



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie**

Vliv povrchové úpravy na vznik voidů v pájených spojích

Influence of surface finishes on voids formation inside the solder joints

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Martin Kozák

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra elektrotechnologie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Martin Kozák**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Vliv povrchové úpravy na vznik voidů v pájených spojích**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s technologií pájení přetavením, chybami vyskytujícími se při této technologii a s příčinami vzniku voidů v pájených spojích.
2. Připravte si testovací vzorky s různou povrchovou úpravou pájecích plošek a s ohledem na následnou analýzu výskytu voidů.
3. Proveďte diagnostiku testovacích vzorků a výsledky vyhodnoťte.

Seznam odborné literatury:

- [1] WASSINK R. J. K.: Soldering in Electronics, second edition, Electrochemical Publication 1989
- [2] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice 2005
- [3] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [4] HWANG, J.S.: Environment-friendly Electronics: Lead-free Technology. Electrochemical Publications Ltd. Port Erin, Isle of Man 2001.
- [5] DUŠEK K.: Image analysis of the soldered joints, Sborník: APLIKOVANÁ ELEKTRONIKA 2004, ZČU Plzeň, ISBN 80-7043-274-8.

Vedoucí: Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

Ing. Karel Dušek, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 8. 3. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma Vliv povrchové úpravy na vznik voidů v pájených spojích vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval mému vedoucímu Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za ochotu, trpělivost a odborné vedení při přípravě a vyhodnocování vzorků. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za psychickou podporu při psaní této práce.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá tematikou vzniku voidů v pájených spojích. Teoretická část práce se zabývá technologií pájení, metodami pájení, tavidly, povrchovými úpravami a chybami vznikajícími při pájení, kde jsou detailně popsány voidy. Praktická část se zabývá vlivem povrchových úprav na výskyt voidů v pájených spojích při použití dvou různých bezolovnatých pájecích past. Po analýze dat jsme zjistili, že při použití pájecí pasty Sn99,3/ Cu0,7 je u většiny kombinací povrchových úprav více než jeden a půl krát vyšší výskyt voidů, než u Sn42/Bi58 pájecí pasty. Povrchové úpravy HAL a ENIG mají nižší četnost voidů, proto jsou vhodnější pro využití ve srovnání s povrchovou úpravou OSP.

Klíčová slova

Pájění, Povrchová úprava, Pájený spoj, Chyby při pájení, Voidy

Abstract

This bachelor thesis includes information about creating of voids inside the solder joints. The theoretical part deals with technology of soldering, methods of soldering, fluxes, surface finishes and defects involved in soldering, where the voids are mainly described. The practical part of the thesis contains information about influence of the surface finishes on the occurrence of the voids in the solder joints using two different lead – free solder pastes. Analyzed datas show, that using of Sn99,3/Cu0,7 solder paste has one and half higher incidence of voids than Sn42/Bi58 solder paste in the most of surface finishes combination. Surface finishes HAL and ENIG have less voids and therefore they are more suitable for use in comparison with the OSP surface finish.

Key words

Soldering, Surface finish, Soldered joint, Errors during soldering, Voids

Obsah

Úvod.....	9
I. Teoretická část.....	10
1. Pájení.....	10
1.1. Typy pájek.....	10
1.2. Formy pájek.....	10
1.3. Pájecí slitiny.....	11
1.4. Pájitelnost.....	11
2. Typy součástí na DPS.....	12
3. Základní metody pájení.....	13
3.1. Ruční pájení.....	13
3.2. Pájení vlnou.....	15
3.3. Pájení přetavením.....	17
3.4. Pájení ponorem.....	20
4. Povrchové úpravy DPS.....	21
4.1. Ag.....	22
4.2. Sn.....	22
4.3. ENIG.....	22
4.4. OSP.....	22
4.5. HASL (HAL).....	23
4.6. Srovnání jednotlivých typů povrchových úprav DPS.....	23
5. Tavidla.....	25
5.1. Dělení tavidel.....	25
6. Chyby při pájení.....	30
6.1. Whiskery.....	30
6.2. Můstky.....	30
6.3. Tombstone efekt.....	31
6.4. Kapky pájky.....	31
6.5. Rozstřík tavidla.....	31

6.6. Voidy	31
II. Praktická část.....	35
1. Návrh testovacích DPS.....	35
2. Příprava vzorků	35
3. Zapájení DPS.....	36
3.1. Nanesení pájecí pasty a osazení	36
3.2. Přetavení.....	36
4. Analýza pájeného spoje.....	39
4.1. Rentgenová analýza.....	39
4.2. Obrazová analýza	40
5. Vyhodnocení	41
5.1. Pájecí pasta typu SnCu	41
5.2. Pájecí pasta SnBi	44
5.3. Porovnání výsledků pájecích past	47
5.4. Porovnání výsledků povrchových úprav	48
Závěr.....	49
Seznam použité literatury	50
Seznam obrázků	52
Seznam tabulek	53
Seznam grafů.....	53
Seznam použitých zkratk.....	54
Přílohy	55

Úvod

Pájení je jedním z nejpoužívanějších technologických procesů spojování kovů, proto je velmi důležitá spolehlivost pájených spojů. Pájené spoje musí mít dobré elektrické i mechanické vlastnosti, které ovšem negativně ovlivňují dutiny v pájeném spoji (dále jen voidy).

Teoretická část práce je zaměřena obecně na problematiku měkkého pájení. Je zde popsána základní technologie a teorie pájení. Dále pak používání vhodných tavidel pro různé aplikace, nejčastěji používané metody pájení a povrchové úpravy. V závěru této části jsou popsány chyby vznikající při pájení s vysokým důrazem na voidy, které jsou zde vzhledem z praktické části rozebírány nejvíce.

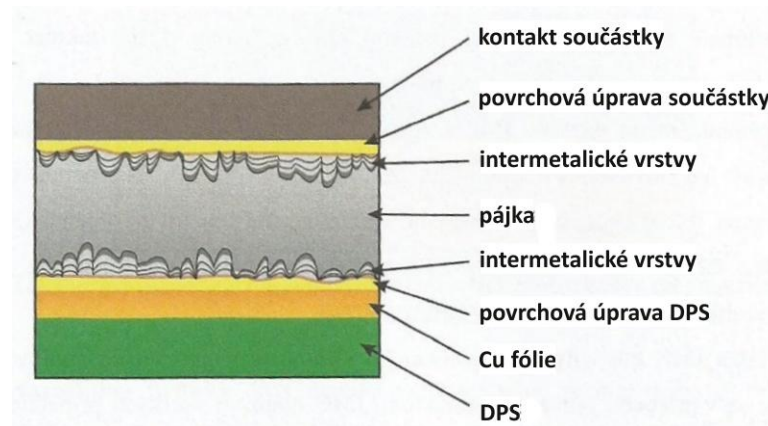
Praktická část této práce se zabývá vznikem voidů v pájených spojih s vlivem na použité povrchové úpravy. Tento vliv je zkoumán při použití dvou bezolovnatých pájecích past s různými vlastnostmi.

I. Teoretická část

1. Pájení

Pájení patří k jednomu z nejstarších způsobů spojování kovů. Definujeme ho jako metalurgické spojování dvou kovových částí roztavenou pájkou. Atomy na povrchu pájených materiálů se přiblíží atomům roztavené pájky do potřebné vzdálenosti pro vytvoření podmínek adhezních a kohezních sil. Kovové části nejsou při pájení natavené, pouze smáčené pájkou [1], [3].

Technologie pájení prošla několika vývojovými stupni. Prvním stupněm bylo pájení sestav pájedly. Další vývoj technologií vedl ke spojování na deskách plošných spojů, díky tomu lze využít několik typů montáže na DPS, například pájení vlnou či vlečením a výroba se z velké části zautomatizovala (pájení na pásech, v pecích) [3].



Obr. 1 – Zjednodušené rozložení vrstev v mikrostruktuře pájeného spoje [1].

1.1. Typy pájek

Pájky dělíme na dva základní typy – měkké a tvrdé. Hlavním kritériem rozdělení je teplota roztavení. Měkké mají teplotu tavení pod 450°C a tvrdé nad 450°C. V elektrotechnice používáme převážně pájení měkké [1], [4]. Ve své práci se proto budu zabývat pouze pájením měkkým.

1.2. Formy pájek

Pájecí slitiny se připravují v různých formách. Pro ruční pájení se používají trubičkové pájky s průměrem dle potřeby a jádrem obsahujícím tavidlo. Pro pájení přetavením používáme pájecí pasty, které se skládají z kuliček o průměru několika desítek mikrometrů, tavidla a dalších příměsí. Další formou jsou tyčové pájky, které se využívají pro strojové pájení a dále fólie pájky s danou tloušťkou pro speciální aplikace [7].

1.3. Pájecí slitiny

Měkké pájky jsou tvořeny převážně těžkými kovy, které mají nízkou teplotu tání, hlavně tedy cínem, olovem a zinkem. Základní rozdělení pájecích slitin je na olovnaté a bezolovnaté [5].

1.3.1. Olovnaté

Olovnaté pájecí slitiny se v Evropě od roku 2006 začaly omezovat pro jejich negativní vliv na životní prostředí. I tak jsou stále často používané, díky příznivé teplotě tání a dobrým smáčecím charakteristikám, ve zdravotnictví či armádě [5].

1.3.2. Bezolovnaté

V těchto pájecích slitinách bylo olovo nahrazeno jinými prvky, například mědí. Největší rozdíl oproti olovnatým je v teplotě tání, což je dáno vyšším procentuálním obsahem cínu [5].

1.4. Pájitelnost

Pájitelnost je schopnost pájeného povrchu být smáčen pájkou při pájení. Ta se může lišit na stejném povrchu pájeného spoje při různých použitých procesech. Nejčastějšími problémy s pájitelností nastávají při pájení přetavením nebo pájením vlnou [3].

Při pájení mohou nastat tyto situace smáčení:

1.4.1. Smáčení

Pájka smáčí povrch a vytvoří na rozhraní metalurgické vazby. Podmínkou je, že povrchová energie čistého pájeného povrchu je vyšší než u roztavené pájky. Při postupu smáčení se tedy zvětšuje tenká mezikovová vrstva, a ta vytvoří základ pro kvalitní a spolehlivý spoj [3].

1.4.2. Nesmáčení

Metalurgická vazba, která se má při pájení vytvořit na rozhraní mezi pájkou a pájeným materiálem se nevytvoří. Tento problém může způsobovat tavidlo, které není dostatečně aktivní nebo je oxidační vrstva příliš tlustá a tavidlo jí tedy nemohlo odstranit [3].

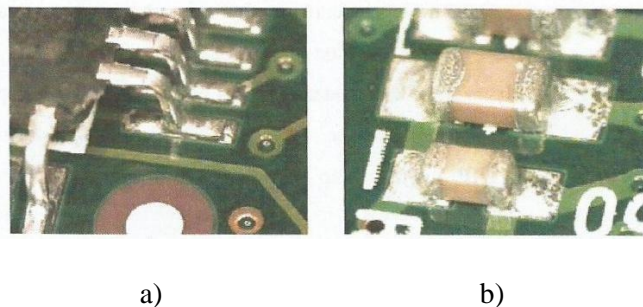
1.4.3. Odsmačení

Při použití cín-olověné pájky mohou intermetalické sloučeniny, které se vyskytují na rozhraní vytahovat cín z pájky, která ustoupí z již smáčených oblastí. Odsmačení také pozorujeme na spodní části pájeného spoje. Pájená vrstva kovu se zde úplně rozpustí do pájky. Nejčastěji tento problém vzniká při pájení drahých kovů [3].

2. Typy součástek na DPS

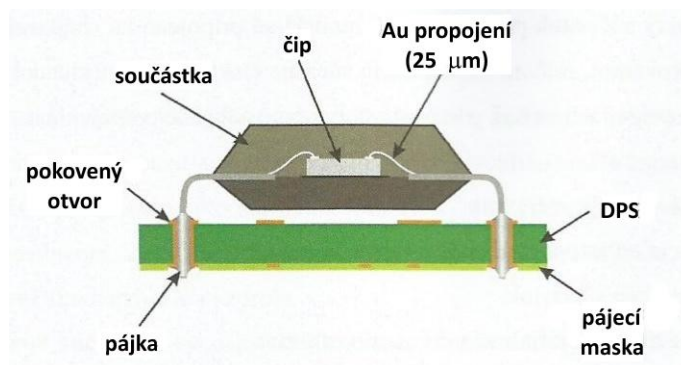
Rozlišujeme dva základní typy součástek dle typu montáže na plošné spoje, a to povrchová (dále jen SMD) a do předvrtaných otvorů (dále jen THD). Tyto součástky je možné kombinovat dle potřeby [2].

Součástky SMD se osazují přímo na povrch DPS. Mohou být buďto bezvývodové nebo vývodové (vývod tvaru L,...). Vývodové mají oproti součástkám s drátovými vývody mnohem menší velikost, vývody jsou kratší a jemnější. Bezvývodové mají kontakty přímo na pouzdře. Oproti THD je tedy jejich velkou výhodou menší hmotnost, cena a jejich osazení trvá kratší čas. K osazování se používají osazovací stroje, které jsou velmi přesné. Zapájení probíhá vlnou, nebo přetavením pájecí pasty [2].



Obr. 2 – Součástky povrchové montáže a) vývodové b) bezvývodové [2].

THD součástky osazujeme do předvrtaných děr pomocí jejich vývodů. Vývody musí být dostatečně dlouhé a tvarovatelné pro lepší osazení. Jejich rozteče jsou různé, dle typu pouzdra [2].



Obr. 3 – Montáž součástky do předvrtaných otvorů [2].

3. Základní metody pájení

V pájení rozlišujeme několik základních metod pájení, kterými jsou ruční pájení, pájení přetavením, pájení vlnou a pájení ponorem. Ty se od sebe liší způsobem, jakým nanášíme pájku, pájecím materiálem a přenosem tepla. Některé z nich umožňují hromadnou výrobu a jiné se hodí pouze pro výrobu kusovou. Použití také záleží na typu montáže součástek na DPS [2].

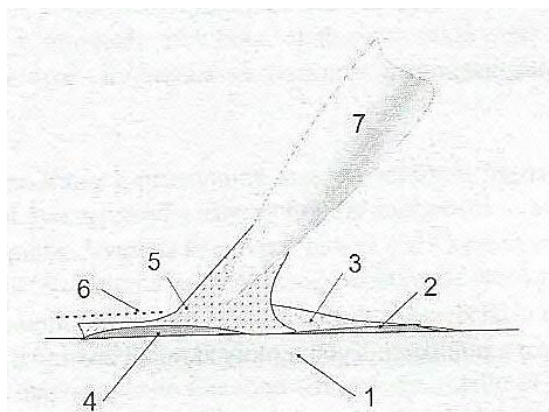
3.1. Ruční pájení

Pájení ruční páječkou se v dnešní době kvůli nízké efektivitě používá pouze při prototypové výrobě, při montáži speciálních součástek, které nejdou osadit strojově a při opravách poškozených jednotlivých dílů. Pájka zde může být ve formě drátu a do spoje je dodávána přes nahřátý hrot páječky, nebo lze použít pájecí pasty. Dříve hojně používané klasické transformátorové páječky, jsou nahrazeny elektrickými páječkami, které se skládají ze tří částí – hrot, kontrola teploty a tepelné tělísko. Dále také nesmí být na hrotu žádné rušivé napětí, které by mohlo ničit elektrostaticky citlivé součástky [3].

