lepší dvousložkové lepidlo (12LVT), které vydrželo v průměru až 30 N, oproti tomu jednosložkové lepidlo (70MN) vydrželo maximálně 8,7 N. To by se dalo odůvodnit větším podílem pojivé složky ve dvousložkovém lepidle (12LVT).

Při porovnání použitých materiálů z hlediska použité maximální teploty pro přetavení / vytvrzení, nejlépe vychází dvousložkové lepidlo, které potřebovalo pro vytvrzení teplotu 100 °C. Jednosložkové lepidlo bylo vytvrzeno při teplotě 180 °C, což je o 5 °C více, než bylo zapotřebí u pájecí pasty SnBi. Díky tomuto faktu a velice rozdílným elektrickým a mechanickým vlastnostem se použití izotropního jednosložkového lepidla jeví jako naprosto zbytečné. Pasta SAC vyžadovala k přetavení celých 250 °C, což je doporučená hodnota uvedena v datasheetu.

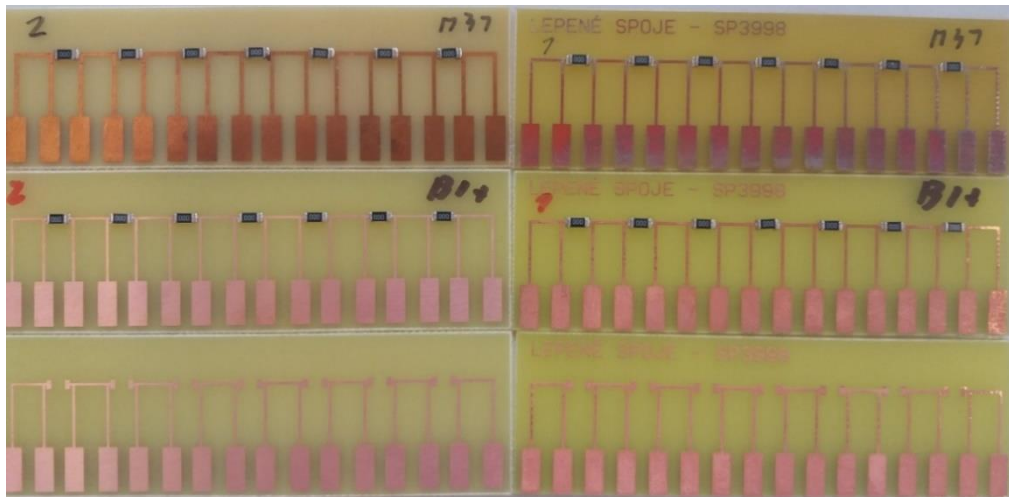
Vyhodnocení povrchových úprav DPS

Z hlediska elektrického odporu pájených spojů vychází jako nejlepší povrch měď, spoje na měděném povrchu mají nejmenší odpor. Dále následuje cín, zlato a na konec oxidovaná měď. Což odpovídá mému očekávání v kapitole 3.1.6, ve které je uvedeno, že pozlacený povrch má větší měrný odpor než cín, díky niklové vrstvě, která zdatelně zvyšuje celkový měrný odpor povrchové úpravy. Co se oxidované mědi týče, tak ta vychází jednoznačně nejhůře, což jen vyzdvihuje negativní důsledek oxidů na nově vznikající spoj a důležitost správného skladování DPS. Za použití pájecí pasty SAC, která má nejlepší elektrické vlastnosti, má průměrný odpor spoje na měděném povrchu při použití rezistoru pro pájení jen 0,98 mΩ. Spoj s cínovou povrchovou úpravou má v průměru 1,35 mΩ, s pozlacením 1,50 mΩ a s oxidovanou mědí 1,64 mΩ.

Co se týče mechanických vlastností použitých povrchových úprav, tak nejhůře vychází, pro všechny pájecí pasty, oxidovaná měď, která kvůli oxidům není vhodná pro správný růst intermetalické vrstvy. Ostatní povrchové úpravy vychází přibližně nastejno, vyjma cínového povrchu při použití pájecí pasty SnBi od firmy AMTECH.

