

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

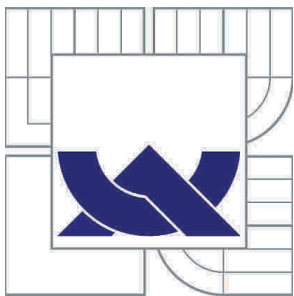
PREDIKCE SPOLEHLIVOSTI PÁJENÉHO SPOJE

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

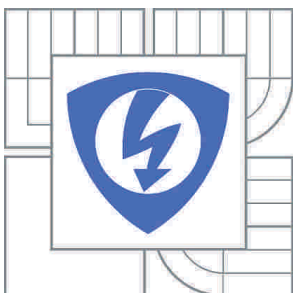
Ing. PETR STEJSKAL

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

PREDIKCE SPOLEHLIVOSTI PÁJENÉHO SPOJE

SOLDER JOINT RELIABILITY PREDICTION

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. PETR STEJSKAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JIŘÍ KAZELLE, CSc.

BRNO 2014

ABSTRAKT

Práce rozebírá problematiku spolehlivosti pájených spojů a jejich diagnostiky. Ačkoliv jsou současné výrobní postupy a technologie na vysoké úrovni, stále vysoký počet elektrotechnických zařízení ukončí svůj funkční život v důsledku selhání pájeného spoje. Předmětem výzkumu je tedy studium procesů, které se odehrávají v pájeném spoji v průběhu pájení i po zapájení. Za tímto účelem bylo použito několik diagnostických metod. Jako perspektivní (advanced) se ukázala metoda měření šumu v pájených spojích. Na základě získaných poznatků a pochopení probíhajících procesů lze predikovat spolehlivost pájeného spoje.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pájený spoj, intermetalická vrstva, spolehlivost, predikce.

ABSTRACT

The thesis deals issue of the solder joint reliability and diagnostics. The manufacturing technology of electronics currently features a very high level of perfection. A large number of electrical devices ends its functional life due to solder joint failure. The objective of presented research consists studies of processes taking place in the solder joint due to soldering and after soldering. To this end, I will employ several methods of diagnostics. Noise based methods of solder joint measurement was evaluated. Based on a detailed study and understanding of processes it can be solder joint reliability predicted.

KEY WORDS

Solder joint, intermetallic layer, reliability, prediction.

STEJSKAL, P. *Predikce spolehlivosti pájeného spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 10 s. Vedoucí dizertační práce: prof. ing. Jiří Kazelle, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou dizertační práci na téma „Predikce spolehlivosti pájeného spoje“ jsem vypracoval samostatně pod vedením školitele a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené dizertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této dizertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 5. 9. 2014

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu dizertační práce prof. ing. Jiřímu Kazellemu, CSc. a ing. Jiřímu Starému, PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc při zpracování mé dizertační práce.

V Brně dne: 5. 9. 2014

.....

(podpis autora)

OBSAH

Obsah	vi
Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xi
Úvod	1
1 Cíle dizertace	3
2 Úvod do problematiky	4
2.1 Princip pájení	4
2.1.1 Difuze.....	4
2.1.2 Intermetalické sloučeniny a jejich vlastnosti	6
2.1.3 Tvorba dutin.....	8
2.1.4 Smáčení a roztékání pájky	9
2.1.5 Způsoby hromadného pájení.....	11
2.2 Materiálový systém.....	13
2.2.1 Povrchové úpravy DPS a komponentů	14
2.2.2 Pájecí slitiny.....	22
2.3 Požadavky na pájený spoj.....	24
2.4 Defekty pájených spojů	24
2.4.1 Přehled defektů po pájení přetavením	24
2.4.2 Defekty způsobené špatnou pájitelností	30
2.4.3 Defekty způsobené únavou pájeného spoje	32
3 Dosavadní vývoj v oblasti testování pájených spojů	34
3.1 Experimentální zkoušky	34
3.1.1 Zkouška odolnosti proti odtržení	35
3.1.2 Zkouška pevnosti ve smyku.....	35
3.1.3 Zkouška cyklickým padáním	37
3.1.4 Zkouška cyklickým ohybem.....	37
3.1.5 Vibrační zkoušky	37

3.1.6	Zkouška teplotním cyklováním a vlhkostí.....	37
3.1.7	Zkoušky solnou mlhou.....	38
3.1.8	Zkoušky chladem.....	38
3.2	Únavové modely.....	38
4	Použité experimentální metody studia pájených spojů	41
4.1	Měření a výpočet smáčecího úhlu.....	41
4.1.1	Popis měřených vzorků.....	41
4.1.2	Výběr měřicí metody.....	42
4.1.3	Příprava a průběh experimentu.....	45
4.1.4	Výsledky.....	47
4.2	Měření tloušťky intermetalické vrstvy po izotermálním stárnutí.....	48
4.2.1	Popis měřených vzorků.....	48
4.2.2	Metodika měření.....	49
4.2.3	Příprava a průběh experimentu.....	49
	Příprava metalografického výbrusu.....	51
4.2.4	Výsledky měření.....	53
4.3	Zjišťování přítomnosti a velikosti dutin.....	55
4.4	Měření změn šumu v pájených spojích.....	56
4.4.1	Popis měřených vzorků.....	59
4.4.2	Metodika měření.....	59
4.4.3	Příprava a průběh experimentu.....	60
4.4.4	Výsledky měření.....	62
4.5	Měření nelinearity pájených spojů.....	66
4.5.1	Popis průběhu experimentu.....	66
4.5.2	Výsledky měření.....	67
5	Závěry a přínosy dizertační práce	68
	Použitá literatura	71
	Autorské publikace	74
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	75
	Životopis	77
	Seznam příloh	80

A	Návrh DPS použité v experimentu	81
A.1	Deska plošného spoje - návrh	81
A.2	Deska plošného spoje – foto	82