Při ručním pájení využíváme tyto typy:

- **Pájení kovovým hrotem**

Pájecí hrot ruční páječky má obvykle měděné jádro, které je pokovené železem pro větší životnost a následně potaženo chromem, jako ochrana před korozi. Časem se však tato ochranná vrstva obrousí a selže vzhledem k teplotě, aplikaci, typu používaných pájek a hlavně nedokonalé obsluze. Vady, které nám vznikají, jsou namáhání nebo popraskání, opotřebení či otěr, koroze a odsmáčení. Vyšší teplota má vliv na kratší životnost z několika důvodů. Tavidla jsou více chemicky aktivní, kovy jsou kujnější a zvyšuje se pravděpodobnost oxidace. Trhliny v pokovení jsou způsobené velkým zatížením hrotu při pájení. Tomu lze předejít, pokud použijeme hrot s co největší kontaktní plochou. Koroze na hrotech jsou většinou způsobené tavidly, kvůli jejich agresivitě. Pro jejich odstraňování z hrotu používáme houbičky určené k čištění. Při odsmáčení hrotu je problém převážně v zoxidovaném pokovení hrotu, což je vedlejším produktem samotného pájení, kde vysoká teplota proces urychluje. Opotřebení hrotu je jev, který lze předpokládat při častém používání a nelze se mu vyhnout. Časem je možné, že se případné pokovení spotřebuje úplně [3].



Obr. 4 – Detail pájecího hrotu při pájení [3].

1. deska plošných spojů, 2. vrstva oxidů, 3. tavidlo rozpouštějící vrstvu oxidů, 4. vznikající mezní vrstva, 5. pájka, 6. zbytky tavidla, 7. pájecí hrot.

Po přechodu na bezolovnaté slitiny bylo nutné přistoupit k vývoji modernějších pájecích stanic. Důležitými vlastnostmi při této metodě pájení jsou: vysoká obnova tepla a teplená kapacita, nekolísání teploty při pájení, dobrá smáčivost, jednoduchá výměna hrotu, měření teploty na hrotu, lehkost pájedla, při prodlevě v pájení nastavení vypnutí. Problém ovšem je, že některé požadavky nejsou výrobci schopni splnit zároveň.

- **Pájení proudem horkého vzduchu**

Mezi ruční pájení také patří pájení ostřeným proudem horkého vzduchu. Jedná se o stejný princip jako při pájení přetavením. Používá se nyní převážně na opravy integrovaných obvodů. Jeho princip je zcela jednoduchý, ostřeným horkým vzduchem zahříváme pájené místo s pájecí pastou, dokud nedojde k přetavení.

- **Vysokofrekvenční pájení**

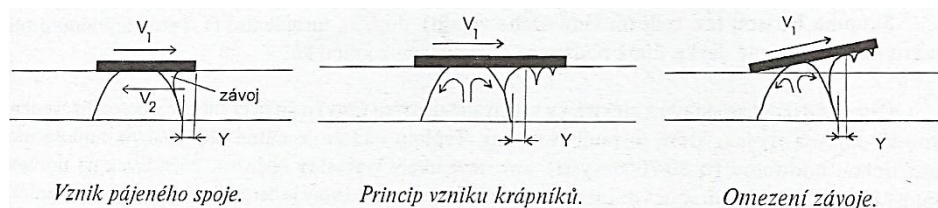
Vysokofrekvenční pájení využívá princip změny magnetických vlastností u materiálů s rostoucí teplotou. Feromagnetickou látku tedy vložíme do střídavého magnetického pole, kde vznikají hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy. Pro nás jsou důležité převážně hysterezní ztráty, které se projevují zahříváním látky až do tzv. Curieova bodu, kde se látka změní na paramagnetickou, a tyto ztráty klesnou. Následně látka začne chladnout a tento děj se opakuje pořád dokola. Látka má tedy výslednou teplotu na Curieově bodě, který je pro různé materiály jiný [3].

Pro vytvoření kvalitního pájeného spoje musíme dodržet několik podmínek. Teplota pájeného spoje musí být menší než 300 °C, teplota hrotu by měla být maximálně 320 °C – 350 °C, páječka by měla mít spolehlivou regulaci teploty a doba pájení musí být 1 s – 4 s [2].

3.2. Pájení vlnou

Tato metoda pájení je nejstarší metodou hromadného strojního pájení, které podstatně zvýšilo kvalitu pájených spojů. Lze ji využít k pájení součástek SMD, THD i při jejich kombinaci, a to díky tlaku a kapilárním silám. Jedná se o nejpoužívanější a nejrozšířenější metodu pájení [3].

Pájení vlnou má ovšem také několik nevýhod. Pokud používáme vodorovný dopravník, pak při dané rychlosti dopravníku V_1 a rychlosti vlny V_2 pájka nestěče zpět do vlny a dojde k vytvoření závoje Y , díky kterému se vytváří můstky a krápníky. Musí zde tedy platit, že $V_2 > V_1$. V_2 je možné zvýšit například zvýšením teploty pájky. Závoj Y lze omezit tím, že se dopravník nakloní o $4^\circ - 8^\circ$, což podpoří stékání, viz obr. 5.



Obr. 5 – Vznik pájeného spoje, krápníků a omezení závoje [3].

Krápníky můžeme omezit použitím duté vlny, která se pohybuje proti směru pájené desky. Dalším způsobem je použití horkého nože, který odstraní přebytečnou pájku v okamžiku výstupu desky z vlny.

Po příchodu SMD součástek už obyčejná vlna nestačí k vyhověním našich potřeb. Je tedy nutné využívat reflexních vln. Ty se vyznačují pohybem ve směru proti pohybu pájené desky.

U této metody je také důležitý teplotní profil. Ten se liší dle požitého typu zařízení, kde dvojitá vlna namáhá spoj dvakrát. Dalšími kritérii pro volbu teplotního profilu je použité tavidlo a charakter DPS [3].

3.2.1. Postup procesu pájení vlnou

1) Aktivace pájených prvků

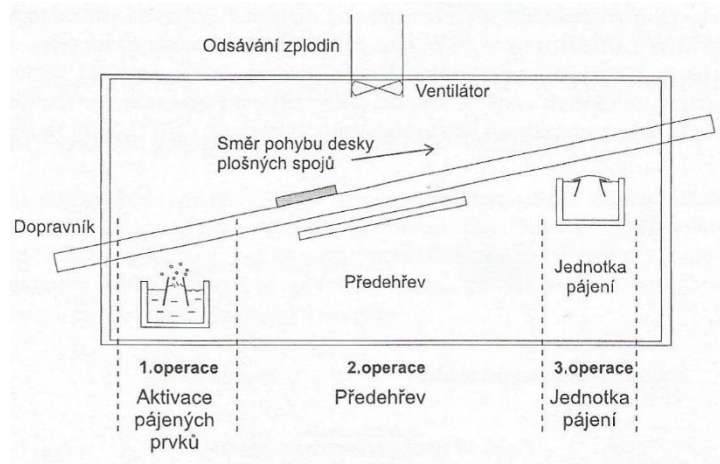
Všechny prvky určené k pájení si před započítím samotného procesu pájení musíme připravit. Toho dosáhneme pomocí tavidla, které zde můžeme nanášet několika způsoby. Jedním z nejmodernějších zařízení je ultrazvukový dávkovač, který dokáže vytvářet souvislé a tenké vrstvy. Další možnosti nanesení tavidla jsou pomocí pěnového dávkovače, pomocí sprejového dávkovače nebo dávkovače s rotujícím kartáčem [2], [3].

2) Předehřev

Aby nedošlo k teplotnímu šoku, musíme DPS a součástky předehřát na teplotu okolo 100 °C. Tento jev by mohl nastat při kontaktu nepřehřáté desky s roztavenou pájkou. Tento krok je také důležitý pro aktivaci tavidla.

3) Vlastní pájení

Dojde k zapájení součástky na DPS pomocí roztavené pájky.



Obr. 6 – Jednotlivé operace strojního pájení [3].

3.2.2. Jednoduchá vlna

Jedná se o nejjednodušší z pájecích vln. Je s ní možné pájet jak THD, tak SMD součástky. SMD součástky ovšem musí být větších rozměrů. U vývodových součástek zde může nastat problém praporků, kde se pájka nabalí na vývody. Tomu lze předejít správným nastavením vlny. U této vlny lze pracovat jak s malým, tak velkým objemem roztavené pájky. U malých objemů může ovšem nastat problém s udržení stálé teploty [3].

3.2.3. Dvojitá vlna

Jak již název napovídá, dvojitá vlna se skládá ze dvou částí. První vlna se nazývá turbulentní a má za úkol smočit pájkou DPS a součástky. Tato vlna má směr ve směru pohybu DPS a musí mít přesně definovanou výšku. Druhá vlna, laminární, má za úkol zajistit potřebnou kvalitu, což se týká převážně zkratů, které vznikají při první vlně. U druhé vlny je důležitý její tvar, jež musí povolit poměrný tok, protitok a zastavení vzhledem k dopravníku. Tato dvojitá vlna je díky vlastnostem mnohem vhodnější pro pájení SMD součástek než vlna jednoduchá [3].

3.2.4. Dutá vlna

Tato vlna se pohybuje proti směru pohybu DPS. Největší výhodou duté vlny je, že stahuje vývody součástek směrem dolů. Ty se tedy nemusí ohýbat, ani jiným způsobem fixovat. Má taky mnohem lepší přenos tepla, protože kontakt s pájecí deskou trvá pouze 1 s – 2 s. To je pro nás velmi důležité hlavně při použití pájek s vyšší teplotou roztavení [3].

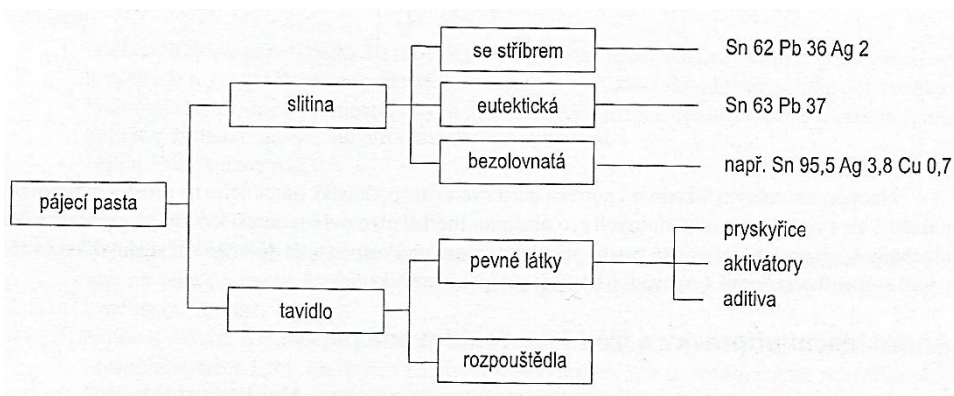
3.3. Pájení přetavením

U pájení přetavením je podstata opačná než u předchozích dvou typů pájení, kde jsme rozehřátou pájku přiváděli na spoj. U této metody nejprve umístíme na DPS pájecí pastu, poté osadíme součástkami a následně přetavíme. Kvalitu spoje zde velmi ovlivňuje námi zvolená pájecí pasta.

Stejně jako u metody pájení vlnou hraje velkou roli definovaný teplotní profil. Ten musí být odzkoušen a nemůže se nastavit pouze podle doporučení výrobce pájecí pasty. Odchytky zde mohou nastat vlivem rozdílných parametrů pájených DPS (velikost povrchu, různé materiály povrchu,...). Pro každý typ pájené desky plošných spojů se tedy doporučuje nastavit vlastní odzkoušený teplotní profil [3].

3.3.1. Pájecí pasty

Pájecí pasty obsahují kovové složky a tavidlo. Kovovými složkami jsou zde pájecí zrna, která tvoří přibližně 90 % objemu pasty a tavidlo zde tvoří asi 10 % objemu. Složení můžeme vylíčit následujícím schématem:



Obr. 7 – Schéma složení pájecí pasty [3].

U pájecích past hraje velkou roli velikost zrn. Protože se dnes součástky osazují velmi hustě a jsou daleko menší, musí mít pasty velmi malý rozptyl zrn a jemné zrnění. Samotná zrna jsou získávána technologií rozprašování a odstředování v ochranné atmosféře. Při odstředování docílíme nejjemnější velikosti zrn. Můžeme také kontrolovat stupeň oxidace na povrchu pasty a oxidování povrchu samotných zrn je velmi malé. Bohužel při jemnějším zrnění velmi stoupá podíl oxidů, proto musíme dát pozor na obsah prachových částí, které by mohly způsobovat problém se smáčivostí. Rozdělení pájecích past dle normy ANSI J-STD-005 nám ukazuje tabulka č. 1.

Typ	80 % částic [μm]	Max 10 % částic [μm]	Žádná větší než [μm]
1	150 - 75	menší než 20	160
2	75 - 45	menší než 20	80
3	45 - 25	menší než 20	50
Typ	90 % částic [μm]	Max 10 % částic [μm]	Žádná větší než [μm]
4	38 - 20	menší než 20	40
5	25 - 15	menší než 15	30
6	5 - 15	menší než 5	20

Tabulka 1 – Rozdělení pájecích past dle ANSI J-STD-005 [19].

Typ 1 je vhodný pro běžné aplikace,

Typ 2 je vhodný pro méně náročné aplikace s roztečí komponent 0,65 mm a větší,

Typ 3 je vhodný pro velmi jemné rozteče (rozteč 0,4 mm – 0,3 mm),

Typ 4 je vhodný pro velmi jemné rozteče (rozteč pod 0,3 mm),

Typ 5 a 6 jsou vhodné pro velmi jemné rozteče (rozteč pod 0,1 mm a 0,07 mm) [19].

Tavidlo je v pájecí pastě důležité pro chemické odstraňování oxidů z pájených plošek a vývodů součástek. Tím umožní vytvoření intermetalických sloučenin. Určuje nám také některé důležité vlastnosti, jako jsou chemické a elektrické vlastnosti pasty nebo nanášení pasty a pájitelnost. Tavidlo se skládá z pryskyřice, aktivátoru, tixotropních materiálů a rozpouštědel. Pryskyřice zde udává těstovitou konzistenci pasty, drží pájecí zrna pohromadě a nedovoluje jejich vysrážení. Drží také osazené SMD součástky na DPS. Dále viskozitu ovlivňují tixotropní činidla a rozpouštědla [3].

3.3.2. Nanášení pájecí pasty

Pasty lze nanášet třemi způsoby, což je dávkování disperzerem, sítotiskem a tiskem přes šablonu.

- **Dávkování disperzerem**

Tuto metodu nanášení pasty využíváme převážně při opravách nebo při malém množství pájených dílů. Velkou výhodou je, že pájecí pastu nanášíme pouze na místa, kde je to nutné v malých bodech. Lze zde také využívat strojní dávkování, které je na místě při častém střídání typu desek a výroba šablon by byla finančně náročná. Zde můžeme využít buďto píst, který tlačí tlakem pastu nebo je posunována pomocí šroubovice zkombinované s pístem a následně nanášena. Tato metoda je velmi přesná a spolehlivá. Snižuje také spotřebu pájecí pasty.

- **Sítotisk**

Síto, které je připevněné k pohyblivému rámu se skládá z vláken s oky, která mají hustotu mezi 24 – 78 ok na 1 cm. Místa, kam chceme nanést pájecí pastu, osvítime UV zářením a ozářený materiál se chemicky odstraní. Vrstva, která není osvětlená, vytvrdne. Síťka musí být stejná jako motiv na desce a je ve výšce 0,8 mm – 1 mm nad DPS. Následně se pomocí stěrky nanese pájecí pasta, která se protlačí a síto se při nanášení prohýbá.

- **Tisk přes šablonu**

Při této metodě nanášení pájecí pasty musíme do upevňovacího rámu umístit kovovou šablonu s přesným vzorem, který se má nanést na DPS. Jelikož je šablona vyrobená z kovu, neprohýbá se, a je tedy umístěná přímo na desce. Po upevnění desky nanášíme pájecí pastu pomocí stěrky, která se vyrábí z tvrdé pryže. Tloušťka šablon se pohybuje kolem 0,1 mm – 0,5 mm a reguluje nám množství nanášené pasty. Životnost šablony se zde počítá při správném zacházení v řádech desítek tisíců použití.

Šablony se mohou vyrobit pomocí chemického leptání, řezáním laserem nebo galvanickou cestou. Většina šablon se vyráběla pomocí chemického leptání. Kvůli hustšímu umístění součástek se od této metody opustilo a šablony se vyrábí převážně řezáním laserem. Při řezání laserem musíme dbát na přesnost a kvalitu rohů, oproti tomu galvanicky vyrobené šablony mají poměrně vysokou kvalitu.