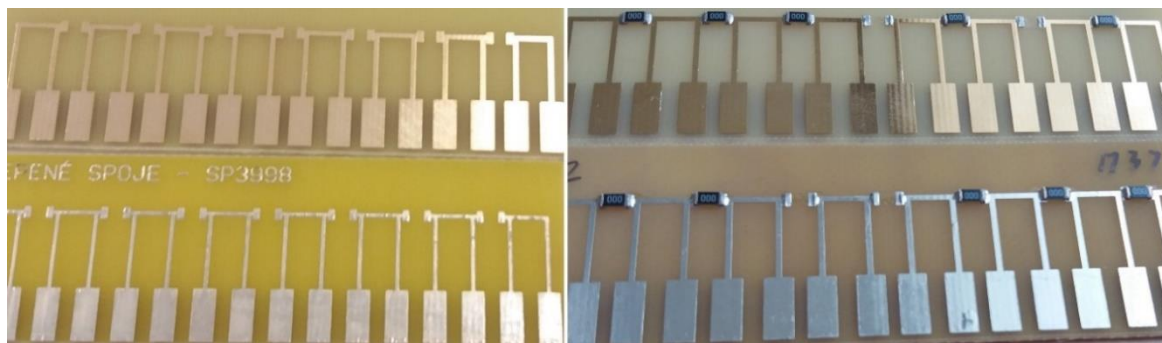
Vliv povrchových úprav DPS z hlediska mechanických vlastností při použití lepidel není nijak značný. Co se týče elektrických vlastností, pro jednosložkové lepidlo nejlépe vychází měď a zlato. U dvousložkového lepidla nemá smysl hodnotit závislost elektrického odporu spoje na použité povrchové úpravě DPS.

Samotný smysl používání povrchových úprav DPS je zřejmý. Na obrázku číslo 23 lze vidět vliv zvýšené teploty na pájecí plošky nechráněných DPS. Na levé straně jsou od shora dolů měděné DPS, které prošly tunelovou pecí při nastavené hodnotě přetavení na 250 a 175 °C, a DPS, která neprošla tunelovou pecí. Na pravé straně je to samé, pouze s degradovanými DPS. Na první pohled je vidět, že DPS s měděnou povrchovou úpravou, které prošly fází přetavení při 250 °C, už nejsou vhodné pro další osazování kvůli degradaci pájecích ploch, způsobené vyšší teplotou.



Obr. 23 Vliv teploty na měděné DPS

Na obrázku níže lze vidět DPS chráněné pozlacením (ENIG) a pocínováním (HASL). Na levé straně obrázku jsou nepoužité DPS. Na pravé straně obrázku jsou DPS, které prošly fází přetavení při 250 °C a nejsou na nich viditelné žádné známky oxidace a jakéhokoliv jiného poškození povrchu. Na takto ošetřené desky lze osadit další součástky a opakovat proces přetavení.



Obr. 24 Vliv teploty na pozlacené a pocínované DPS

Vyhodnocení nulových rezistorů

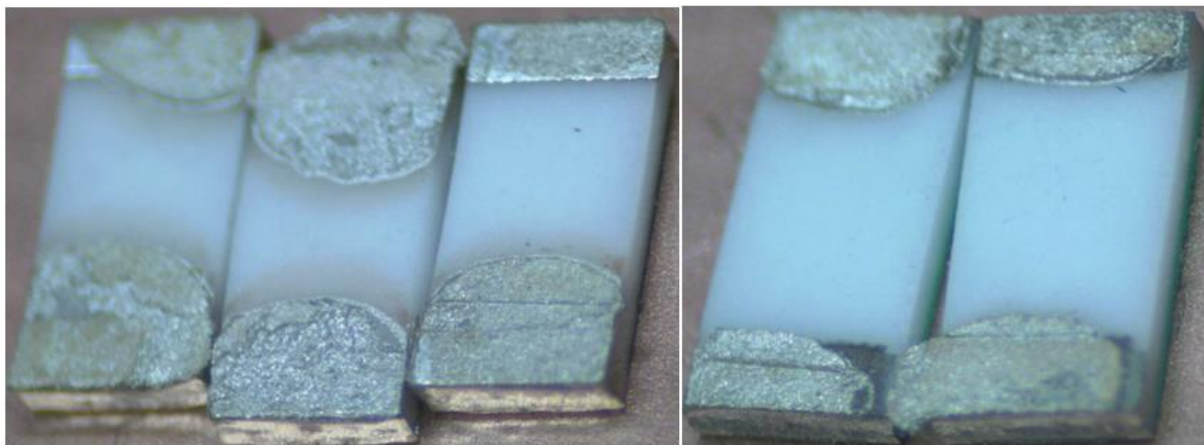
Dle tabulek se statistickými hodnotami je vidět, že při spojování hraje povrchová úprava kontaktů rezistorů (komponentů) velice významnou roli, a to jak z hlediska mechanických, tak i z hlediska elektrických vlastností. Povrch kontaktů rezistorů určených pro pájení je pocínovaný, což zlepšuje smáčivost, zatímco kontakty rezistorů určených pro lepení jsou