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1	Rozdělení pájení podle teploty tavení použité pájky.	4
Obrázek 2.2	Vliv teploty a času na celkovou tloušťku intermetalické vrstvy [3].	7
Obrázek 2.3	Znázornění dobře a špatně smáčivého povrchu [25].	10
Obrázek 2.4	Zobrazení procesu smáčení [37].	11
Obrázek 2.5	Rozdělení hromadného pájení podle způsobu.	12
Obrázek 2.6	Teplotní profil pro pájení přetavením bezolovnatou pájecí pastou [36].	13
Obrázek 2.7	Schéma materiálového systému.	14
Obrázek 2.8	Vlevo je metalografický výbrus spoje pájeného olovnatou a vpravo bezolovnatou pájkou [35].	16
Obrázek 2.9	Vlevo je metalografický výbrus spoje pájeného olovnatou a vpravo bezolovnatou pájkou [35].	17
Obrázek 2.10	Cínový whisker, 6000x [35].	18
Obrázek 2.11	Vlevo je metalografický výbrus standardní vrstvy niklu, vpravo je výbrus defektní vrstvy [35].	20
Obrázek 2.12	Zkrat vytvořený chybou v procesu [39].	25
Obrázek 2.13	Zkrat vytvořený chybou v procesu.	25
Obrázek 2.14	Spoj pájený s příliš dlouhým předeřevem [39].	26
Obrázek 2.15	Spoj pájený 2 dny po tisku pájecí pasty [39].	26
Obrázek 2.16	Kuličky pájky v okolí pájeného spoje.	27
Obrázek 2.17	Dutiny v pájeném spoji.	28
Obrázek 2.18	Komponenty, jejichž pouzdra nevydržela teplotní namáhání.	28
Obrázek 2.19	Zlomený komponent [39].	29
Obrázek 2.20	Kuličky po stranách čipových součástek [39].	30
Obrázek 2.21	Odvzlínání pájky, vývod typu J [39].	31
Obrázek 2.22	Zvednutá součástka [22].	31
Obrázek 2.23	Špatné smáčení [39].	32
Obrázek 2.24	Zlomený spoj [39].	33
Obrázek 2.25	Oddělení spoje od pájené plochy [39].	33
Obrázek 3.1	Fotografie hrotu trhacího zařízení, před testem [11].	36
Obrázek 3.2	Případy výsledků zkoušky pevnosti ve smyku [12].	36

Obrázek 3.3	Schématické znázornění zkoušky cyklickým ohybem [11].	37
Obrázek 4.1	Průběh sil působících na testovaný vzorek [28].	42
Obrázek 4.2	Klasifikace smáčivosti povrchu dle křivky naměřené na meniskografu [27].	43
Obrázek 4.3	Zobrazení kulového vrchlíku pájky s kótami rozměrů dosazovaných do vztahu 4.3 [3].	45
Obrázek 4.4	Způsob měření průměru oblasti roztečení pájky.	47
Obrázek 4.5	Zkušební vzorek připájený na testovací pájecí plošce.	48
Obrázek 4.6	Fotografie šablony použité pro tisk pájecí pasty.	49
Obrázek 4.7	Blokový diagram průběhu experimentu.	51
Obrázek 4.8	Ukázka metalografického výbrusu zapájeného vzorku.	52
Obrázek 4.9	Pracoviště vybavené mikroskopy JENAPHOT 2000 (vlevo) a stereomikroskopem (vpravo).	53
Obrázek 4.10	Tloušťky IMC testovaných povrchových úprav a pájek.	54
Obrázek 4.11	Obrázek BGA kuličky po působení vysoké proudové hustoty.	55
Obrázek 4.12	Vlevo je řez pájeným spojem bezprostředně po pájení, dále pak po 240 hod. a po 720 hod stárnutí při 125°C, pájka SAC 305.	56
Obrázek 4.13	Závislost vodivosti na frekvenci, měřeno se stárnutými vzorky [29].	57
Obrázek 4.14	Ukázka časové závislosti fluktuace napětí na rezistoru.	58
Obrázek 4.15	Spektrální hustota fluktuace šumového napětí na rezistoru.	59
Obrázek 4.16	Blokové schéma měřící aparatury.	60
Obrázek 4.17	Kontaktní pole, které bylo použito pro připojování vzorků do obvodu.	61
Obrázek 4.18	Fotografie měřící aparatury.	61
Obrázek 4.19	Blokový diagram přípravy vzorků.	62
Obrázek 4.20	Výsledky měření spektrální hustoty fluktuace šumového napětí v pájených spojích.	63
Obrázek 4.21	Výsledky měření SHFN, odečteno při 10 Hz.	64
Obrázek 4.22	Snímek vrstvy Cu ₃ Sn.	65
Obrázek 4.23	Výsledky měření SHFN.	65
Obrázek 4.24	Měřící aparatura pro testování linearity.	66
Obrázek 4.25	Graf závislosti U ₃ na U ₁ u jednotlivých vzorků.	67

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1	Porovnání vlastností intermetalických sloučenin cínu s mědí a cínu s niklem s mědí [4].	8
Tabulka 2.2	Proces realizace povrchové úpravy OSP [6].	16
Tabulka 2.3	Proces realizace povrchové úpravy imersním cínem [6].	18
Tabulka 2.4	Proces realizace povrchové úpravy ENIG [6].	19
Tabulka 2.5	Proces výroby povrchové úpravy HASL [6].	21
Tabulka 3.1	Únavové modely pro pájený spoj [15].	40
Tabulka 4.1	Výsledky měření tloušťky povrchové úpravy ENIG.	42
Tabulka 4.2	Výsledky měření tloušťky povrchové úpravy ImSn.	42
Tabulka 4.3	Použité přístroje a materiál.	46
Tabulka 4.4	Závěrečné výsledky měření smáčecích úhlů.	47
Tabulka 4.5	Průběh izotermálního stárnutí.	50
Tabulka 4.6	Použité přístroje a materiál.	50
Tabulka 4.7	Výsledky měření tloušťky intermetalických vrstev.	53
Tabulka 4.8	Směrodatné odchylky měření tloušťky IMC.	54
Tabulka 4.9	Použité přístroje a materiál.	62
Tabulka 4.10	Legenda ke grafu 4.19.	63
Tabulka 4.11	Tabulka odečtených hodnot SHFN a vypočtených hodnot odporu Rx.	64
Tabulka 4.12	Popis měřených vzorků	66
Tabulka 4.13	Výsledky měření nelinearity	67

ÚVOD

Pájené spoje jsou neoddělitelnou součástí všech elektrotechnických zařízení, která se v průběhu uplynulých sta let stala součástí každodenního života všech lidí. S rozvojem elektrotechniky se přirozeně rozvíjely také výrobní technologie, které bylo nutné optimalizovat pro hromadnou výrobu. Jde vlastně o analogii s rozvojem zemědělství i strojírenství, potažmo automobilového průmyslu, kde došlo poprvé k masové úspoře nákladů použitím výrobních linek.

Se zvyšující se složitostí elektrotechnických sestav bylo nutné vyrobit jednotlivé bloky zařízení, které se při montáži vzájemně propojí, to vedlo k rozvoji hromadné výroby desek plošných spojů. V návaznosti na hromadnou výrobu desek plošných spojů vyvstala nutnost zkonstruovat zařízení na hromadné pájení, to vedlo k vývoji strojního pájení vlnou. A konečně s rozvojem elektrotechniky a číslicově řízených osazovacích strojů došlo k prudkému rozvoji technologie povrchové montáže součástek (Surface Mount Technology) a technologie pájení přetavením.

V posledním vývojovém stupni, jak je ostatně nyní ve společnosti zvykem, dochází ke změnám z důvodů snížení toxicity a negativního vlivu elektrotechnické výroby na životní prostředí.