Otvory v šabloně pro husté rozmístění součástek musí být tak velké, aby alespoň polovina pájecích kuliček pasovala do otvoru. Proto musíme vybrat dobrý typ pasty. Musíme také dávat pozor na zasychání pasty v rozích šablony. To by mohlo mít negativní vliv na objem pasty nanesený na DPS [3].

3.3.3. Pájení v parách

Princip pájení v parách je velmi jednoduchý. Tekutinu na dně pece přivedeme k varu a ta se odpaří, přičemž DPS osazenou součástkami umístíme do zóny výparu. Pára následně kondenzuje na vývodech součástek a pájecích ploškách DPS. To má za následek ohřátí desky plošných spojů a součástek na pájecí teplotu a následně se vytvoří pájený spoj. Teplota, která kondenzaci způsobí je mnohem větší, než teplota tavení pájky. Pro zabránění úniku páry ze stroje se překrývá primární parní zóna sekundární parní zónou. Rozložení teploty je v celém zařízení rovnoměrné a pohybuje se v rozsahu 220 °C – 235 °C nebo 250 °C – 265 °C. Tato teplota je daná použitými fluorovodíky, které mají bod varu 215 °C nebo 250 °C. Velká výhoda pájení v parách je, že pára vytlačuje z pájecího prostoru kyslík, takže nedochází k oxidaci pájených spojů [3].

3.3.4. Přetavení pomocí infračerveného záření

Tato metoda přetavení využívá toho, že každá látka, která má teplotu vyšší, než absolutní nula emituje elektromagnetické záření. Ke svému záření nepotřebuje žádné médium a je součástí elektromagnetického spektra. V přetavovacích pecích se používají sestavy, které vyzařují tepelnou energii díky elektricky napájeným zdrojům. Zde platí, že s vyšším elektrickým příkonem roste také tepelný výkon zdroje, což nám poskytuje částečnou regulaci použité teploty. Nejužitečnější vlnové délky pro ohřívání jsou v rozsahu 0,1 μm – 100 μm . Tento rozsah nám ukazuje, že zde používáme i jiné světelné složky kromě infračerveného. Proto by se spíše mělo hovořit o přetavení zářením, než infračerveným světlem, které je pouze jeho součástí. Standardně se při této metodě používají wolframové zářiče.

Nevýhody, které tato metoda provází, jsou spjaté s barvou součástek a možným zastíněním. Tmavé barvy lépe pohlcují záření, tudíž se lépe zahřejí a mohou se tedy zahřát vysoko nad teplotu tavení. Stínění zde nastane jednoduše, když ve směru záření jedna součástka zastíní druhou, což má negativní vliv na ohřev [3].

3.4. Pájení ponorem

Tato metoda pájení je velmi jednoduchá. Součástky, které chceme zapájet, ponoříme na určitou dobu do roztavené pájky. Při měkkém pájení se jedná o dobu 3 s – 10 s, při tvrdém 0,2 min – 20 min. Při ponoru je zamezen přívod vzduchu a tudíž nedochází k oxidaci povrchu.

Při pájení ponorem pozorujeme tyto výhody. Rovnoměrně se ohřívají všechny součásti, velmi rychlý ohřev, pájení bez přístupu vzduchu, snadná regulace a kontrola teploty, lze pájet hromadně i jednotlivě, snadná mechanizace i automatizace a možnost spojení procesu pájení s tepelným zpracováním.

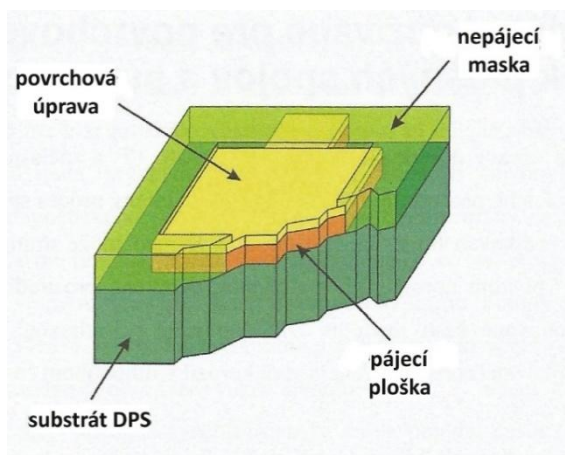
Nevýhodou tohoto pájení je, nutnost zbavení přebytečné pájky pomocí horkovzdušného nože, nutnost udržovat pájené části suché. Dále je tento proces velmi pomalý a málo účinný [2].

4. Povrchové úpravy DPS

Povrchové úpravy pájecích plošek desek plošných spojů jsou při pájení velmi důležité, a to jak při pájení samotném, tak při výsledné kvalitě pájeného spoje. Jejich význam je převážně takový, že chrání měď před oxidací, která má negativní vliv na pájitelnost. Složení povrchových úprav má také zásadní vliv na tvorbu intermetalických sloučenin. Nejčastěji využívané povrchové úpravy jsou uvedeny v tabulce č. 2.

Povrchové úpravy pájecích plošek DPS mají tyto úlohy:

- zabránění oxidace nebo jiných forem koroze mědi před pájením
- zachování dobré pájitelnosti povrchu, což je garancí kvality spoje
- vytvoření prostředí pro jiné kontaktovací technologie, jako je např. Wire bonding
- vytvoření bariéry pro minimalizaci rozpuštění mědi v průběhu montážních technologií [2]



Obr. 8 – Povrchová úprava pájecí plošky DPS [2].

Povrchová úprava	Technologie	Tloušťka vrstvy [μm]
Ponor do Ag	ponor DPS do chemické koupele	0,15 - 0,3
Ponor do Sn	ponor DPS do chemické koupele	0,6 - 1,2
ENIG	ponor DPS do chemické koupele (2x)	Ni: 4 - 6 Au: 0,05 - 0,2
OSP	OSP nanosená sprejováním na DPS	0,2 - 0,6
HASL	ponor DPS do koupele taveniny pájky, nadbytečná pájka následně odstraněna horkovzdušnými noži	5 - 45

Tabulka 2 – Nejčastěji používané povrchové úpravy [2].

4.1. Ag

Rozšíření této povrchové úpravy nastalo při zavedení bezolovnatého pájení. Vrstva stříbra má velmi dobrou smáčivost, pájitelnost, velmi přesnou tloušťku, dokáže odolat několikanásobnému přepájení a dá se použít jak vertikálně, tak horizontálně. Nevýhodou je, že se musí skladovat ve speciálních podmínkách. Při špatném skladování dochází k oxidaci a tvorbě Ag siričků. Jako prevence před těmito jevy se povrch potahuje organickým filmem, který však časem ztrácí kvalitu a k pájení tedy musí dojít řádově v několika měsících. Tato povrchová úprava je kompatibilní s většinou montážních procesů. Jejimi výhodami jsou, že jsou velmi vhodná pro BGA pouzdra, mohou se použít se zlatými vodiči a dobře se kontroluje vrstva stříbra. Při maximální vrstvě pár desetin μm a dokonale nanesené rovině je tato úprava vhodná pro velmi malé rozestupy vývodů součástek. Při zapájení zde vzniká intermetalická sloučenina Ag_3Sn [2].

4.2. Sn

Cínová povrchová úprava má typickou vysokou rychlost nanášení cínové vrstvy a námi volitelnou drsnost povrchu. Tloušťka zde ovšem není po celé vrstvě stejná a již po prvním pájení se snižuje pájitelnost. Skladování DPS s touto úpravou je možné pouze několik měsíců a musíme zachovat speciální podmínky. Sn totiž za přítomnosti vzduchu značně oxiduje a je tedy jako Ag potažen organickou vrstvou, která ztrácí časem kvalitu. Při použití této vrstvy je značné riziko tvorby intermetalických sloučenin a také whiskerů [2].

4.3. ENIG

Tato povrchová úprava (ENIG - Electroless nickel immersion gold) je výborně pájitelná a hodí se pro součástky s velmi jemnými vývody a bezolovnaté pájení. Je zde možná pouze rovinná aplikace. Šířka vrstvy Ni se zde používá v řádech μm a Au setiny, až desetiny μm . Tato povrchová úprava má výhodu, že se používá již velmi dlouho a známe tedy kompletně proces nanášení, je možné ji několikrát přepájet, skladování je možné několik měsíců, je kompatibilní s Ni a Sn, nikl zabraňuje difúzi mědi do pájky. Zlato zde slouží pouze pro zabránění oxidace niklu, který má při oxidaci nízkou pájitelnost. Tato úprava má ovšem i mnoho nevýhod. Jednou z největších je vyšší cena, dále pak dvoukrokový proces nanášení, mohou vzniknout tzv. „černé pájecí plošky“ vlivem přítomnosti fosforu při nanášení niklu, který je pak křehký a používání jedovatých chemikálií při výrobě [2].

4.4. OSP

Organická konzervační látka (OSP - Organic Surface Protectives) je tenký ochranný film nanesený na měď. Slouží k ochraně před oxidací a zvyšuje čas možnosti skladování. Tato vrstva má šířku okolo desetiny μm . OSP jsou kompatibilní se všemi druhy kovů a lze je skladovat až jeden rok. Přesná tloušťka vrstvy se zde kontroluje velmi složitě. Velkou výhodou je, že je tato vrstva levná,

lehce se aplikuje, je odolná vůči otěru a lze ji použít pro součástky s jemnými rozestupy mezi vývody. Nevýhodou je stárnutí materiálu.

OSP se také využívá jako konzervační vrstva jiných povrchových úprav, které na vzduchu oxidují. Nanesení této vrstvy zlepšuje jejich vlastnosti [2].

4.5. HASL (HAL)

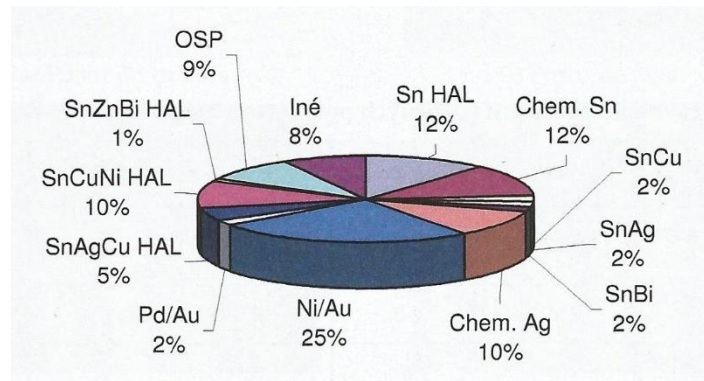
Při použití povrchové úpravy HASL (Hot Air Solder Leveling) se DPS ponoří do roztavené pájky. Velikost nanesené vrstvy zde může být až 45 μm , záleží ovšem na použité pájecí slitině. Přebytečnou pájku pak odstraníme pomocí teplých horkovzdušných nožů, které foukají na DPS teplý vzduch. Tato povrchová úprava má mnoho výhod. Pájitelnost i smáčivost povrchu je dobrá i při několikanásobném přetavení. Nevýhodou zde je nestejnětloušťka na ploše a riziko tvorby intermetalik. Tato povrchová úprava také není vhodná pro součástky s jemnými rozestupy vývodů [2].

4.6. Srovnání jednotlivých typů povrchových úprav DPS

Nejpoužívanější povrchovou úpravou na světě je HASL [2]. Ten ovšem není vhodný pro součástky, které mají vývody s velmi malou vzdáleností od sebe. Hledaly se tedy alternativy, které by ho mohly nahradit. Jedná se převážně o OSP, ENIG, Sn a Ag. Ty jsou díky rovnému povrchu vhodné pro pájení součástek s menší vzdáleností od sebe a zvyšují funkčnost elektroniky. Dají se také využít pro bezolovnaté pájení a jsou dobře pájitelné. Dokonce náklady vzniklé při jejich použití mohou být až o 30% menší, což v dnešní době hraje poměrně velkou roli. Porovnání jejich vlastností je znázorněné v tabulce č. 3 [2].

Vlastnosti	HASL	Ponor do Sn	Ponor do Ag	OSP	ENIG
Teplota zpracování (°C)	240 - 260	70	50	40	80
Počet cyklů přetavení	6	2 - 3	6	2	6
Skladovací doba (měsíce)	18	6	12	6	24
Relativní cena	1	0,8	0,8	0,7	3
Jemný povrch	ne	ano	ano	ano	ano

Tabulka 3 – Porovnání vlastností rozdílných typů povrchových úprav DPS [2].



Graf 1 – Poměrné zastoupení povrchových úprav DPS [2].

5. Tavidla

Tavidla jsou stejnorodé směsi chemických sloučenin a vyskytují se v tekutém stavu (živice), tuhém stavu (organické látky) nebo jako pasta z anorganických solí, kyselin a zásad. Nejčastěji se při pájení DPS používají tavidla tekutá, která se mohou nanášet napěněním, nástřikem nebo vlnou. Při pájení přetavením se tavidla používají pro větší kompatibilitu slitin a jsou již obsažena v pájecí pastě, přičemž tavidlo tvoří 10 % – 15 % její hmotnosti. Zde také dobré pájecí vlastnosti záleží na vlastnostech pájecí pasty, zejména na její viskozitě a lepivosti.

Hlavním cílem použití tavidla je odstraňovat oxidy z povrchu pájených spojů a zabránit jejich vzniku při pájení, zamezit přístupu reakčních prvků a podpořit smáčení tím, že chemicky čistí kontakty, snižuje povrchové napětí v rozhraní pájka – tavidlo a rozloží rovnoměrně teplotu na celé ploše pájeného spoje.

Přestože jsou tavidla při pájení nezbytná, je velmi často nutné po dokončení procesu pájení tavidlo z DPS chemicky odstranit kvůli jeho agresivním vlastnostem. Tyto vlastnosti by mohly negativně ovlivnit základní požadavky pro pájené spoje, jako jsou pevnost v tahu a smyku při namáhání, vysoká elektrická vodivost, odolnost vůči korozi a oxidaci. Elektrická vodivost může být ovlivněna chybami vznikajícími při pájení – zanesení tavidla do spoje, voidy, trhliny, špatný přechod pájky a pájeného materiálu a jiné. Odolnost spojů vůči korozi a oxidaci zase mohou způsobit agresivní elektrolyty nebo agresivní aktivační látky. V dnešní době se snažíme vyvíjet tavidla, která nebudou agresivní, bez halogenů a s nízkou teplotou tání, převážně na bázi syntetických živic [2].

5.1. Dělení tavidel

Tavidla rozlišujeme podle jejich rozpouštědla na tavidla rozpustná rozpouštědlem a tavidla rozpustná vodou. Pro upřesnění, voda je rozpouštědlem, ovšem v elektrotechnice se označením rozpouštědlo rozumí rozpouštědlo na organické bázi [3].

5.1.1. Tavidla rozpustná v rozpouštědle

Kategorie těchto tavidel mají základ z borovicové pryskyřice, které se říká kalafuna. Ta je ovšem velmi málo aktivní, proto jsou do ní přidávány přísady pro její větší aktivitu. Dále jsou zde zahrnutá syntetická tavidla, které se získávají derivací některých organických sloučenin [3].

Pryskyřičná tavidla na bázi kalafuny

Tato tavidla se dělí podle úrovně aktivity a jsou definovány pomocí americké vojenské normy MIL-F-14256 takto:

- **Typ R**

Tato tavidla se skládají z lihem rozpuštěné kalafuny a mají velmi nízkou aktivitu. Díky slabé čistící schopnosti se hodí pouze pro velmi dobře pájitelné povrchy, jako jsou zlaté povrchy.

Pro měděné, cínové nebo cíno-olověné nejsou dost aktivní. Tavidlo se po zapájení nemusí odstraňovat, protože je při pokojové teplotě neaktivní. Dříve se kalafuna používala pro konzervaci plošných spojů pro zachování dobré pájitelnosti [3].