poniklovány. Další důležitá informace, kterou je nutno podotknout, je stáří rezistorů určených pro lepení, jejichž povrch je degradován, což má negativní vliv při spojování. Z hlediska elektromechanických vlastností, byly při pájení jednoznačně lepší rezistory určené k pájení. Kontakty rezistorů určených k lepení nebyly vůbec smáčeny, což je při pájení velice podstatná věc.

Pro jednosložkové lepidlo byly z hlediska elektrických vlastností lepší rezistory pro lepení. Co se mechanických vlastností týče ty vyšly pro oba typy rezistorů přibližně nastejno. Pro dvousložkové lepidlo byly elektrické vlastnosti v obou případech velice špatné a mechanické vlastnosti byly lepší s rezistory určenými pro pájení.

Ostatní

U naměřených hodnot odporu spojů a sřihové síly pro jednosložkové lepidlo si lze všimnout, že velmi často vydržel spoj s větším odporem větší sílu, než spoj s odporem menším. To nevyhovuje předpokladu, že by spoje s menším odporem měly být kvalitnější, a měly by v dané kategorii vydržet také větší sílu. Tento jev se dá vysvětlit tím, že lepidla nemají žádnou smáčivost, a pokud dojde při osazování rezistoru na DPS k rozetření lepidla po spodní hraně rezistoru, tento rezistor vydrží při strhávání větší sílu. To je způsobeno tím, že lepidlo, na které bude rezistor připevněn k DPS, bude značně větší než plocha při správném osazení. Při rozetření zároveň dojde k tomu, že lepidlo nebude obklopovat vodivé kontakty rezistoru, čímž vznikne spoj, který bude mít větší odpor. Tento fakt lze pozorovat na obrázku níže, na kterém můžeme vlevo vidět špatně osazené rezistory a vpravo relativně dobře osazené rezistory.



Obr. 25 Špatně a dobře osazené rezistory lepené lepidlem AX 70 MN

4 Závěr

Tato bakalářská práce charakterizuje vlastnosti elektricky vodivých spojů a materiály pájek a elektricky vodivých lepidel, které jsou pro vytvoření těchto spojů použity. Dále jsou popsány technologie, které jsou využívány pro pájení vlnou, přetavením a pro vodivé lepení. Část práce se zabývá smyslem a vlivem povrchových úprav na DPS a vlastností spojů, které byly zhotoveny na různých povrchových úpravách DPS. Cílem této práce je porovnání elektromechanických vlastností různých pájených a lepených spojů, tedy i porovnání kvality různých pájecích past a elektricky vodivých lepidel.

Komparací výše zmíněných vlastností se zabývá celá praktická část, ve které byly vytvořeny vzorky za použití tří různých pájecích past, dvou druhů lepidla, čtyř různých povrchových úprav DPS a použití nulových rezistorů určených pro pájení a lepení. Praktická část popisuje postup celého experimentu a na detailních fotografiích jsou rozebrány vlastnosti jednotlivých spojů. Na závěr praktické části je uvedeno vyhodnocení vlastností jednotlivých zkoumaných parametrů.

Je nutné podotknout, že je důležité používat materiály, které jsou skladovány dle pokynů výrobce a nemají prošlou lhůtu expirace. Z naměřených hodnot elektromechanických vlastností degradovaných odporů určených pro lepení a vlastností dvousložkového lepidla ELPOX AX 12LVT, které má prošlou lhůtu expirace, je jednoznačně vidět, že je nevhodné používání časem znehodnoceného materiálu.

Dále jsem se věnoval srovnání povrchových úprav DPS. Z hlediska experimentu nebyly zkoumány vlastnosti povrchových úprav, které jsou uvedeny v teoretické části, ale byly zde zkoumány vlastnosti vodivých spojů, které byly na těchto povrchových úpravách vytvořeny. Z pohledu experimentu lze konstatovat, že je nezbytné používat správně skladované DPS, které mají vyhovující povrchovou úpravou, neboť spoje na nechráněných oxidovaných DPS měly, oproti ostatním DPS výrazně horší elektromechanické vlastnosti.