Podobně jako v ostatních funkčních celcích je i v elektrotechnických zařízeních kladen důraz na spolehlivost všech jeho součástí, včetně základních, včetně pájených spojů. Problematika spolehlivosti pájených spojů začala být aktuální po vydání směrnice Evropské komise č. 2002/95/EC RoHS, která mimo jiné omezila používání olova v pájených spojích. Negativní důsledky tohoto omezení jsou popsány v kapitole 2.2.2 o pájecích slitinách. Pozitivním důsledkem je vyloučení olova z výrobního procesu a výrazné snížení zdravotních rizik pro zaměstnance v elektrotechnickém průmyslu.

Dalším zajímavým problémem bylo zvolení vhodných slitin pro pájení. To vyvolalo novou vlnu snahy o pochopení procesu pájení. Bylo vypracováno mnoho prací, které se zabývají vlastnostmi jednotlivých slitin, které vykazují vysokou spolehlivost a stálost v čase a zároveň neobsahují příliš vysoký podíl drahých kovů.

Dizertační práce se zabývá analýzou vzorků pájených spojů, tvořených bezolovnatou i olovnatou pájecí slitinou, které byly podrobeny izotermálnímu stárnutí. Při analýze byly změřeny tloušťky jednotlivých použitých povrchových úprav a smáčecí úhly jednotlivých pájecích slitin na těchto povrchových úpravách. Dále byly změřeny tloušťky intermetalických vrstev vzorků bezprostředně po pájení a následně po izotermálním stárnutí.

Každý pájený spoj by měl vykazovat časovou stálost všech svých parametrů. Pro spolehlivost elektrotechnické sestavy je důležité, aby byly všechny její části navrženy tak, aby nedošlo k jejich selhání ještě před koncem funkčního života celku. U pájeného spoje lze modelově ověřit jeho vlastnosti a predikovat spolehlivost například pomocí izotermálního stárnutí a následných trhacích zkoušek, popřípadě vytvořením matematického modelu. Vždy jde ale pouze o simulaci podmínek, obvykle pouze s některými typy namáhání.

Práce popisuje nalezení měřitelné veličiny, která by popisovala aktuální stav pájeného spoje a tím umožňovala predikovat jeho spolehlivost v budoucnosti.

1 CÍLE DIZERTACE

Smyslem mých prací započatých v roce 2007 bylo hlubší studium vzniku pájených spojů, různých vlivů na jejich spolehlivost, to vše v návaznosti na moji diplomovou práci „Mezioperační kontrola kvality v povrchové montáži součástek“ [17], kde jsou podrobně popsány defekty vznikající v povrchové montáži součástek.

Cílem dizertační práce bylo hlubší studium dějů, které se odehrávají při formování pájeného spoje, ale také materiálů, které se těchto dějů účastní. V průběhu studia dějů a postupného vstřebávání problematiky hromadného pájení se hlavním cílem stalo nalezení souvislosti mezi spolehlivostí, potažmo kvalitou pájeného spoje a nějakou veličinou, kterou lze nedestruktivně měřit přímo na pájeném spoji.

Dalším cílem dizertační práce je nalezení způsobu využití měřených dat pro predikci spolehlivosti pájeného spoje, dále pak nalezení úrovně, kdy lze považovat pájený spoj za nespolehlivý.

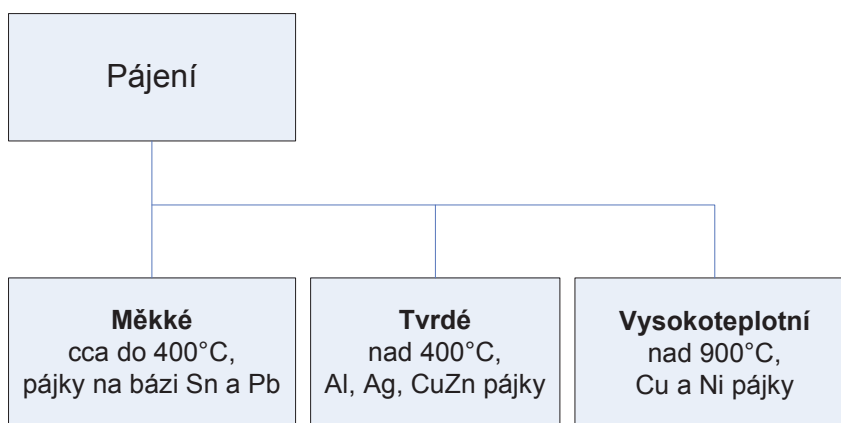
2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

V následujícím textu je rozebrána problematika měkkého pájení s ohledem na interagující materiály a fyzikální jevy, které probíhají při pájení. Pozornost bude věnována i slitinám a povrchovým úpravám pájených ploch, které se běžně používají při procesu pájení.

2.1 Princip pájení

Pájení je technika spojování kovů pomocí snadno tavitelných slitin, kdy nedochází ke změně struktury spojovaných kovů. Poprvé se pájelo již ve starověké Mezopotámii kolem roku 2000 před naším letopočtem. Od té doby došlo ke značnému posunu ve spektru použití pájení, ale i ke změně používaných materiálů.

Pájení se obecně dělí podle teploty tavení použité pájky na tvrdé a měkké (viz. Obr. 2.1).



Obrázek 2.1 Rozdělení pájení podle teploty tavení použité pájky.

V elektrotechnickém průmyslu se k výrobě elektrotechnických sestav používá výhradně měkké pájení. To je dáno zejména teplotní odolností součástek, ale i základního materiálu. Technologie pájení musí minimalizovat teplotní šok i dobu, kdy je elektrotechnická sestava vystavena teplotám nad 200°C. Převážně se používají pájky s teplotou tavení do 230°C.

2.1.1 Difuze

Roztavená pájecí slitina působí na pájecí plošku a její povrchovou úpravu jako agresivní rozpouštědlo, intermetalické sloučeniny tedy vznikají procesy rozpouštění tuhého kovu v tekuté pájecí slitině a difuzí.

Difuze je fyzikální proces, při kterém látky přecházejí z prostředí, kde mají vyšší koncentraci do prostředí s koncentrací nižší. Během difuzního procesu vzniká intermetalická (difuzní) vrstva.

Difuzní procesy v pevných kovech závisí zpravidla na typu a nepravidelnosti stavby krystalové mřížky. Součinitel difuze vzrůstá se zvyšováním hustoty poruch krystalové mřížky. Hustota vakancí a dislokací, velikost zrna a množství pružných deformací závisí na způsobu výroby kovu a na jeho mechanickém, tepelném popřípadě i chemickém opracování. S poruchami krystalické mřížky kovu souvisí i velikost součinitelů povrchové difuze, objemové difuze i difuze po hranicích zrn [1].

Obecně platí, že čím jsou nižší meziatomární síly difundujících prvků (tj. čím je vyšší teplota), klesá potřebná aktivační energie, naopak roste rychlost difuze.