- **Typ RMA**

Tavidlo typu RMA vychází z tavidla typu R. Obsahuje tedy pryskyřice, které jsou doplněné malým množstvím vhodných organických směsí, které mají být přidávány dle norem, které vychází z elektrických a chemických testů. Jako aktivátory zde slouží aminohydrochloridy, polybazické karbonové kyseliny a organické halogenidy. Použití je zde díky vyšší aktivitě širší než u tavidel předchozího typu. Hodí se například pro pájení povrchů měděných, cíno-olověných a zlatých. Toto tavidlo se po dokončení procesu pájení také jako u předchozího typu nemusí odstraňovat.

Pokud by k odstranění z nějakého důvodu mělo dojít, musí se dokonale odstranit, neboť se může předtím vázaný aktivátor z pryskyřice uvolnit, rozptýlit a urychlovat korozi [3].

- **Typ RA**

RA tavidlo obsahuje agresivnější příměsi než u tavidel předchozího typu. Podíl těchto příměsí opět definují normy vycházející z testů. Toto tavidlo se hodí k pájení kovů, které nejsou možné zapájet tavidly typu R a RMA. RA tavidlo zrychluje smáčení dobře pájitelných kovů a zmenšuje tak vady během pájecího procesu. Oproti předchozím dvěma typům se toto tavidlo po dokončení procesu musí odstranit. Při jejich zanechání na povrchu způsobují korozi [3].

- **Typ RSA**

Tento typ tavidla je silně aktivované velmi agresivními příměsemi. Je tedy bezpodmínečně nutné ho po pájecím procesu odstranit. I přes jeho značné využití při pájení však tento typ není formálně součástí uvedené normy.

Norma MIL-F-14256 nám tavidla rozděluje podle úrovně jejich aktivity. V praxi nás ovšem také zajímá nutnost čištění zbytků po pájení. Tuto informaci nám však tato norma neposkytuje. Charakterističtější popis tavidel nám pak poskytuje norma DIN, kde se dozvíme kromě jejich popisu také, zda je nutné jeho zbytky odstraňovat. Klasifikaci podle normy DIN najdeme v následující tabulce č. 4 [3].

Složení	Aktivita tavidla (% halogenidu)	Označení aktivity tavidla	Klasifikace tavidla podle IEC	Klasifikace tavidla podle ISO
Přírodní živce (Rosin-RO)	nízká (0%)	L0	ROL0	1.1.1
	nízká (<0,5%)	L1	ROL1	1.1.2.W, 1.1.2.X
	mírná (0%)	M0	ROM0	1.1.3
	mírná (0,2%-2,0%)	M1	ROM1	1.1.2.Y, 1.1.2.X
	vysoká (0%)	H0	ROH0	1.1.3.X
	vysoká (0>2%)	H1	ROH1	1.2.2.Z
Živce (Resin-RE)	nízká (0%)	L0	REL0	1.2.1
	nízká (<0,5%)	L1	REL1	1.2.2.W, 1.1.2.X
	mírná (0%)	M0	REM0	1.2.3
	mírná (0,2%-2,0%)	M1	REM1	1.2.2.Y, 1.1.2.X
	vysoká (0%)	H0	REH0	1.2.3.X
	vysoká (0>2%)	H1	REH1	1.2.2.Z
Organické (Organic-OR)	nízká (0%)	L0	ORL0	2.2.1., 2.2.3.E
	nízká (<0,5%)	L1	ORL1	/
	mírná (0%)	M0	ORM0	/
	mírná (0,2%-2,0%)	M1	ORM1	2.1.2, 2.2.2
	vysoká (0%)	H0	ORH0	2.2.3.0
	vysoká (0>2%)	H1	ORH1	2.2.2
Anorganické (Inorganic-IN)	nízká (0%)	L0	INL0	Neaplikovatelné
	nízká (<0,5%)	L1	INL1	
	mírná (0%)	M0	INM0	
	mírná (0,2%-2,0%)	M1	INM1	
	vysoká (0%)	H0	INH0	
	vysoká (0>2%)	H1	INH1	

Tabulka 4 – Klasifikace tavidel podle DIN EN 61190-1-1 [2].

Nejnovější a také nejvýstižnější norma současně používaných tavidel je evropská norma EN 9454-1, která obsahuje i nově vyvinutá tavidla. Předpokládá se, že brzy vytlačí předchozí používané normy. Klasifikace podle této normy najdeme v tabulce č. 5.

Klasifikace tavidla			Kód	
Typ tavidla	Základ tavidla	Aktivace tavidla		
1. Pryskyřičná	1. Kalafuna	1. Bez aktivátorů	1.1.1	
	2. Nekalafunová pryskyřice	2. Halogeny	1.2.1	
		3. Nehalogenové aktivátory		1.1.2
				1.2.2
				1.1.3
		1.2.3		
2. Organická	1. Vodou ředitelná	1. Bez aktivátorů	2.1.2	
	2. Vodou neředitelná	2. Halogeny	2.1.3	
		3. Nehalogenové aktivátory		2.2.2
				2.2.3
3. Anorganická	1. Soli	1. S chloridem amonným	3.1.1	
		2. Bez chloridu amonného	3.1.2	
	2. Kyseliny	1. Kyselina fosforečná	3.2.1	
		2. Jiná kyselina	3.2.2	
	3. Alkálie	1. Aminy nebo amoniak	3.3.1	

Tabulka 5 – Klasifikace tavidel podle EN 9454-1 [3].

Syntetická tavidla

Syntetická tavidla se začala vyvíjet pro potlačení nevýhod tavidel na bázi kalafuny, které mají složení závislé na místě výskytu a klimatických podmínkách. Navíc se zbytky, které zanechávají, obtížně odstraňují.

Koncem sedmdesátých let byla tedy vyvinuta z výše uvedených důvodů syntetická aktivovaná tavidla. Jsou složená z monoisooktylu a diisooktylu fosfátových směsí s příměsí pro zvýšení aktivity a lepšímu odstraňování zbytků. Jejich hlavní výhodou je tedy mnohem lepší čištění po aplikaci a své využití najdou při pájení vlnou a v pájecích pastách [3].

5.1.2. Tavidla rozpustná vodou

Tavidla rozpustná ve vodě jsou organické kyseliny s vysokou aktivitou. Jsou podstatně aktivnější než tavidla z pryskyřice. Používala se převážně při pájení vlnou, kde se dříve neřešily problémy s pájitelností součástek a pájely se tedy součástky a desky s rozdílnou pájitelností.

Zbytky po pájení je opravdu jednoduché odstranit pomocí vody, případně demineralizované vody. Je ovšem velmi důležité je odstranit ihned po pájení. Díky snadnému čištění a látce, která se k němu používá, je, co se týče finanční stránky čištění velmi levné [3].

5.1.3. Bezoplachová tavidla

Tato tavidla se začala vyrábět kvůli snaze odstranění čistícího procesu po pájení, čímž bychom ušetřili čas i finance. Finanční stránka zde hraje velkou roli, protože stroje využívané k čistícím

procesům jsou poměrně složité a rozpouštědla jsou dražší, případně jsou neekologická, tudíž zakázána. Během čištění také můžeme poškodit některé křehké vývody na součástkách.

Bezoplachové tavidlo musí splňovat následující podmínky:

- nesmí zanechávat korozivní zbytky,
- musí zajišťovat vynikající pájitelnost,
- musí umožňovat přístup měřících jehel na testovací plošky,
- nesmí zanechávat lepivé zbytky,
- nesmí zhoršovat stav pájecího zařízení,
- musí vyhovovat předpisům o ochraně zdraví a bezpečnosti [3].

Pevné látky obsažené v tavidle se u tohoto typu snížily ze 40 % na 1 % - 5 % objemu. Jako aktivátory se zde využívá kyselina karbonová nebo dikarbonová, případně pouze mastné kyseliny a aminokyseliny, které se během pájení přetavením vypaří.

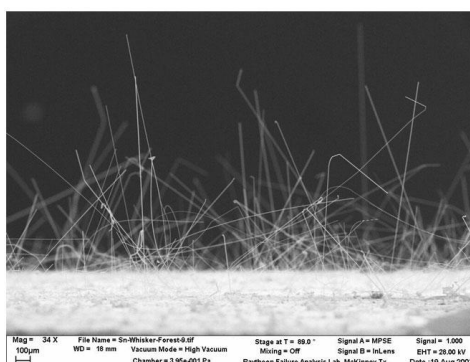
Při používání těchto tavidel je po pájecím procesu nutné velmi dobře zkontrolovat vzhled a chování zbytků okolo spoje. Může totiž nastat situace, že vlastnosti, které tato tavidla mají, nebudou pro naše účely stačit a budeme je i přes jejich vlastnosti muset odstranit [3].

6. Chyby při pájení

Spolehlivost pájeného spoje ovlivňuje velmi mnoho negativních faktorů. V této kapitole jsou uvedeny chyby při pájení, které mají značný vliv na kvalitu pájeného spoje.

6.1. Whiskery

Cínový whisker je spontánně rostoucí krystalová struktura cínu. Ta je elektricky vodivá. Whiskery většinou rostou do délky 1 mm, vzácně se ovšem vyskytnou i delší. Jejich průměr se pohybuje okolo 1 μm . Mechanismus růstu whiskerů je i přes jeho dlouhou dobu studování nejasný. Závěry vycházející z experimentů se totiž rozcházejí. Všeobecně se předpokládá, že ho způsobuje tlak uvnitř metalické vrstvy a po překročení kritické hodnoty začne růst whisker [8].



Obr. 9 – Cínové whiskery [14].

6.2. Můstky

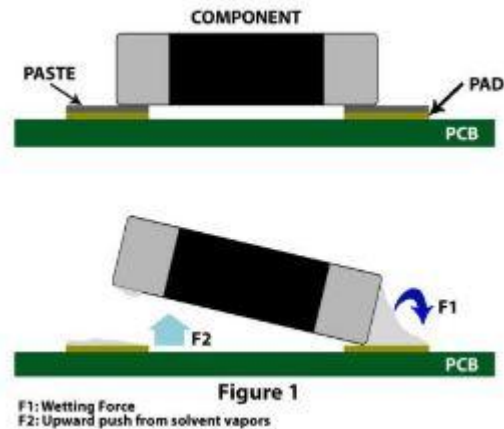
Můstky mohou při pájení vznikat z mnoha důvodů, například při malé vzdálenosti mezi vývody součástky, při nedokonalém očištění šablony při tisku pasty, nebo při použití nevhodné pájecí pasty. Tento jev je velmi negativní, protože způsobuje zkratování a následné zničení součástek. Předějit mu můžeme používáním pouzder součástek s větším rozstupem vývodů, kvalitním čištěním a používáním vhodných pájecích past [9].



Obr. 10 – Cínové můstky [9].

6.3. Tombstone efekt

Při Tombstone efektu dochází po přetavení ke zvednutí jedné části pájené součástky, a tedy přerušení obvodu. Tento jev vzniká zejména u součástek menších rozměrů. Dochází k němu tak, že vlivem povrchového napětí roztavené pájky není vyvážený moment na obě strany pájené součástky [10].



Obr. 11 – Tombstone efekt [10].

6.4. Kapky pájky

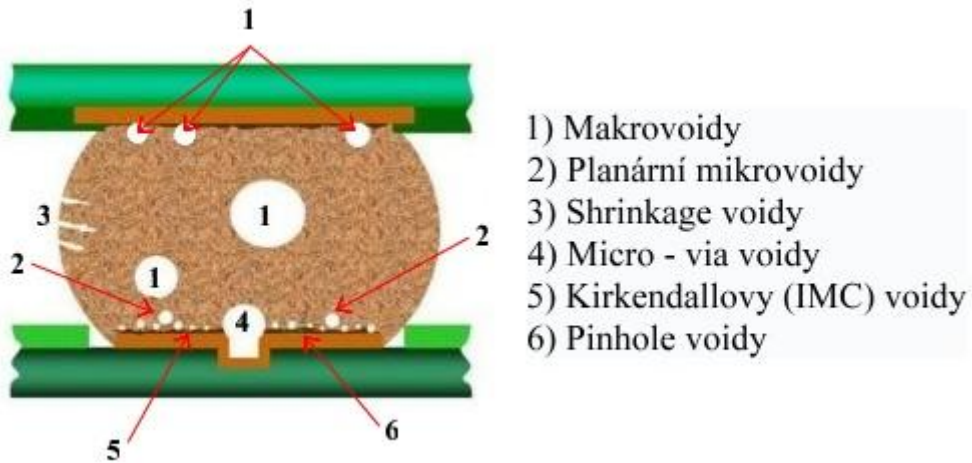
Kapky pájky okolo pájeného spoje vznikají při osazování součástky. Pájka se nanese na pouzdro a při přetavení se dostane vedle pájeného spoje, kde vytvoří kapky pájky.

6.5. Rozstřík tavidla

Rozstřík tavidla vzniká zejména při prudkém nárůstu teploty při procesu přetavení. Tavidlo se začne rychle vypařovat a vzniklé výpary způsobí rozstříknutí pájky kolem pájeného spoje [3].

6.6. Voidy

Vznik voidů, je typický při procesu pájení přetavením. Popisujeme je jako dutiny, které obsahují vakuum, plyny, tekuté nekovové materiály nebo zbytky přírodních látek. Voidy mají za následek snížení jak mechanické, elektrické, tak i tepelné vodivosti a při výskytu více jak 25 % mohou způsobovat značné problémy se spojením. Výzkum voidů je velmi spjatý s přechodem na bezolovnaté pájení. Bylo totiž vyzkoušeno, že bezolovnaté pájky způsobují jejich větší výskyt. Příčiny vzniku voidů je několik. Způsobuje je například tvar teplotního profilu při přetavení pájecí pasty, složení pájecí pasty, vyšší povrchové napětí pájky, povrchová úprava DPS, geometrie pájeného spoje a jiné. Voidy mají několik základních druhů, viz obr. 12 [12].

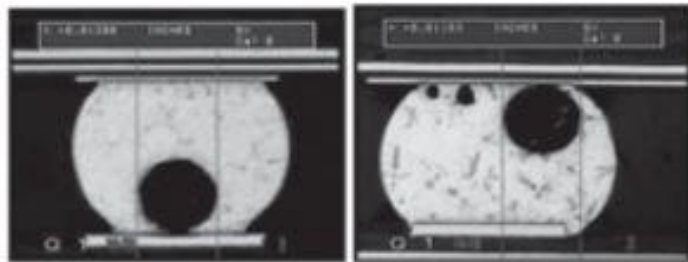


Obr. 12 – Rozmístění voidů v pájeném spoji [11].

6.6.1. Makrovoidy

Makrovoidy jsou nejvíce vyskytovaný typ voidů. Jejich průměr se pohybuje mezi 100 μm – 300 μm a mohou se vyskytovat kdekoli v pájeném spoji. Někdy se jim také říká „procesní“ voidy, protože je jejich vznik spjatý s reakcí tavidla, rozpouštědla a jiných látek během procesu pájení.

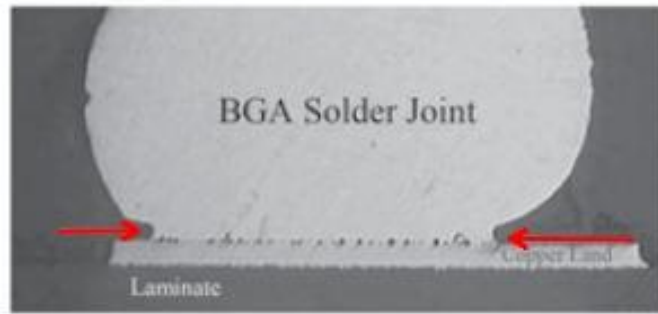
Faktory, které ovlivňují velikost makrovoidů jsou vlastnosti pájky (velikost kuliček, složení, teplota tavení a oxidace), tavidlo (viskozita, povrchové napětí, aktivátor, rozpouštědlo,...), pájený proces (geometrie, tvar, oxidace vývodu,...) a proces (tloušťka, tvar a parametry tisknuté vrstvy pasty a teplotní profil) [12], [13].



Obr. 13 – Makrovoidy [12].