Práce se také zabývá srovnáním rezistorů určených pro pájení a pro lepení. Podle vyhodnocení a detailních fotografií lze okamžitě označit rezistory určené pro lepení jako zcela nevyhovující v oblasti pájení. Povrch kontaktů těchto rezistorů je pro testované pájecí pasty naprosto nesmáčivý. V oblasti lepených spojů vychází rezistory určené k lepení o něco lépe než rezistory určené k pájení.

Srovnáním použitých materiálů z hlediska elektromechanických vlastností jsem zjistil, že spoje vytvořené pájecí pastou SAC od firmy Senju jsou vyhodnoceny jako optimální, a to z důvodu nejlepší elektrické vodivosti, velmi dobré smáčivosti, roztékavosti a obstojné mechanické odolnosti. Pasty SnBi od firmy Senju a AMTECH mají o něco lepší mechanické vlastnosti, ale zároveň mají horší vodivost a smáčivost. Z hlediska elektromechanických vlastností končí obě testovaná lepidla na posledním místě.

Závěrem lze konstatovat, že: pokud se budeme rozhodovat mezi pájecími pastami a elektricky vodivými lepidly z hlediska vodivosti a mechanických vlastností, je jednoznačně vhodnější zvolit pájecí pasty. Pájecí pasty mají výhodu smáčivosti, tyto spoje lze provést i při ručním

osazení DPS, jelikož se nepřesně osazené součástky při přetavení lehce srovnají s pájecími ploškami. Při lepení je nezbytné osazovat součástky přesně a neomylně, aby nedošlo k odhrnutí lepidla z kontaktovaných ploch. Pájené spoje mají lepší elektrické i mechanické vlastnosti, vyšší odolnost a nižší cenu. Hlavními výhodami elektricky vodivých lepidel je možnost anizotropní vodivosti a nízká vytvrzovací teplota. Vodivá lepidla lze tedy využít zejména v aplikacích, ve kterých je třeba anizotropní vodivosti. Avšak vzhledem k tomu, že existují typy pájecích past, které jsou určeny pro velmi hustá osazení, je možné konstatovat, že množství aplikací s nutností anizotropní vodivosti nebude tak rozsáhlé. Pokud je třeba vytvořit vodivý spoj za nižší teploty, než je teplota přetavení bizmutové pasty, jednoznačně je vhodnější použití vodivých lepidel. Vodivá lepidla je tedy vhodné použít pouze ve speciálních aplikacích, jako je například výroba LCD displejů.

Seznam obrázků

Obr. 1 Detail pájecího hrotu [4]	9
Obr. 2 Mikrostruktura pájeného spoje [4]	10
Obr. 3 Úrovně smáčivosti [3]	11
Obr. 4 Pájecí pasta M31-GRN360-K-V typ 4 a 5 [7]	13
Obr. 5 Částice el. vodivého lepidla – kuličky a šupinky [1]	14
Obr. 6 Ukázka anizotropního vodivého spoje [1]	15
Obr. 7 Povrchová úprava pájecí plošky na DPS [4].....	17
Obr. 8 Pájení vlnou [1]	20
Obr. 9 Ukázka nákresu třízónové tunelové pece Mistral 260 [20].....	22
Obr. 10 Pájení infračervenými zářiči [1].....	23
Obr. 11 Pájení v parách (kontinuální) [1].....	24
Obr. 12 Postup experimentu	26
Obr. 13 Použité pájecí pasty	28
Obr. 14 Použitá elektricky vodivá lepidla	28
Obr. 15 Použitá povrchové úpravy	29
Obr. 16 Použité rezistory	29
Obr. 17 Nanášecí šablona	30
Obr. 18 Vakuová pinzeta.....	31
Obr. 19 Tunelová pec Mistral	31
Obr. 20 Horkovzdušná pec	32
Obr. 21 Čtyřbodové měření odporu	32
Obr. 22 Mikrokamera	33
Obr. 23 Vliv teploty na měděné DPS	66
Obr. 24 Vliv teploty na pozlacené a pocínované DPS	66
Obr. 25 Špatně a dobře osazené rezistory lepené lepidlem AX 70 MN.....	67