Důležitým pojmem je koncentrační gradient, je motorem dějů na mezifázovém rozhraní. Koncentrační gradient je úměrný difuznímu toku tekuté pájky, která difunduje přes průřez A po dobu t ze strany s vyšší koncentrací do strany s nižší koncentrací [2].

Tloušťku difuzní vrstvy d v čase t můžeme vyjádřit z 2. Fickova zákona následujícím vztahem:

$$d = d_0 + \sqrt{Dt}, \quad (2.1)$$

kde d představuje tloušťku difuzní vrstvy v čase t , d_0 je tloušťka difuzní vrstvy po pájení, D je pak součinitel difuze.

Tloušťka vytvořené difuzní vrstvy je závislá jak na materiálech, které se pájení účastní, tak i na nastavení procesu pájení. Obecně lze říci, že zahřátím směsi dodáme do systému energii a to vede ke zvýšení rychlosti reakce. Vliv teploty na rychlost reakce popisuje Arrheinova rovnice [Arényova rovnice]:

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (2.2)$$

kde D_0 představuje difuzní koeficient, Q je aktivační energií růstu intermetalických sloučenin, R je univerzální plynová konstanta, $8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ a T je teplota v kelvinech.

$$d = d_0 + Dt^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (2.3)$$

kde d představuje tloušťku difuzní vrstvy v čase t , d_0 je tloušťka difuzní vrstvy po pájení, D je součinitel difuze, Q je aktivační energii růstu intermetalických sloučenin, R je univerzální plynová konstanta, $8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ a T je teplota v kelvinech.

Pro růst intermetalické vrstvy, který je způsobený difuzí na rozhraní SAC pájka – měděný povrch, se předpokládá časový exponent rychlosti růstu $n=0,5$. Rychlost růstu intermetalické vrstvy jako funkci T za konstantní dobu t lze vyjádřit jako:

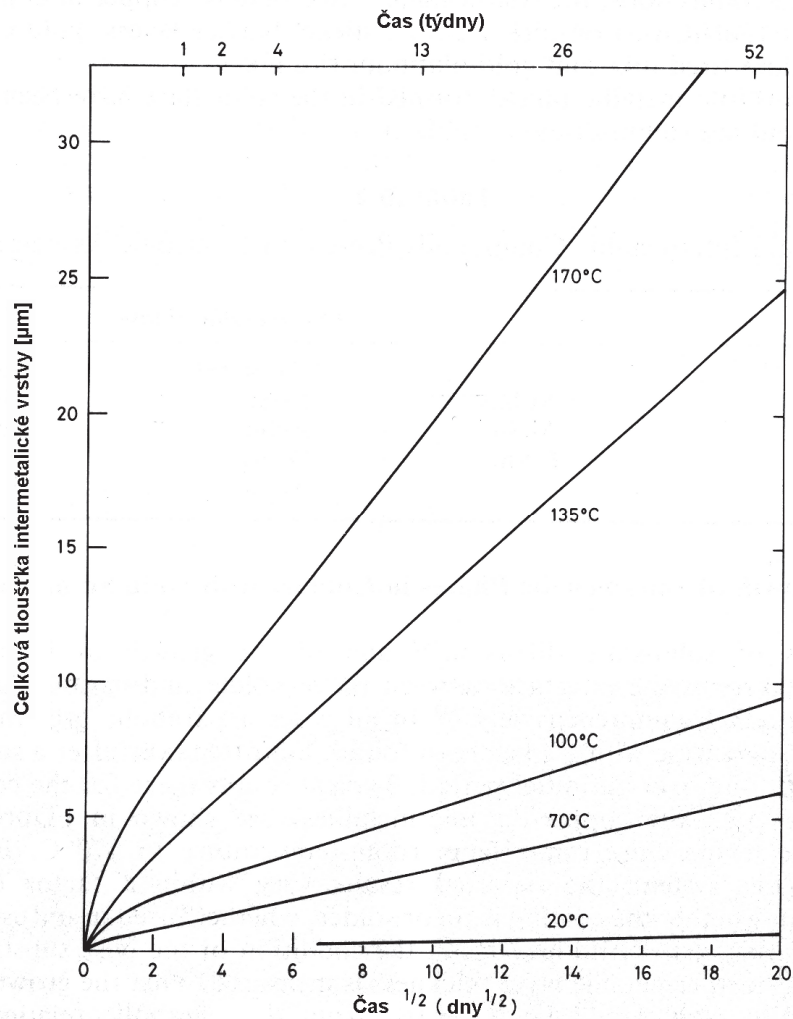
$$\ln[D] = \ln[D_0] + \left(+\frac{Q}{RT}\right), \quad (2.4)$$

kde D_0 představuje difuzní koeficient, Q je aktivační energii růstu intermetalických sloučenin, R je univerzální plynová konstanta, $8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ a T je teplota v kelvinech.

Z uvedené rovnice plyne, že čím déle je pájka nad teplotou tavení (čím déle probíhá pájení), tím je větší tloušťka vytvořené difuzní vrstvy. Sloučeniny, které obsahuje difuzní vrstva mají velký vliv na tepelnou vodivost, rezistivitu, křehkost, pevnost ve střihu a odolnost proti otřesům.

2.1.2 Intermetalické sloučeniny a jejich vlastnosti

V průběhu funkčního života pájeného spoje dochází k neustálému růstu difuzní (dále již intermetalické) vrstvy, zejména v závislosti na teplotě a čase (viz. Obr. 2.2), ale také proudové hustotě. V některých studiích, např. v [18] je popsáno “zmizení” tenkého měděného drátku z pájeného spoje, kdy po drátku vznikla dutina. Došlo k přesunu atomů mědi do pájky a vznikla intermetalická sloučenina Cu-Sn.



Obrázek 2.2 Vliv teploty a času na celkovou tloušťku intermetalické vrstvy [3].

V současné době se používají téměř výhradně bezolovnaté pájky, které jsou tvořeny z velké části cínem. Z tohoto důvodu jsou v tabulce 2.1 uvedeny pouze vlastnosti intermetalických sloučenin cínu s mědí a cínu s niklem v porovnání s mědí.

V pájeném spoji se tvoří intermetalické sloučeniny materiálů, které jsou při dané materiálové konfiguraci přítomny. Interagují zde materiály pájecí slitiny, povrchové úpravy a pájecí plošky, to je v elektrotechnice výhradně měď.

Tabulka 2.1 Porovnání vlastností intermetalických sloučenin cínu s mědí a cínu s niklem s mědí [4].