6.6.2. Planární mikrovoidy

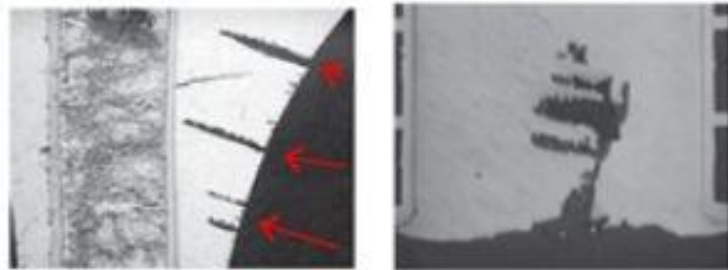
Mikrovoidy mají průměr menší než 25 μm v průměru. Jejich hlavní příčina výskytu není zcela známá, předpokládá se ale, že je jejich výskyt závislý na povrchové úpravě plošek pájených spojů. Jsou typické pro povrchové úpravy ENIG, Ag a OSP. Vyskytují se na rozhraní pájky a pájecí plochy v jedné rovině. Tyto voidy značně snižují mechanickou pevnost spoje [12], [13].



Obr. 14 – Mikrovoidy [12].

6.6.3. Shrinkage voidy

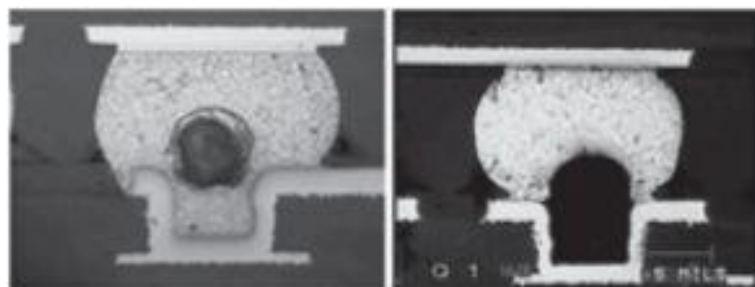
Shrinkage voidy, neboli „Sink Holes“ nebo „Hot Tears“ nejsou typicky kruhového tvaru jako ostatní typy voidů. Mají tvar podlouhlé nerovné plochy vystupující z povrchu do pájeného spoje. Tyto voidy vznikají na konci procesu tuhnutí roztavené pájky, která se při pomalém ochlazování smršťuje, a tak vznikají tyto dutiny. Jsou velmi typické pro pájky SAC. Shrinkage voidy nemají dokázaný negativní vliv na spolehlivost pájeného spoje a lze je odstranit pomocí řízeného ochlazování [12], [13].



Obr. 15 – Shrinkage voidy [12].

6.6.4. Mikro-via voidy

Tyto voidy mají typický průměr 100 μm , jejich průměr se však může pohybovat od 25 μm do 150 μm . Mikro-via voidy vznikají vlivem unikání plynů z překrytých nebo otevřených mikrovia otvorů během pájení přetavením. Mikrovia propoje se používají u vícevrstvých DPS, kde zajišťují vodivé propojení desek. Průměr Mikro-via voidů lze omezit zvětšením mikrovia propojů. Tyto voidy mohou velmi výrazně ovlivnit spolehlivost pájeného spoje [12], [13].

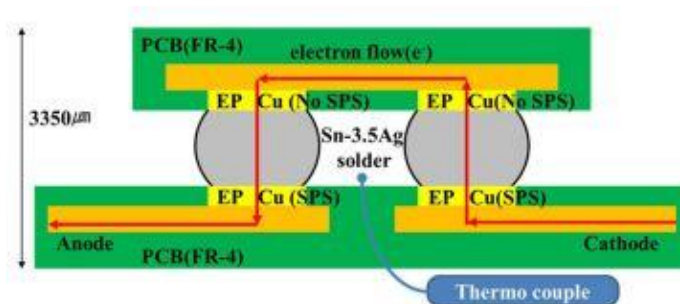


Obr. 16 – Mikro-via voidy [12].

6.6.5. Kirkendallové (IMC) vady

IMC vady se tvoří v intermetalické sloučenině vznikající mezi pájkou a DPS. Vznikají při tepelném stárnutí a elektromigraci, převážně při tepelném namáhání nad 100 °C. S rostoucí teplotou výskyt roste exponenciálně. Příčinou vzniku jsou jiné difúzní koeficienty cínu a mědi. Tyto vady značně snižují spolehlivost spoje, který jejich vlivem postupně křehne.

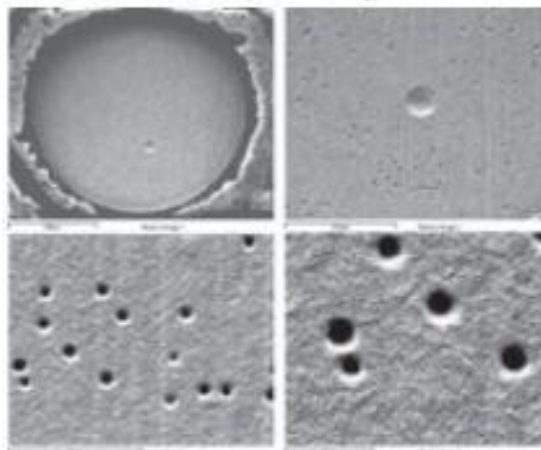
Kirkendallové vady způsobené elektromigrací jsou způsobené průtokem elektrického proudu, při kterém dochází k materiálovému toku. To způsobuje tlakové namáhání směrem k anodě a způsobuje zvětšování intermetalických sloučenin a vznik těchto vad [12], [13].



Obr. 17 – Kirkendallové vady způsobené elektromigrací [13].

6.6.6. Pinhole vady

Pinhole, neboli „špendlíkové“ vady vznikají při úniku plynu z kovových pájecích plošek při pájení přetavením. Jejich rozměry se pohybují kolem 1 μm – 3 μm. Hlavní příčinou vzniku těchto vadů je uzavření chemikálií při procesu pokovení DPS. Vyskytují se převážně u povrchové úpravy galvanickou mědí [12], [13].

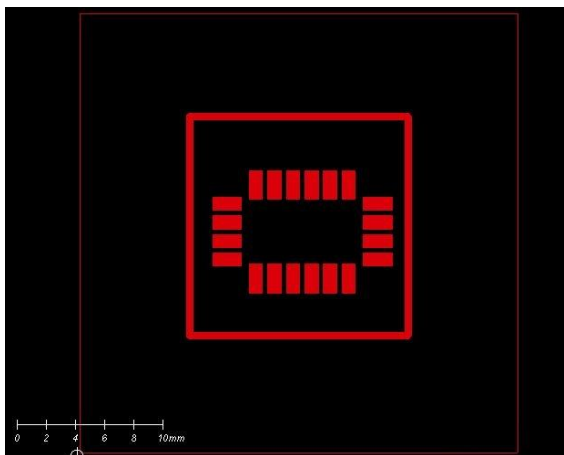


Obr. 18 – Pinhole vady [12].

II. Praktická část

1. Návrh testovacích DPS

Pro vytvoření vzorků bylo nutné nejprve navrhnout testovací DPS. K tomu účelu jsme použili program EAGLE 7.3.0.. Deska plošných spojů s motivem byla (vzhledem k velikosti motivu) zvolena o rozměrech 30 mm x 30 mm. Aby nedocházelo ke zbytečnému ničení mikroprocesorů, navrhli jsme také vhodný menší protikus o rozměrech 15 mm x 15 mm, který nám je simuloval.



Obr. 19 – Obrázek Gerberových dat pro výrobu.

2. Příprava vzorků

Podle našeho návrhu jsme si nechali vyrobit podkladovou DPS i protikus s povrchovými úpravami HAL, ENIG a OSP. Povrchová úprava OSP je tvořena lázní Gliccoat – SMD (E3), která se vyznačuje nízkou dobou ponoru (cca 40 sekund) při teplotě 40 °C [17]. Materiál byl zvolen FR4, tedy z tkaniny skelných vláken s epoxidovou pryskyřicí s plátováním Cu v šířce 35 μm.

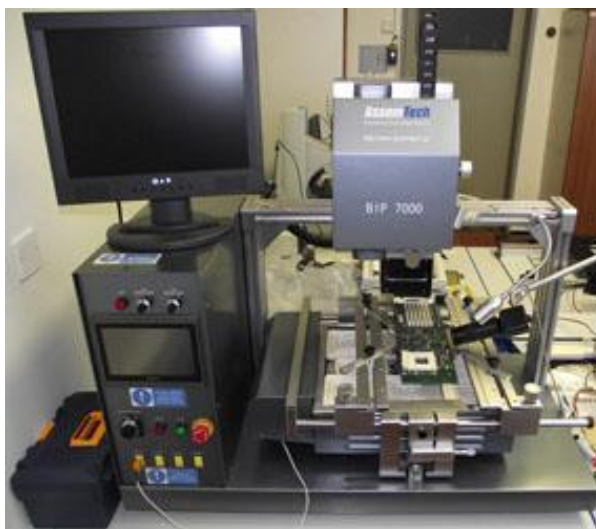
3. Zapájení DPS

3.1. Nanesení pájecí pasty a osazení

Pro pájení byly použity dvě bezolovnaté pájecí pasty, nanesené na DPS pomocí šablony v sítotiskovém zařízení SAB 06. První použitá pasta byla M705-GRN360-K2-V (dále jen SnCu) a druhá L20-SSG-010-42-10 (dále jen SnBi). Jejich specifikace jsou uvedeny v tabulce č. 6. Po nanesení pájecích past jsme osadili protikusy pomocí opravárenského pracoviště BIP 7000.

Výrobce	Senju	Senju
Typ	Bezolovnatá	Bezolovnatá
Označení	M705 - GRN360 - K2 - V	L20-SSG-010-42-10
Složení	Sn99,3/Cu0,7	Sn42/Bi58
Teplota přetavení	227 °C	138 °C
Velikost částic	20 - 45 μm	25 - 36 μm
Typ tavidla	RMA	RMA

Tabulka 6 – Parametry použitých pájecích past [22], [23].



Obr. 20 – Opravárenské pracoviště BIP 7000 [16].

3.2. Přetavení

Přetavení vzorků jsme provedli pomocí průběžné pece Mistral 260. Tato pec obsahuje 3 teplotní zóny - dvě pro předehřev a jednu pro přetavení. Teplotní profil k jednotlivým pájecím pastám byl nastaven dle návodu.



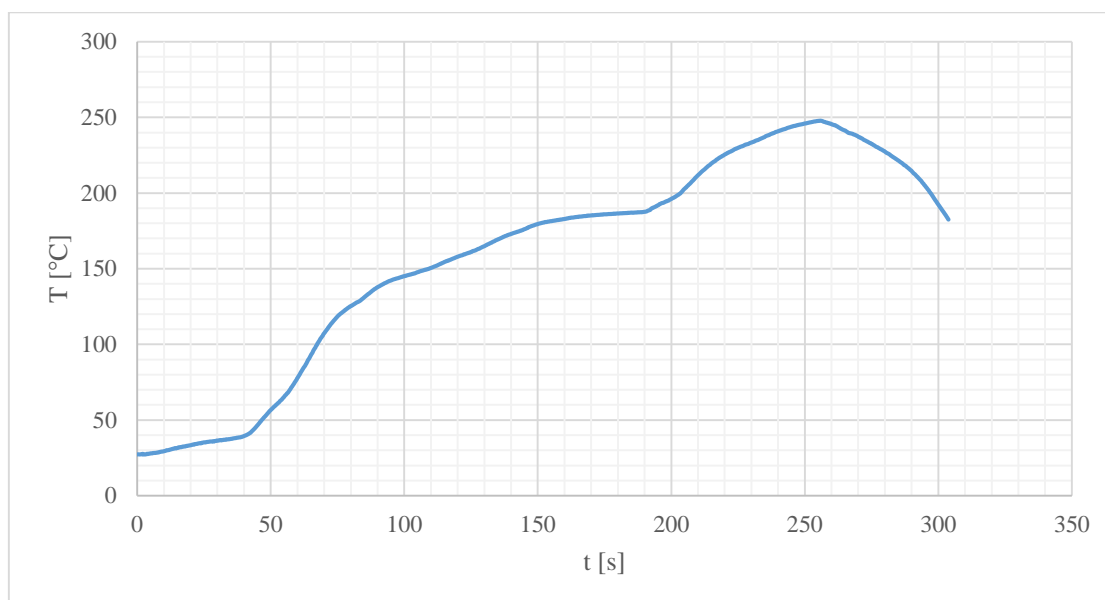
Obr. 21 – Přetavovací pec Mistral 260 [16].

Nastavení teplotních zón pece pro pájecí pastu typu SnCu bylo následující:

Zóna	Teplota [°C]
1.	175
2.	200
3.	260

Tabulka 7 – Nastavení teplotních zón pece pro pájecí pastu typu SnCu.

Teplotní profil, který jsme pomocí profilometru změřili, nám vykresluje graf č. 2.



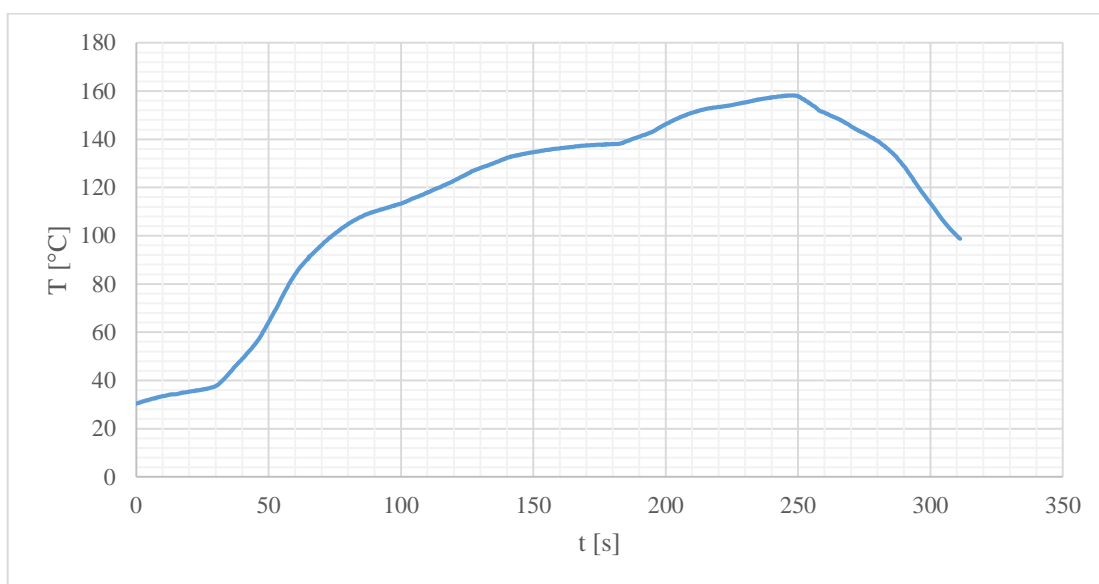
Graf 2 – Použitý teplotní profil pro pájecí pastu SnCu.

Pro SnBi pájecí pastu jsme nastavili teplotní zóny následovně:

Zóna	Teplota [°C]
1.	130
2.	145
3.	160

Tabulka 8 – Nastavení teplotních zón pece pro pájecí pastu typu SnBi.

Změřený teplotní profil nám ukazuje následující graf č. 3.



Graf 3 – Použitý teplotní profil pro pájecí pastu SnBi.

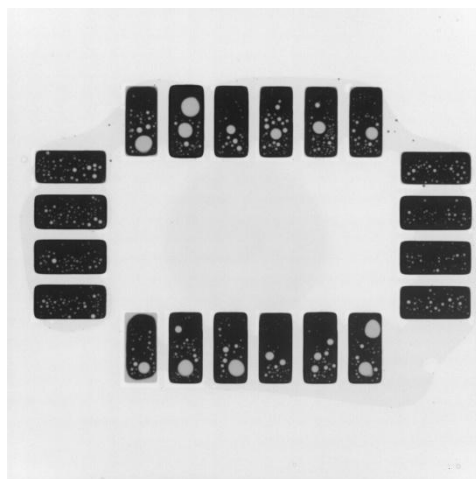
4. Analýza pájeného spoje

4.1. Rentgenová analýza

Pro určení voidovitosti pájeného spoje je nutné použít RTG diagnostiky. K této analýze jsme využili zařízení GE PHOENIX X-RAY NANOMEX 180T. Výhodou tohoto zařízení je, že nám po vhodném naprogramování umožňuje rentgenování většího množství vzorků najednou. V našem případě vyhodnocujeme jako voidy světlá místa v pájeném spoji.