Seznam tabulek

Tabulka 1 Porovnání metod spojování.....	25
Tabulka 2 Elektrický odpor spojů SAC	36
Tabulka 3 Elektrický odpor spojů SnBi – nová	37
Tabulka 4 Elektrický odpor spojů SnBi – stará.....	37
Tabulka 5 Elektrický odpor spojů AX 70MN (jednosložkové lepidlo).....	38
Tabulka 6 Elektrický odpor spojů AX 12LVT (dvousložkové lepidlo).....	38
Tabulka 7 Kritická síla pro rezistory připájené pomocí SAC	39
Tabulka 8 Kritická síla pro rezistory připájené pomocí SnBi – nová	39
Tabulka 9 Kritická síla pro rezistory připájené pomocí SnBi – stará	39
Tabulka 10 Kritická síla pro rezistory přilepené pomocí AX 70MN.....	40
Tabulka 11 Kritická síla pro rezistory přilepené pomocí AX 12LVT	40
Tabulka 12 Statistické hodnoty naměřených odporů	62
Tabulka 13 Statistické hodnoty naměřených sil.....	63

Seznam zkratek

DPS – deska plošných spojů
PCB – printed circuit boards
LCD – liquid crystal display
RoHS – The Restriction of Hazardous Substances
Sn – cín
Ag – stříbro
Cu – měď
Pb – olovo
Bi – bismut
Au – zlato
Ni – nikl
Pd – palladium
SAC – SnAgCu
SMT – surface mount technology
SMD – Surface Mount Device
OSP – Organic Surface Protectives
HASL – Hot Air Solder Leveling
IS – Immersion Silver
ENIG – Electroless Nickel Immersion Gold
PÚ – povrchová úprava

Citovaná literatura

- [1] P. Mach, V. Skočil a J. Urbánek, Montáž v elektronice, ČVUT Praha, 2001.
- [2] P. Hrabák, Vznik a růst intermetalických sloučenin u bezolovnatých pájených spojů, Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2014.
- [3] D. Filáková, Technologie pájení přetavením, Bakalářská práce, UTB ve Zlíně, 2010.
- [4] K. Martin, Vliv povrchové úpravy na vznik voidů v pájených spojích, Bakalářská práce, ČVUT v Praze, 2016.
- [5] M. Kouřil, Technologické aspekty bezolovnatého pájení v mikroelektronice, Bakalářská práce UTB ve Zlíně, 2007.
- [6] J. Bím, Kvalita pájených a lepených spojů v elektronice, Bakalářská práce, ČVUT v Praze, 2018.
- [7] Senju_Metal_Industry_Co._Ltd., ECO SOLDER M31-GRN360-K-V (datasheet), Senju Manufacturing (Europe) Ltd., 2004.
- [8] AMTECH, NC-31, No-Clean Solder Paste (datasheet), 2015.
- [9] P. Žalská, Stárnutí spojů vytvořených elektricky vodivými lepidly, Diplomová práce, ČVUT v Praze, 2017.
- [10] amepox, ECO SOLDER AX 70MN (datasheet).
- [11] amepox, ELPOX AX 12LVT (datasheet).
- [12] amepox, ELPOX AX 15S (datasheet).
- [13] ASM_International, ISTFA 2017 Best Video Winner - Electromigration Station, YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=Sre7pkEKP1I>, 21. 11. 2017.
- [14] Tonya_Coffey, Self Assembled Monolayer Films, YouTube, https://www.youtube.com/watch?v=xXL_OgF41sI&t=473s, 16. 6. 2017.
- [15] P. Čičmanec, Všeobecná fyzika 2, Elektrina a magnetizmus, Bratislava: Alfa a SNTL, 1980.
- [16] J. Jičínský, Environmentální vlivy a pájitelnost, Bakalářská práce, VUT v Brně, 2012.
- [17] K. Martin, Studie vlivu povrchových úprav pájecích plošek na vznik dutin v pájených

spojích, Diplomová práce, ČVUT v Praze, 2018.

[18] Z-AXIS_Inc., How to choose a surface finish for a PCB, YouTube,
https://www.youtube.com/watch?v=wqTef_xfbeI, 18. 6. 2014.

[19] M. Procházka, Optimalizace procesu strojního pájení vlnou, Bakalářská práce VUT v
Braně, 2009.

[20] SPIDÉ, Mistral 260 - Forced Air Convection Oven - User manual, 2016.