Vlastnost		Cu_6Sn_5	Cu_3Sn	Ni_3Sn_4	Cu
Tvrdość podle Vickerse	$\text{kg}\cdot\text{mm}^{-2}$	378 (+/- 55)	343 (+/- 47)	365 (+/- 7)	50
Mechanický charakter		Křehký	Křehký	Křehký	Kujný
Tepelná roztažnosť	ppm K^{-1}	16,3	19,0	13,7	16
Tepelná vodivost	$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$	34,1	70,4	19,6	385
Rezistivita	$\mu\Omega\cdot\text{cm}$	17,5	8,93	28,5	1,7
Hustota	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	8,3	8,9	8,65	8,9

Z tabulky je zřejmé, že kromě mechanického charakteru se Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn a Ni_3Sn_4 odlišují od mědi odlišují také v o řád nižší tepelné vodivosti a v téměř o řád vyšší rezistivitě. To jsou pro spolehlivost pájeného spoje kritické parametry, které by bylo elegantní nějak hromadně a nedestruktivně měřit v čase.

Při pájení bezolovnatými pájkami, které obsahují stříbro (SnAgCu) se vyskytuje intermetalická sloučenina Ag_3Sn . Obsah stříbra zlepšuje mechanické vlastnosti pájeného spoje. Studie [19] to vysvětluje tak, že částice Ag_3Sn jsou homogenně rozptýleny v pájce a jsou vázány na hranice zrn, to je důvod lepších mechanických vlastností proti pájkám Cu-Sn .

2.1.3 Tvorba dutin

S přechodem na bezolovnaté pájení se zvýšila tvorba dutin v pájených spojích. Následkem jejich zvýšené tvorby může docházet k problémům se spolehlivostí pájených spojů a tím i celého zařízení, zejména při tepelném namáhání nebo v případě, že zařízení bude vystaveno vibracím. Dutiny byly zaznamenány u všech typů spojů. Důvodů proč se dutiny u bezolovnatých pájek tvoří více než u olovnatých je několik [21]:

- větší povrchové napětí u bezolovnatých pájek,
- vyšší přetavovací teploty,
- snížená rychlost smáčení,
- použití agresivnějších tavidel.

Typy dutin v pájených spojích:

- makrodutiny,
- mikrodutiny.

Vznik makro dutin je způsoben těkavými složkami pájky, které se vypařují během pájení a které nejsou schopny z roztaveného kovu uniknout před jeho zatuhnutím. Zdrojem těchto látek jsou rozpouštědla a tavidla, která jsou přítomna v pájecí pastě, a jež mají zlepšovat vlastnosti pájky. Jak je uvedeno v [23] na vznik makrodutin dutin má vliv mnoho faktorů, z nichž nejvýznamnější je, jak vyplývá z mechanismu jejich vzniku, složení pájecí pasty a následně přetavovací profil.

Akceptovatelná velikost makro dutin ve spoji je sice určena, ale výrobci si případně mohou sami podle potřeby jejich vlastního výrobku určit jaké množství a velikost dutin je vhodné. Norma IPC-A-610D [22] udává že:

- akceptovatelné množství velikosti dutin je 25% objemu a méně,
- více než 25% velikosti je označeno jako defekt.

Zjišťování přítomnosti dutin ve spoji se provádí dvěma způsoby. První způsob je příčný řez, což je destruktivní metoda, kterou lze zjistit přítomnost dutin pouze přímo v konkrétní úrovni řezu. Druhou metodou je analýza spoje pomocí rentgenu, jenž nedestruktivně odhalí přítomnost dutin a zároveň lze pomocí příslušného programu spočítat jejich množství a určit velikost. S nejmodernějšími přístroji, které mají 3D zobrazování, je možné dutiny lokalizovat.

Mikrodutiny vznikají tak, že sousední fáze a sloučeniny, ve formujícím se pájeném spoji, mění svůj objem, některé rostou, jiné se zmenšují. Při tvorbě Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn je to způsobeno především tím, že je rychlost difuze mědi do, na cín bohaté, pájky mnohem rychlejší než difuze cínu do mědi. Kvůli nevyváženosti této reakce vznikají na rozhraní dutiny, tzv. Kirkendallovovy voidy. Ostatní dutiny vznikly plastickou deformací pájky [20]. Na mezifázovém rozhraní pájka – pájecí ploška probíhají mezifázové reakce i po ukončení pájení, avšak s výrazně vyšší časovou konstantou.

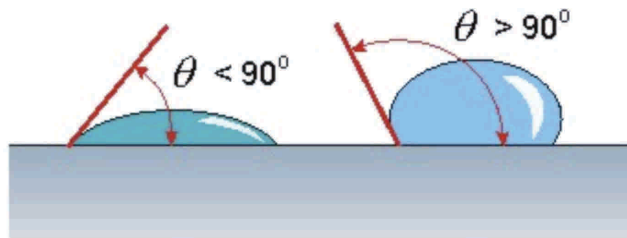
2.1.4 Smáčení a roztékání pájky

Smáčení je termín z dynamického chování kapalin. Dobré smáčení pájených povrchů tekutou pájkou je základem kvalitního pájeného spoje. „Smáčení tuhého povrchu pájecí plošky roztečenou pájkou probíhá pouze tehdy, je-li povrchová energie povrchu pájecí plošky vyšší než povrchová energie tekuté pájky.“ [2] Kdyby byla naopak vyšší povrchová energie tekuté pájky, pájka by se zformovala do koule, protože tak má nejnižší povrch. Z toho plyne, že pro úspěšné pájení je dobré znát povrchovou energii

pájených kovů.

Obecně lze smáčení popsat smáčecím úhlem (viz. obr. 2.3), který je měřitelný, popřípadě se dá vypočítat (viz. vztah 4.2 a 4.3) z objemu pájky a průměru oblasti, kde se roztekla pájka, popsáno v [3] a v [24]. Podle smáčecího úhlu lze povrchy dělit následovně:

- nesmáčivé, když je kontaktní úhel $\theta > 90^\circ$,
- smáčivé, když je kontaktní úhel $\theta < 90^\circ$,
- úplně smáčivý, když je kontaktní úhel $\theta = 0^\circ$.



Obrázek 2.3 Znárodnění dobře a špatně smáčivého povrchu [25].

V případě, že by byl povrch úplně smáčivý a kontaktní úhel $\theta = 0^\circ$, kapka vytvoří na povrchu tenký film, jehož tloušťka je funkcí mezifázové energie [5] a zároveň to značí, že je adhezní práce výrazně vyšší než kohezní práce.

Smáčení lze dělit ještě na:

- inertní smáčení, kdy kapalina smáčí pevnou látku, ale chemicky s ní nereaguje => nedojde k vytvoření difuzní vrstvy,
- reaktivní smáčení, kdy dojde k vytvoření mezifázového rozhraní, růstu difuzní vrstvy a pevnému spojení.