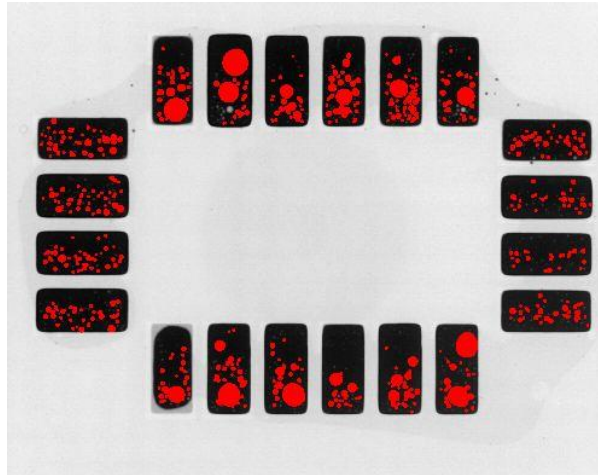
Obr. 22 – GE PHOENIX X-RAY NANOMEX 180T [15].



Obr. 23 – Snímek z RTG zařízení.

4.2. Obrazová analýza

Pro vyhodnocení snímků z rentgenu byl použit program NIS-Elements, který nám umožňuje obrazovou analýzu. Díky této metodě nám software vyznačí světlejší místa a následně změří plochu jednotlivých voidů. K tomuto účelu jsme použili makro (Příloha 1). Kvůli nepřesnostem programu bylo ovšem nutné provádět pro každý snímek určité korekce.



Obr. 24 – Označené voidy v pájeném spoji.

Takto jsme vyhodnotili všechny vzorky s různými povrchovými úpravami. Pro rozdělení voidů jsme si určili hranici $100 \mu\text{m}^2$, kde voidy s menší plochou klasifikujeme jako mikrovoidy a s plochou větší jako makrovoidy.

5. Vyhodnocení

Data získaná pomocí obrazové analýzy bylo nutné dále zpracovat. Jak již bylo zmíněno, pro zapájení vzorků jsme použili 2 typy pájecích past. Celková plocha pájecích plošek jednotlivých vzorků je 40 mm². V následujících grafech jsou uvedeny průměrné hodnoty počtu voidů a makrovoidů, dále pak průměrné hodnoty plochy voidů a makrovoidů v pájených spojích pro různé kombinace povrchových úprav.

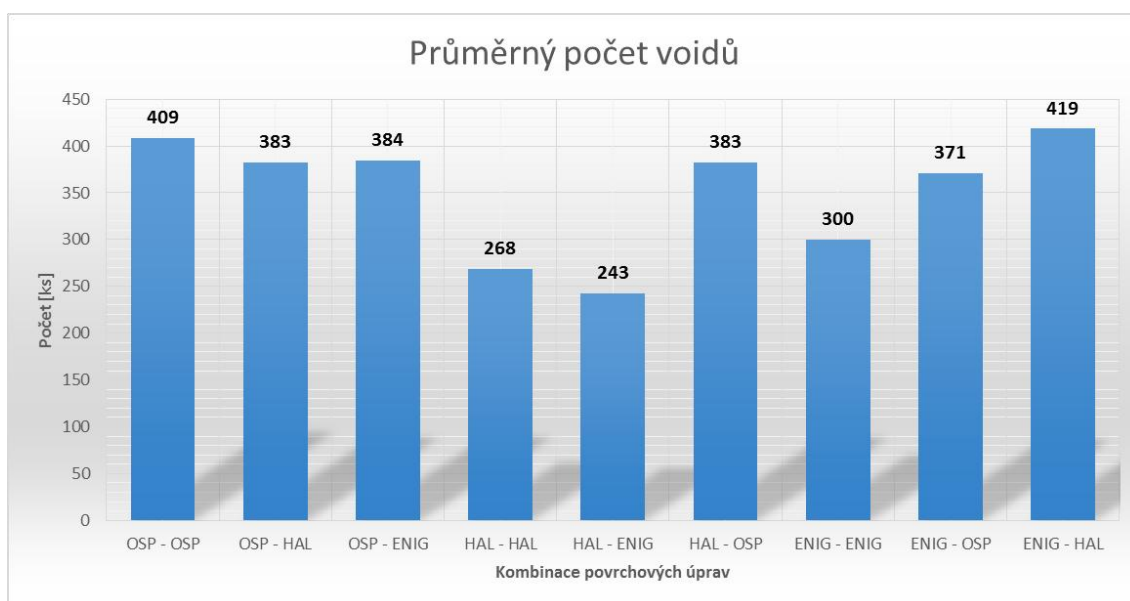
5.1. Pájecí pasta typu SnCu

Naměřené hodnoty ukazuje následující tabulka č. 9.

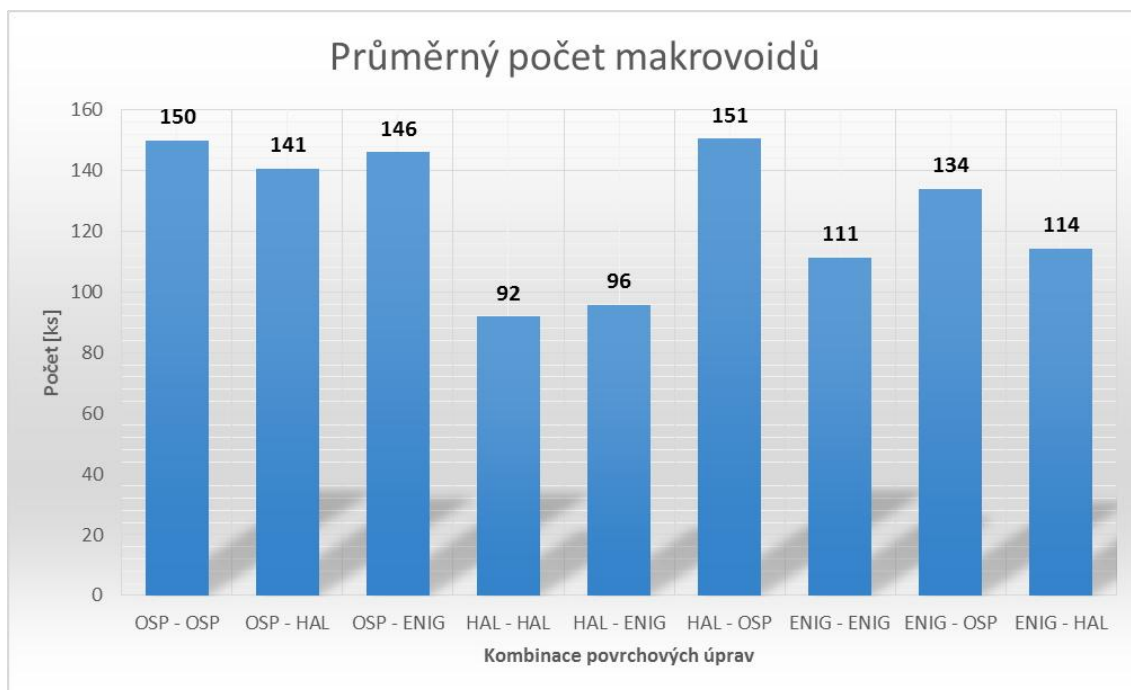
Kombinace povrchových úprav	Průměrný počet voidů [ks]	Průměrná plocha voidů [mm ²]	Voidovitost vzhledem k celkové ploše [%]	Průměrný počet makrovoidů [ks]	Průměrná plocha makrovoidů [mm ²]	Makrovoidovitost vzhledem k celkové ploše [%]
OSP - OSP	409	5,214	13,03	150	4,164	10,41
OSP - HAL	383	4,495	11,24	141	3,526	8,82
OSP - ENIG	384	5,298	13,24	146	4,368	10,92
HAL - HAL	268	4,099	10,25	92	3,437	8,59
HAL - ENIG	243	4,710	11,77	96	4,124	10,31
HAL - OSP	383	6,216	15,54	151	5,275	13,19
ENIG - ENIG	300	4,928	12,32	111	4,163	10,41
ENIG - OSP	371	6,088	15,22	134	5,184	12,96
ENIG - HAL	419	4,722	11,80	114	3,535	8,84

Tabulka 9 – Naměřené hodnoty pro pájecí pastu SnCu.

5.1.1. Četnost voidů v pájeném spoji



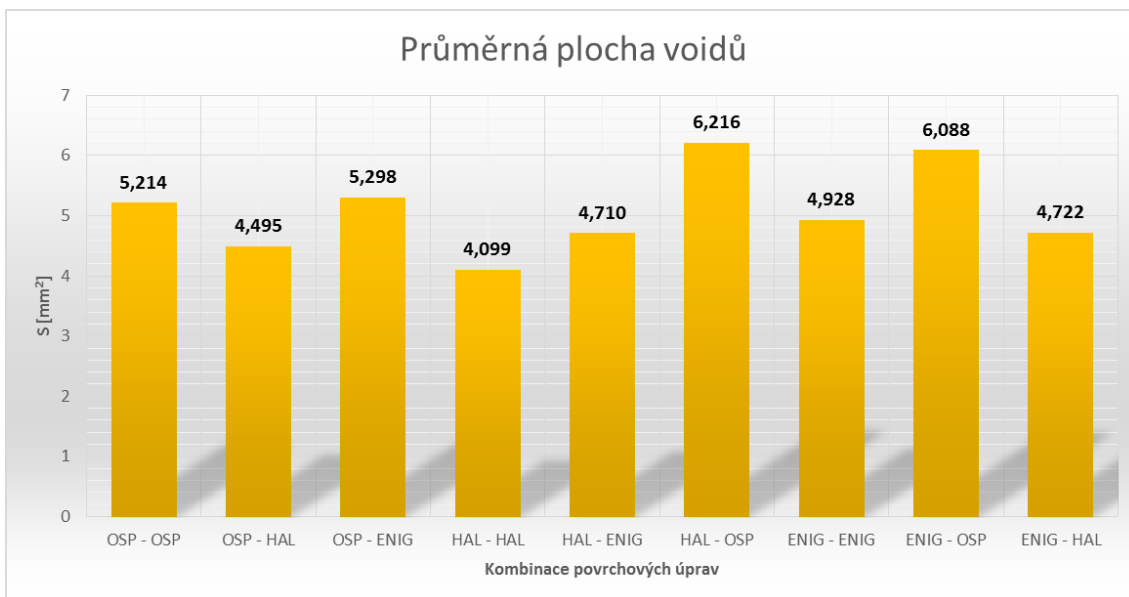
Graf 4 – Průměrný počet voidů v pájeném spoji pájecí pasty SnCu.



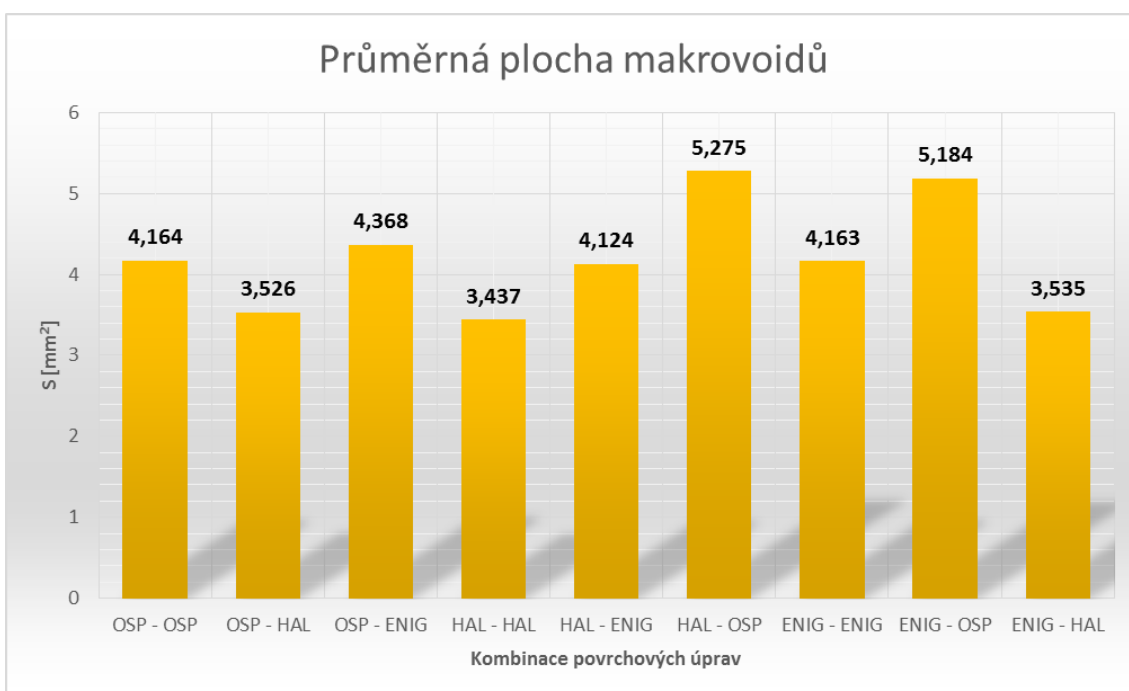
Graf 5 – Průměrný počet makrovoidů v pájeném spoji pájecí pasty SnCu.

Jak je patrné z grafů č. 4 a č. 5, největší průměrný počet voidů se vyskytuje u kombinace povrchových úprav ENIG – HAL a OSP – OSP. Oproti tomu jsme nejmenší voidovitost naměřili u kombinace HAL – ENIG a HAL – HAL. U průměrného počtu makrovoidů obsahuje největší počet kombinace HAL – OSP a OSP – OSP. Naopak nejmenší výskyt makrovoidů má kombinace povrchových úprav HAL – HAL a HAL – ENIG. Z druhého grafu můžeme pozorovat, že při použití povrchové úpravy OSP je výskyt makrovoidů vyšší, což je nežádoucí díky jejich negativnímu vlivu na pájené spoje. Naopak HAL se ukazuje jako vhodná povrchová úprava pro snížení počtu voidů v pájeném spoji.

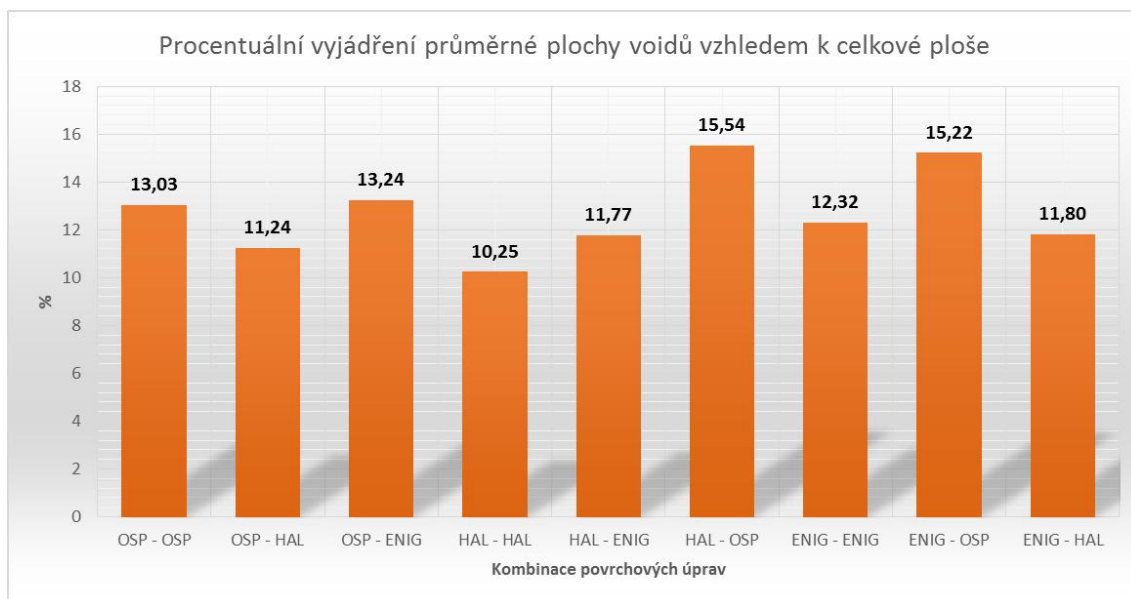
5.1.2. Plocha voidů v pájeném spoji



Graf 6 – Průměrná plocha voidů v pájeném spoji pájecí pasty SnCu.