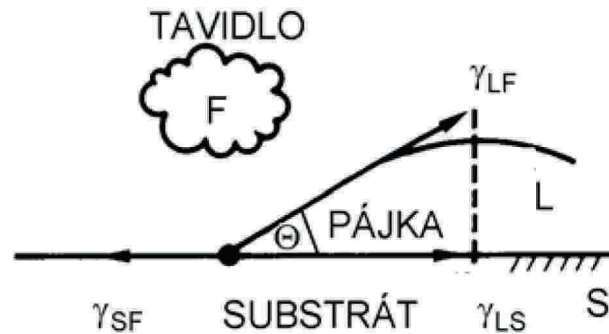
Při pájení probíhá reakční smáčení, které je v systému kov-kov obecně vysoce reaktivní. Ihned po kontaktu tekuté pájky s pájeným povrchem, dochází v tvorbě difuzní vrstvy o tloušťce d (viz. vztah 2.1).

Rovnováha procesu smáčení

Jak už bylo poznamenáno, smáčivost je definována smáčecím úhlem θ , který figuruje v Youngově rovnici (viz. vztah 2.4). Na obrázku 2.4 jsou vyznačena jednotlivá povrchová napětí na rozhraních. Symbolem L je značena pájka, symbolem F tavidlo a symbolem S substrát.

$$\gamma_{SF} = \gamma_{LS} + \gamma_{LF} \cdot \cos \theta, \quad (2.4)$$

kde γ_{SF} je povrchové napětí na rozhraní tavidlo – pájka, γ_{LS} je povrchové napětí na rozhraní substrát – tavidlo, γ_{LF} je povrchové napětí na rozhraní pájka – substrát a θ je smáčecí úhel.



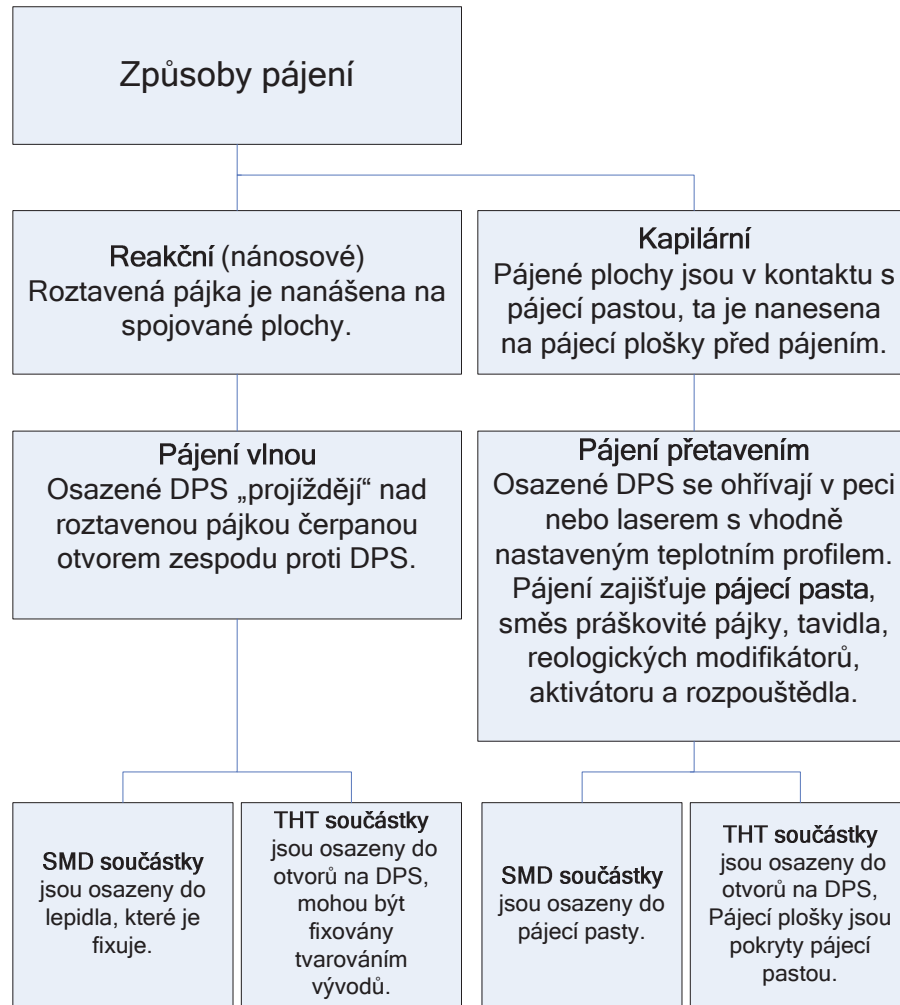
Obrázek 2.4 Zobrazení procesu smáčení [37].

Drsnost povrchu

Na smáčení a roztékání pájky má zásadní vliv drsnost povrchu. Pájka se lépe roztéká po drsném povrchu než po povrchu ideálně rovném. Drsnost povrchu pájecích plošek musí být definovaná, aby její výkyvy neovlivňovali proces pájení. Pájka se lépe roztéká po povrchu s definovanou drsností než-li po povrchu ideálně rovném, dle [2] a [3].

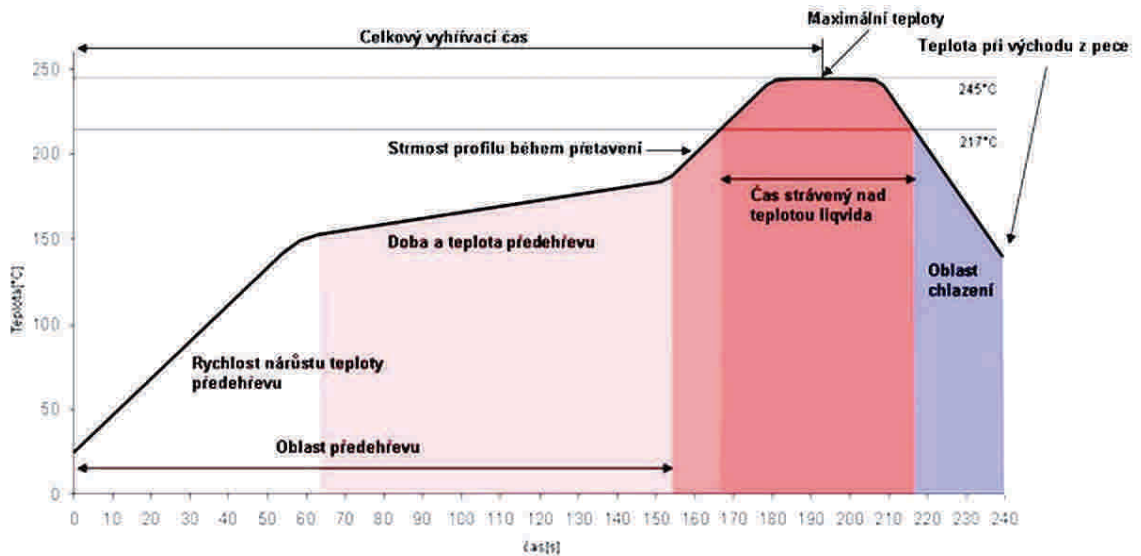
2.1.5 Způsoby hromadného pájení

Hlavním novodobým uplatněním měkkého pájení je elektrotechnický průmysl, kde je nejdůležitějším požadavkem elektricky a tepelně vodivý spoj, který lze případně opravit, ale zejména lze pomocí odpovídající technologie realizovat hromadně na automatických výrobních zařízeních. Základní rozdělení pájení podle způsobu je na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5 Rozdělení hromadného pájení podle způsobu.

U pájení vlnou i pájení přetavením je jedním z nejdůležitějších procesních parametrů teplotní profil. V dalším textu je zmíněna pouze technologie povrchové montáže součástek a pájení přetavením. Teplotní profil pro bezolovnaté pájení přetavením je uveden na obrázku 2.6.

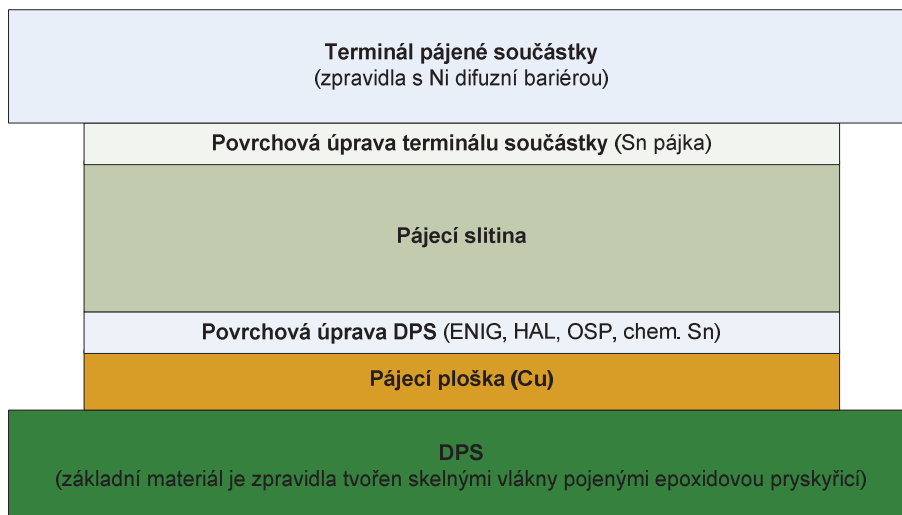


Obrázek 2.6 Teplotní profil pro pájení přetavením bezolovnatou pájecí pastou [36].

Teplotní profil musí být nastaven s ohledem na teplotní kapacitu pájené osazené DPS, tzn. musí být počítáno i s teplotní kapacitou pájených součástek. Křivka teplotního profilu ohraničuje oblast, ve které je teplo dodané DPS. Z teplotního profilu lze vyjádřit integrál dodaného tepla, tedy jeho množství.

2.2 Materiálový systém

Materiálový systém je soubor materiálů, které se účastní pájení nebo-li, mají vliv na tvorbu spolehlivého pájeného spoje. Jak je schématicky naznačeno na obrázku 2.7, zpravidla je to vlastní pájecí slitina, tavidlo, povrchová úprava DPS a povrchová úprava terminálu pájeného komponentu.



Obrázek 2.7 Schéma materiálového systému.

2.2.1 Povrchové úpravy DPS a komponentů

Pájecí plošky DPS a pájených komponentů musí být opatřeny povrchovou úpravou, která zabráňuje oxidaci pájených povrchů a současně zlepšuje některé jejich vlastnosti. Největší nároky jsou kladeny na zajištění výborné pájitelnosti po co nejdelší dobu. Většina běžných kovových povrchů je upravována pokovováním.

Pokovování lze rozdělit podle metody depozice na:

- elektrolytické (galvanické) pokovování,
- bezelektrodové pokovování (electrode-less plating),
- imerzní pokovování [5].

Po přechodu na bezolovnaté pájení byla povrchovým úpravám věnována velká pozornost. Nanášení povrchové úpravy představuje poslední významný výrobní krok před montáží komponentů. Kvalita a stálost povrchové úpravy přímo ovlivňuje pájitelnost povrchu a tím i kvalitu pájeného spoje jako celku. Vyšší nároky na povrchovou úpravu způsobilo zejména zvýšení procesních teplot, které je nezbytné pro bezolovnatý proces. Z těchto důvodů bude povrchovým úpravám věnováno více prostoru.

V elektrotechnice se používají následující povrchové úpravy:

- OSP Organic Solderability Preservative,
- Imm Ag Immersion Silver,
- Imm Sn Immersion Tin,
- ENIG Electroless Nickel/ Immersion Gold,
- HASL Hot Air Solder Leveling,
- Ni/Pd/Au Electroless Nickel/ Electroless Palladium/ Immersion Gold,
- Electrolytic Nickel/ Electrolytic Gold,
- ENIGEG Electroless Nickel/ Immersion Gold/ Electrolytic Gold,
- DIG Direct Immersion Gold [6].

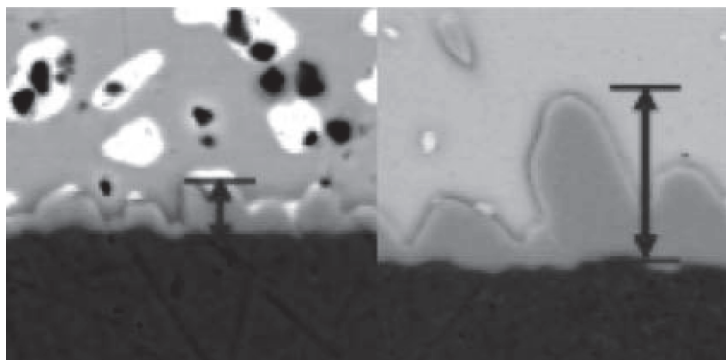
V následujících odstavcích budou popsány nejpoužívanější povrchové úpravy včetně technologie jejich realizace.

OSP

Organic Solderability Preservative je povrchová úprava realizovaná nanášením organických inhibitorů mědi na odkrytý povrch substrátu [2]. Jako inhibitory oxidace mědi se používají deriváty benzotriazolu, imidazolu nebo benzimidazolu, které se selektivně vážou na povrch mědi [7].

OSP se začalo používat až s rozvojem technologie povrchové montáže. Při přechodu na bezolovnaté pájení bylo třeba vyvinout OSP odolávající vyšším teplotám a více průchodům přetavovací pecí. Povlak je složen z organokovového polymeru s malými molekulami, jako jsou mastné kyseliny a azolové deriváty, které jsou zachycené v povlaku pomocí slabých Van der Waalsových sil. Tloušťka vytvořené vrstvy je 0,2 – 0,5 μ m. Každý průchod přetavovací pecí snižuje pájitelnost vrstvy, pájením v ochranné atmosféře pak lze tento jev výrazně omezit. OSP vrstva se rozkládá při 290°C [8].