Graf 7 – Průměrná plocha makrovoidů v pájeném spoji pájecí pasty SnCu.



Graf 8 – Procentuální vyjádření průměrné plochy voidů vzhledem k celkové ploše v pájeném spoji pájecí pasty SnCu.

Z grafů č. 6 a č. 7 lze vyčíst, že největší průměrná plocha voidů se vyskytuje u kombinace povrchových úprav HAL – OSP a ENIG – OSP. Oproti tomu nejmenší u kombinace HAL – HAL a HAL – OSP. U průměrné plochy makrovoidů dosahuje největší hodnoty kombinace HAL – OSP a ENIG – OSP. Naopak malou plochu mají makrovoidy u kombinace povrchových úprav HAL – HAL a OSP – HAL. Dále můžeme z grafu vyčíst, že při použití OSP povrchové úpravy je průměrná plocha voidů ve spoji mnohem vyšší, než u ostatních.

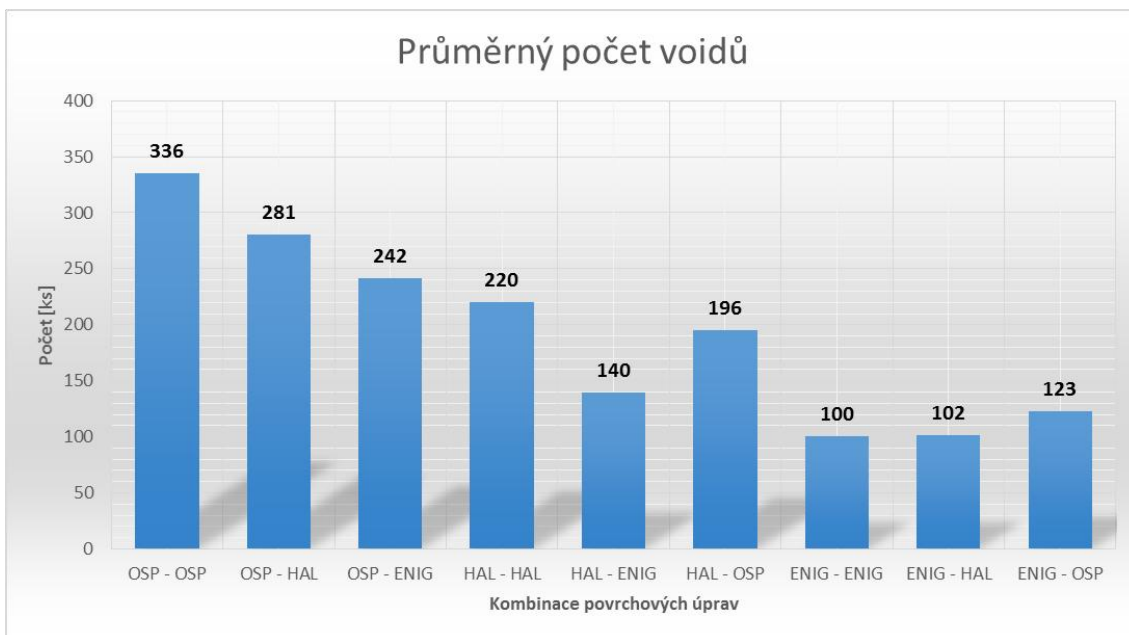
5.2. Pájecí pasta SnBi

Naměřené hodnoty nám ukazuje následující tabulka č. 10.

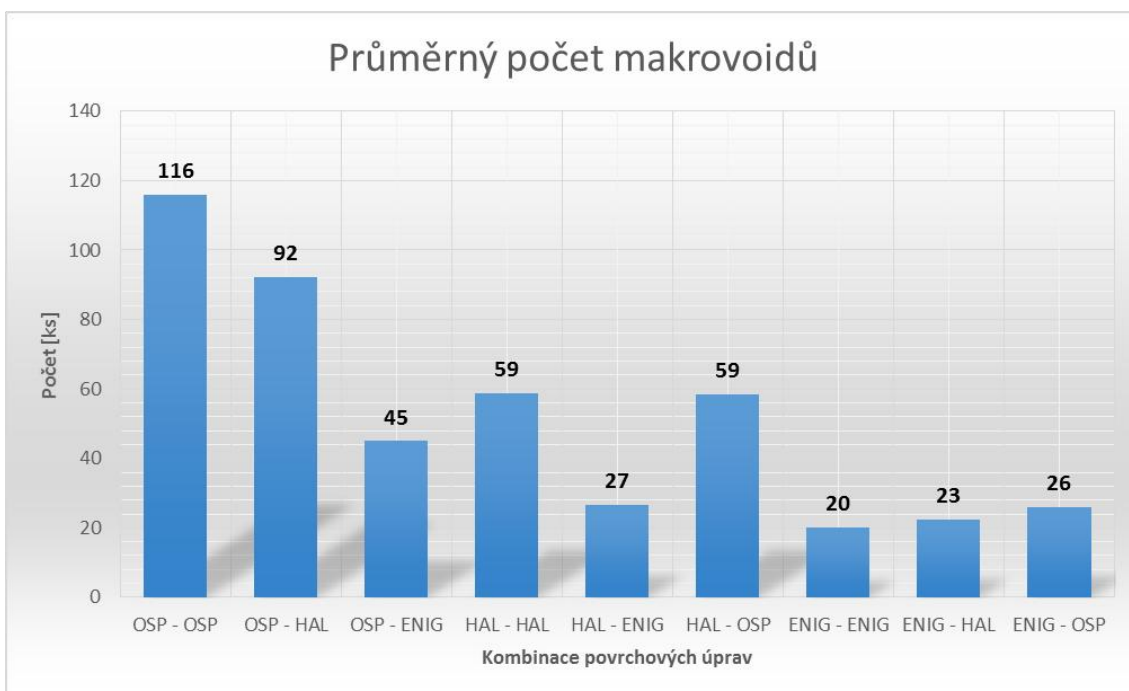
Kombinace povrchových úprav	Průměrný počet voidů [ks]	Průměrná plocha voidů [mm ²]	Voidovitost vzhledem k celkové ploše [%]	Průměrný počet makrovoidů [ks]	Průměrná plocha makrovoidů [mm ²]	Makrovoidovitost vzhledem k celkové ploše [%]
OSP - OSP	336	3,502	8,75	116	2,671	6,68
OSP - HAL	281	2,609	6,52	92	1,888	4,72
OSP - ENIG	242	1,744	4,36	45	1,072	2,68
HAL - HAL	220	1,816	4,54	59	1,217	3,04
HAL - ENIG	140	0,661	1,65	27	0,525	1,31
HAL - OSP	196	1,932	4,83	59	1,428	3,57
ENIG - ENIG	100	0,661	1,65	20	0,397	0,99
ENIG - HAL	102	0,709	1,77	23	0,437	1,09
ENIG - OSP	123	0,962	2,40	26	0,616	1,54

Tabulka 10 – Naměřené hodnoty pro pájecí pastu SnBi.

5.2.1. Četnost voidů v pájeném spoji



Graf 9 – Průměrný počet voidů v pájeném spoji pájecí pasty SnBi.

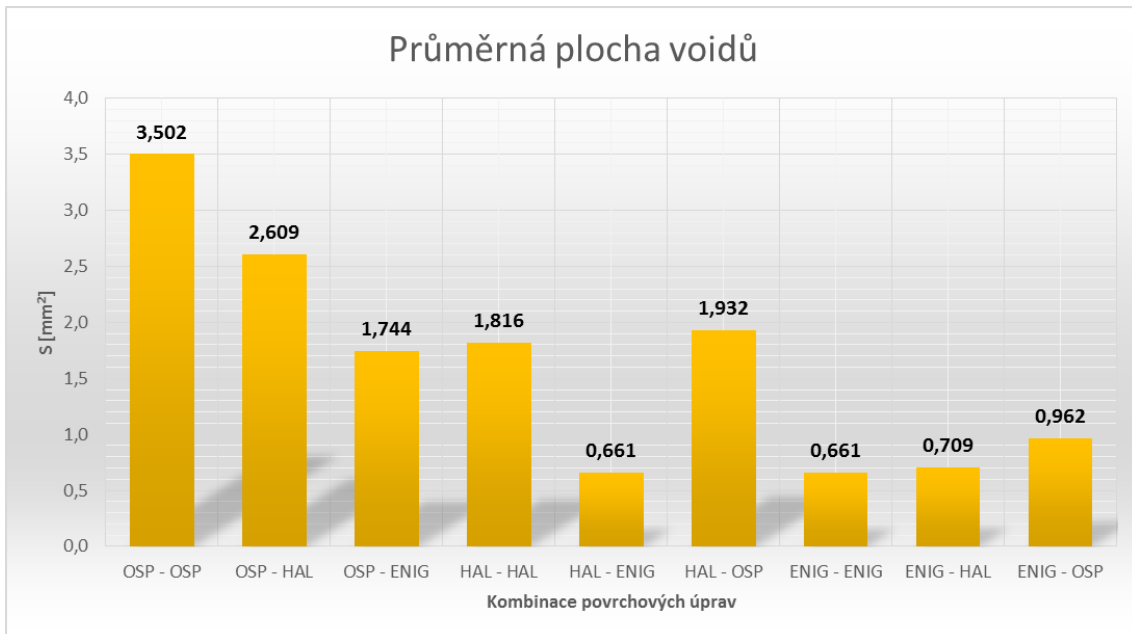


Graf 10 – Průměrný počet makrovoidů v pájeném spoji pájecí pasty SnBi.

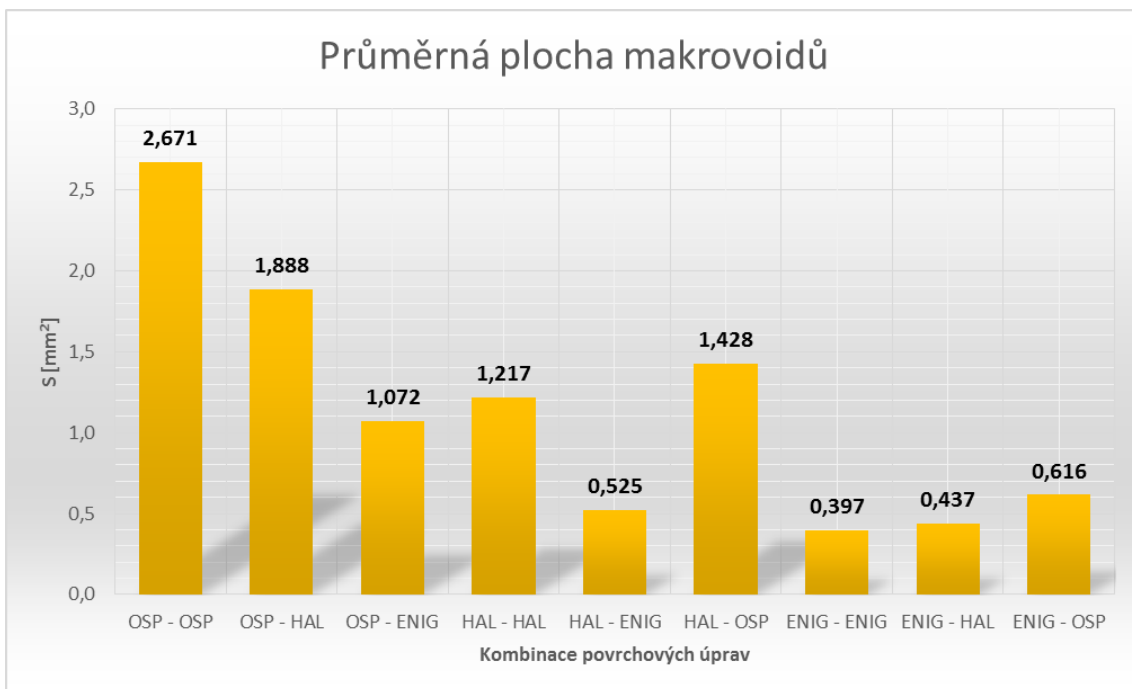
Jak je patrné z grafů č. 9 a č. 10, největší průměrný počet voidů u této pájecí pasty se vyskytuje u kombinace povrchových úprav OSP – OSP a OSP – HAL. Oproti tomu byl nejmenší počet naměřen u kombinace ENIG – ENIG a ENIG – HAL. U průměrného počtu makrovoidů je výsledek největší i nejmenší četnosti stejný jako u celkového průměrného počtu. Můžeme zde tedy pozorovat, že při použití povrchové úpravy OSP je výskyt voidů (makrovoidů) mnohonásobně vyšší,

což je nežádoucí. Naopak HAL a ENIG se ukazují jako poměrně vhodné povrchové úprava pro tuto pájecí pastu.

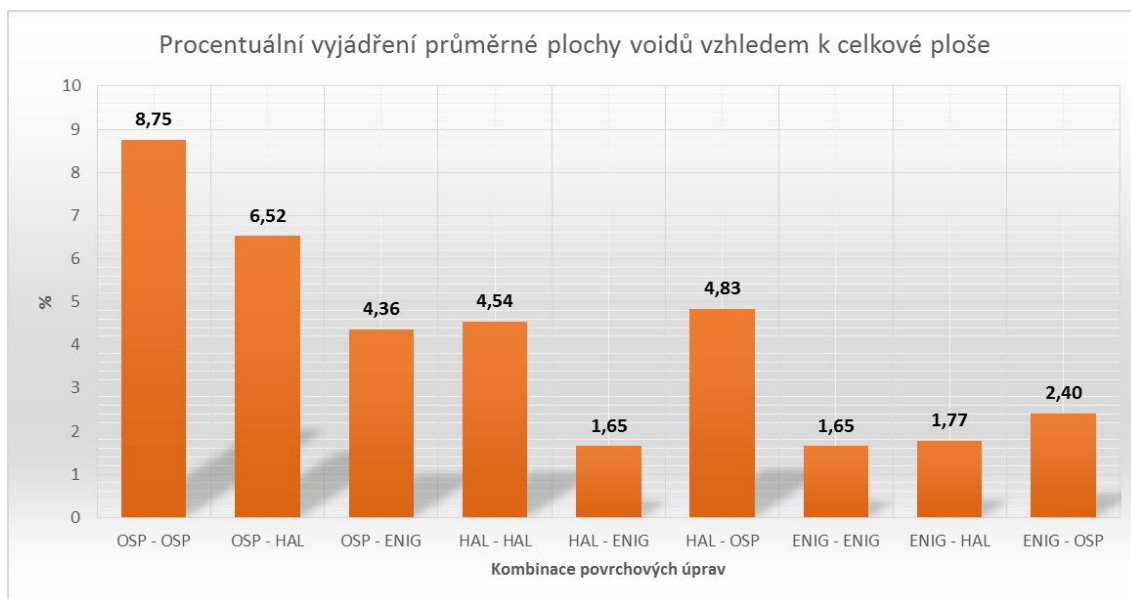
5.2.2. Plocha voidů v pájeném spoji



Graf 11 – Průměrná plocha voidů v pájeném spoji pájecí pasty SnBi.



Graf 12 – Průměrná plocha makrovoidů v pájeném spoji pájecí pasty SnBi.



Graf 13 – Procentuální vyjádření průměrné plochy voidů vzhledem k celkové ploše v pájeném spoji pájecí pasty SnBi.

Z grafů č. 11 a č. 12 je patrné, že největší průměrná plocha voidů se vyskytuje u kombinace povrchových úprav OSP – OSP a OSP – HAL. Oproti tomu nejmenší u kombinace ENIG – ENIG a ENIG – HAL. U průměrné plochy makrovoidů jsou poměrově výsledky obdobné jako u celkové plochy. Z grafu lze také vyčíst, že při použití OSP povrchové úpravy je průměrná plocha voidů ve spoji mnohem vyšší, než u ostatních.

5.3. Porovnání výsledků pájecích past

Porovnávat výsledky pájecích past budeme na základě průměrného počtu voidů v pájeném spoji a jejich průměrnou plochou. Při použití pájecí pasty typu SnCu je u většiny kombinací povrchových úprav více než jeden a půl násobně vyšší voidovitost, než u SnBi pájecí pasty. Výjimku tvoří kombinace OSP – OSP, která je srovnatelná. Obdobný výsledek jsme získali i při vyhodnocování průměrné plochy voidů.

Rozdíl mezi pájecí pastou SnCu a SnBi z pohledu četnosti voidů může být způsoben především rozdílnou hodnotou povrchového napětí. Povrchové napětí pro použitou pájecí slitinu SnCu (povrchové napětí Sn99,3/Cu0,7 – 493 mN/m [20]) je více než jeden a půl krát vyšší, oproti použití pájecí slitiny SnBi (povrchové napětí Sn42/Bi58 – 300 mN/m [21]).

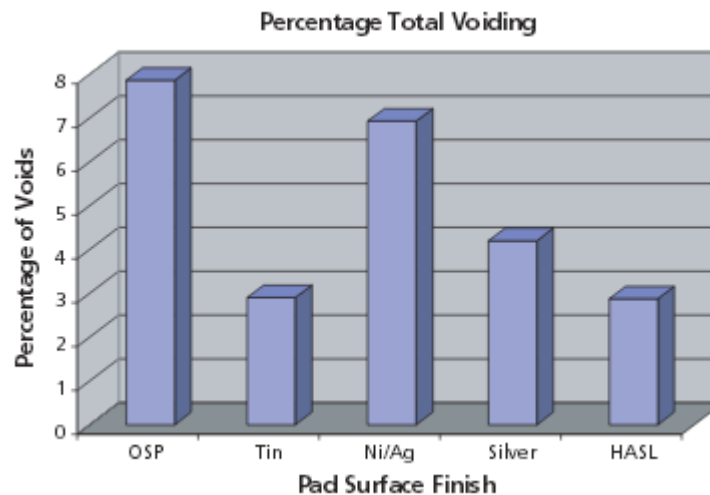
5.4. Porovnání výsledků povrchových úprav

Výsledky povrchových úprav budeme vyhodnocovat ze dvou pohledů. Jestli se jedná o podkladovou destičku nebo protikus simulující čip.

Nejprve zhodnotíme povrchové úpravy na podkladové destičce. U pájecí pasty typu SnCu má nejlepší výsledky povrchová úprava HAL, následuje ENIG a nejhorší výsledky má OSP. U druhé pájecí pasty vychází nejlépe ENIG, dále HAL a opět nejhůře OSP.

U protikusu nám vychází u pájecí pasty typu SnCu opět nejlépe povrchová úprava HAL, následně ENIG a OSP. U SnBi pájecí pasty ENIG, HAL a OSP. Výsledky jsou tedy obdobné pro podkladovou destičku i pro protikus.

Naše výsledky dále porovnáme s následujícím grafem č. 14 z podobného zahraničního výzkumu. Je z něj patrné, že naše výsledky jsou pro zkoumané povrchové úpravy obdobné.



Graf 14 – Procentuální vyjádření průměrné plochy voidů vzhledem k celkové ploše v pájeném spoji [18].

Dalším faktorem ovlivňujícím vznik voidů v pájených spojích vzhledem k povrchové úpravě jsou intermetalické sloučeniny. Při jejich tvorbě v pájeném spoji a na rozhraní pájecí ploška/pájený spoj dochází ke změně složení vlastní pájecí slitiny.

Závěr

Cílem této práce bylo zhodnocení vlivu povrchových úprav na vznik voidů v pájených spojích. K zapájení spojů jsme použili dvě bezolovnaté pájecí pasty s různým složením.

K analýze vzorků jsme použili RTG diagnostiku a následně jsme provedli obrazovou analýzu pořízených snímků pájených spojů, která umožnila sumarizaci voidů v jednotlivých vzorcích.

Z analýzy vyplývá, že při použití povrchové úpravy OSP je četnost i plocha voidů v pájeném spoji vyšší než u ostatních povrchových úprav, bez ohledu na použitou pájecí pastu, či zda se jedná o podkladovou desku nebo protikus.

Oproti tomu HAL se jeví jako vhodnější pro použití při pájení pájecí pastou SnCu. Povrchová úprava ENIG ukazuje menší voidovitost pro pájecí pastu SnBi. Důvodem rozdílných výsledků zde mohou být vznikající intermetalické sloučeniny nebo teplotní profil pájecí pasty, či oba faktory zároveň. Dalším faktorem ovlivňujícím četnost voidů v pájeném spoji je povrchové napětí pájecí slitiny, kdy použitá pájecí slitina SnCu má více než jeden a půl krát vyšší povrchové napětí, oproti pájecí slitině SnBi.

Dále z analýzy plyne, že převážou část voidů, které vznikly ve vzorcích, lze klasifikovat jako makrovoidy. Ty jsou též nazývány „procesními“ voidy a vznikají reakcí tavidla, rozpouštědla a jiných látek během procesu pájení.

Z výsledků lze konstatovat, že použití různých povrchových úprav má značný vliv na voidovitost v pájených spojích. Je tedy nutné pro různé aplikace hledat vždy optimální řešení.

Do budoucna bych se chtěl zabývat testováním voidovitosti s ohledem na míru oxidace pájecích plošek.

Seznam použité literatury

- [1] RUŽA, Viliam. *Pájení*. 2. uprav. a dopln. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit., 1988, 452 s.
- [2] PIETRIKOVÁ, Alena, Juraj ĎURIŠIN a Pavel MACH. *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike*. 1. vydanie. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.
- [3] ABEL, Martin a Vladimír CIMBUREK. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. Vyd. 1. Pardubice: ABE.TEC, 2005, 179 s. ISBN 80-903-5970-1.
- [4] ABEL, Martin. *SMT Technologie povrchové montáže*. Vyd. 1. Pardubice: Platan, 2000, 246 s. ISBN 8090273319.
- [5] Pájecí slitiny. *Coptel* [online]. 1.6.2010 [cit. 2015-11-05]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=6096>
- [6] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 440 s. ISBN 80-010-2392-3.
- [7] MĚKKÉ PÁJENÍ V ELEKTRONICE. *Laboratorní cvičení předmětu A1B13VST* [online]. Praha: ČVUT, 2012, 7.3.2012 [cit. 2015-11-09]. Dostupné z: http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13TEP_soubory/uloha_2.pdf
- [8] J. Podzemský, J. Urbánek, K. Dušek. *Obrazová analýza povrchu bezolovnaté povrchové úpravy zaměřená na indikaci cínových whiskerů*. *Electroscope*. 2011, č. 1. 2011 March 21:6 s.
- [9] DPS. *DPS Elektronika od A do Z*. [online]. 1/2012 [cit. 2015-12-29]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:6930/reseni-problemu-s-cookson-electronics-cinove-mustky>
- [10] Metallic Resources. *Thombstoning*. [online]. 2012 [cit. 2015-12-29]. Dostupné z: <http://metallicrosources.com/documents/Tombstoning%20explained.pdf>
- [11] INDIUM. *Voids in solder joints*. [online]. 26.3.2010 [cit. 2015-12-29]. Dostupné z: <http://www.indium.com/blog/voids-in-solder-joints-i.php>
- [12] ASPANDIAR RF. *Voids in solder joints*. *SMTA Journal*. 2006;19(4).
- [13] *Buletin Anotací* [online]. Brno, 21.10.2014, **2014**(10) [cit. 2015-12-30]. ISSN 1211-6947.
- [14] Rollback the Lead-Free Initiative. *Signal Consulting*. [online]. [cit. 2015-12-30]. Dostupné z: http://www.sigcon.com/Pubs/news/10_01.htm
- [15] Ultra High-Resolution Nanofocus X-ray Inspection System – GE's Phoenix nanomex. *GE OIL & GAS*. [online]. 17.3.2016 [cit. 2016-03-17]. Dostupné z: <https://www.gemeasurement.com/inspection-ndt/radiography-and-computed-tomography/phoenix-nanomex>

- [16] Prototypové pracoviště (K13113.labrework). *WIKI.ORG*. [online]. 17.3.2016 [cit. 2016-03-17]. Dostupné z:<http://technology.feld.cvut.cz:8080/xwiki/bin/view/K13113/labrework?xpage=print&language=cs>
- [17] OSP (Organic Solderability Preservative). *Shikoku*. [online]. 29.3.2016 [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <https://www.shikoku.co.jp/eng/products/osp.html>
- [18] Technology. *Nordson*. [online]. 31.3.2016 [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: http://www.nordson-at.com/technology/up_img/1428030800-639538.pdf
- [19] ANSI J-STD-005. *Requirements for Soldering Pastes*.1995.
- [20] Wave Soldering Process. *Alphametals*. [online]. [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: http://www.alphametals.co.kr/cgi/main.cgi/CEAM_Lead_Free_Process_-_wave_19-4.pdf?down_num=1124901156&board=data_TECHNICAL&command=down_load&d=&filename=CEAM_Lead_Free_Process_-_wave_19-4.pdf
- [21] Database for Solder Properties with Emphasis on New Lead-free Solders . *Properties of Lead-Free Solders*. [online]. 11.2.2002 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: http://www.msed.nist.gov/solder/NIST_LeadfreeSolder_v4.pdf
- [22] Pasta pro bezolovnaté pájení Sn/Cu 500g. *HotAir*. [online]. [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: <http://www.hotair.cz/detail/pasty-ciny-lepidla/cinove-pasty/pasta-pro-bezolovnate-pajeni-sn-cu-500g.html>
- [23] Senju low temperature solder paste L20-SSG-010-42-10 (FIG). *However, Shenzhen City Extension Technology Co., Ltd.*. [online]. 3.4.2016 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: <http://x110158474.cn.makepolo.com/product/100045147658.html>

Seznam obrázků

Obr. 1 – Zjednodušené rozložení vrstev v mikrostruktuře pájeného spoje [1].....	10
Obr. 2 – Součástky povrchové montáže a) vývodové b) bezvývodové [2].	12
Obr. 3 – Montáž součástky do předvrtaných otvorů [2].	12
Obr. 4 – Detail pájecího hrotu při pájení [3].	14
Obr. 5 – Vznik pájeného spoje, krápníků a omezení závoje [3].	15
Obr. 6 – Jednotlivé operace strojního pájení [3].	16
Obr. 7 – Schéma složení pájecí pasty [3].	17
Obr. 8 – Povrchová úprava pájecí plošky DPS [2].	21
Obr. 9 – Cínové whiskery [14].	30
Obr. 10 – Cínové můstky [9].	30
Obr. 11 – Tombstone efekt [10].	31
Obr. 12 – Rozmístění voidů v pájeném spoji [11].	32
Obr. 13 – Makrovoidy [12].	32
Obr. 14 – Mikrovoidy [12].	33
Obr. 15 – Shrinkage voidy [12].	33
Obr. 16 – Mikro-via voidy [12].	33
Obr. 17 – Kirkedallový voidy způsobené elektromigrací [13].	34
Obr. 18 – Pinhole voidy [12].	34
Obr. 19 – Obrázek Gerberových dat pro výrobu.	35
Obr. 21 – Opravárenské pracoviště BIP 7000 [16].	36
Obr. 22 – Přetavovací pec Mistral 260 [16].	37
Obr. 23 – GE PHOENIX X-RAY NANOMEX 180T [15].	39
Obr. 24 – Snímek z RTG zařízení.	39
Obr. 25 – Označené voidy v pájeném spoji.....	40

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Rozdělení pájecích past dle ANSI J-STD-005 [19].	18
Tabulka 2 – Nejčastěji používané povrchové úpravy [2].	21
Tabulka 3 – Porovnání vlastností rozdílných typů povrchových úprav DPS [2].	23
Tabulka 4 – Klasifikace tavidel podle DIN EN 61190-1-1 [2].	27
Tabulka 5 – Klasifikace tavidel podle EN 9454-1 [3].	28
Tabulka 6 – Parametry použitých pájecích past [22], [23].	36
Tabulka 7 – Nastavení teplotních zón pece pro pájecí pastu typu SnCu.	37
Tabulka 8 – Nastavení teplotních zón pece pro pájecí pastu typu SnBi.	38
Tabulka 9 – Naměřené hodnoty pro pájecí pastu SnCu.	41
Tabulka 10 – Naměřené hodnoty pro pájecí pastu SnBi.	44

Seznam grafů

Graf 1 – Poměrné zastoupení povrchových úprav DPS [2].	24
Graf 2 – Použitý teplotní profil pro pájecí pastu SnCu.	37
Graf 3 – Použitý teplotní profil pro pájecí pastu SnBi.	38
Graf 4 – Průměrný počet voidů v pájeném spoji pájecí pasty SnCu.	41
Graf 5 – Průměrný počet makrovoidů v pájeném spoji pájecí pasty SnCu.	42
Graf 6 – Průměrná plocha voidů v pájeném spoji pájecí pasty SnCu.	43
Graf 7 – Průměrná plocha makrovoidů v pájeném spoji pájecí pasty SnCu.	43
Graf 8 – Procentuální vyjádření průměrné plochy voidů vzhledem k celkové ploše v pájeném spoji pájecí pasty SnCu.	44
Graf 9 – Průměrný počet voidů v pájeném spoji pájecí pasty SnBi.	45
Graf 10 – Průměrný počet makrovoidů v pájeném spoji pájecí pasty SnBi.	45
Graf 11 – Průměrná plocha voidů v pájeném spoji pájecí pasty SnBi.	46
Graf 12 – Průměrná plocha makrovoidů v pájeném spoji pájecí pasty SnBi.	46
Graf 13 – Procentuální vyjádření průměrné plochy voidů vzhledem k celkové ploše v pájeném spoji pájecí pasty SnBi.	47
Graf 14 – Procentuální vyjádření průměrné plochy voidů vzhledem k celkové ploše v pájeném spoji [18].	48

Seznam použitých zkratek

DPS	Deska plošného spoje
SMD	Součástka pro povrchovou montáž
THD	Součástka s drátovými vývody
T	Teplota
t	Čas
UV	Ultrafialové záření
S	Povrch
ENIG	Typ povrchové úpravy (Electroless nickel immersion gold)
OSP	Typ povrchové úpravy (Organic Surface Protectives)
HASL (HAL)	Typ povrchové úpravy (Hot Air Solder Leveling)
RTG	Rentgenové záření

Přílohy

Příloha 1. – Makro použité pro označení voidů v pájených spojích v programu NIS Elements BR 3.10.

```
// Vyčistí binární stopu z přechozí operace  
ClearBinary();  
  
// Otevření Binary Editoru  
ImageEdit();  
  
// Po ukončení Binary Editoru převede binární stopu do ROI  
BinaryToMask();  
  
// Uloží původní obrázek do reference  
ColorToReference();  
  
// Detekce vrcholků + její parametry  
DetectPeaks(16,3,0,1,1,0);  
  
// Zapnutí Auto Scale LUTs  
LUTs_KeepAutoScale(1);  
  
// Nastavení Define Threshold  
DefineThresholdMethod(3);  
DefineThresholdIntensity(16,255,0);  
DefineThresholdProcessing(2,5,2);  
DefineThresholdRestrictionSize(0,0.000000,1130.000000);  
DefineThresholdRestrictionCircularity(1,0.340000,1.000000);  
  
// Provedení prahování  
Threshold();  
  
// Vrácení původního nezničeného obrázku  
ColorFromReference();
```

// Zapnutí Binary Editoru k opravení změn

ImageEdit();

Příloha 2. – CD s podklady k této bakalářské práci.