Tloušťka intermetalické vrstvy je v porovnání pájení olovnatou pájkou s bezolovnatou nižší. Při olovnatém pájení je tloušťka kolem 2 μ m, při bezolovnatém 5 μ m, viz. obr. 2.8. To je dáno jednak tím, že se pájí při vyšších teplotách (nárůst o 30°C) a dále vyšším obsahem cínu v bezolovnatých pájkách (přes 97%). To působí rychlejší rozpouštění mědi a růst difuzní vrstvy.



Obrázek 2.8 Vlevo je metalografický výbrus spoje pájeného olovnatou a vpravo bezolovnatou pájkou [35].

V tabulce 2.2 je uveden proces realizace povrchové úpravy OSP na měděném povrchu.

Tabulka 2.2 Proces realizace povrchové úpravy OSP [6].

Procesní krok	T [°C]	Čas [s]	Funkce
Čištění	45 až 50	50 až 70	Připravuje měděný povrch na rovnoměrné působení mikroleptání
Oplach	22	60	
Mikroleptání	20 až 25	50 až 70	Zajišťuje požadovanou drsnost povrchu
Oplach	22	60	
Předpovlakování	20 až 25	50 až 70	Připravuje upravený povrch pro nanesení OSP
OSP povlakování	35 až 45	50 až 70	Postupně přemísťuje organický povlak na měděný povrch
Oplach	22	60	
DI oplach	25 až 35	60	
Sušení	40		

OSP se stává velice rozšířenou povrchovou úpravou v technologii povrchové montáže (SMT). Je to zejména z důvodu nízké ceny, levné technologie a výborné rovinnosti pájecích plošek. Nevýhodou je nedoporučené testování elektrotechnických sestav pomocí ICT, omezená životnost (6 až 12 měsíců), nemožnost opravy špatného tisku pasty z důvodu znehodnocení povlaku při čištění pájecí pasty.

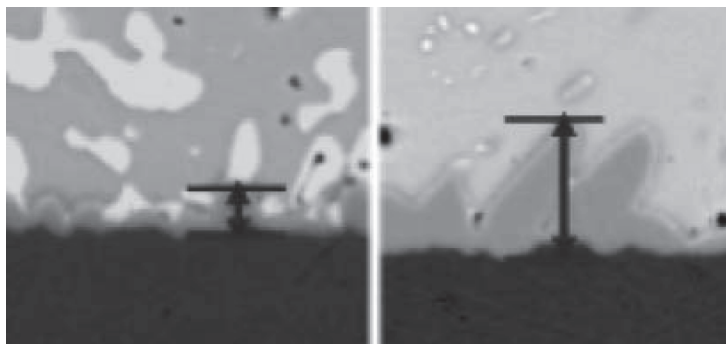
Imm Sn

Imm Sn je povrchová úprava, při jejíž realizaci se chemicky nanáší vrstva cínu na měděný povrch.

Základ nanášení této povrchové úpravy je v ponoření DPS do roztoku cínových iontů, které se začnou zaměňovat za ionty měděné. Za normálních okolností by k tomu nedocházelo, protože ionty mědi mají vyšší potenciál než ionty cínu. Z toho důvodu je v procesu použita thiomocovina, která snižuje potenciál mědi a umožňuje i akceleruje výměnu iontů mědi za ionty cínu [6].

Měď z pájecí plošky má snahu difundovat přes cínový povrch a při tom se vytvářejí intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn . Růst této vrstvy má negativní vliv na pájitelnost, zejména když se všechnen čistý cín spotřebuje intermetalické sloučeniny s mědí. Dynamika tohoto procesu roste se zvýšenou teplotou, z toho důvodu je nutné, se před zpracováním DPS, vyvarovat sušení a podobným procesům. Tloušťka intermetalické vrstvy je primárně ovlivněna teplotou při skladování a jeho dobou. Tloušťka povrchové úpravy bývá v rozmezí $(0,8 - 1,2)\mu\text{m}$.

Tloušťka intermetalické vrstvy je v porovnání olovnatého pájení s bezolovnatým nižší. Při olovnatém pájení je tloušťka kolem $1,5\mu\text{m}$, při bezolovnatém $4\mu\text{m}$, viz. obr. 2.9. To je opět způsobeno vyššími teplotami procesu pájení a složením bezolovnaté pájky.



Obrázek 2.9 Vlevo je metalografický výbrus spoje pájeného olovnatou a vpravo bezolovnatou pájkou [35].

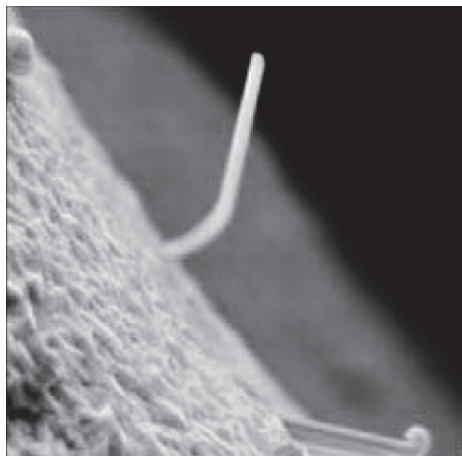
V tabulce 2.3 je uveden proces vytváření povrchové úpravy ImSn na měděný povrch.

Tabulka 2.3 Proces realizace povrchové úpravy imersním cínem [6].

Procesní krok	T [°C]	Čas [s]	Funkce
Čištění kyselinou	35 až 60	50 až 70	Připravuje měděný povrch na rovnoměrné působení mikroleptání
Oplach	22	60	
Mikroleptání	25 až 35	70 až 90	Zajišťuje požadovanou drsnost povrchu
Oplach	22	60	
Předúprava	20 až 30	50 až 70	Připravuje upravený povrch pro reakci
Imersní cín	65 až 75	480 až 720	Nanáší tenkou, hustou a rovnoměrnou vrstvu cínu na místo iontů mědi
Postúprava			Odstraňuje soli cínu (povrchovou kontaminaci)
Oplach	22	60	
Sušení	40		

Proces výroby povrchové úpravy chemický cín je relativně jednoduchý, levný s výbornou rovinností. Dobrá je i materiálová kompatibilita s bezolovnatými pájkami, které jsou bohaté na cín. DPS musí být skladovány se zvýšenou pozorností.

Dalším problémem jsou cínové whiskery (chlupy), viz. obr. 2.10. Jsou to krystaly čistého cínu, které rostou v důsledku vnitřního namáhání, po pájení se napětí obvykle vyrovná.

**Obrázek 2.10** Cínový whisker, 6000x [35].

ENIG

ENIG je povrchová úprava realizovaná nanášením dvou vrstev kovů, niklu jako podkladu a zlata jako povrchu. Po čištění a aktivaci měděného povrchu je v lázni za přítomnosti fosforu chemicky nanášen nikl. Koncentrace fosforu musí být neustále sledována, protože negativně ovlivňuje smáčivost niklu. Zlato je nanášeno imersně, v povrchové úpravě plní úlohu ochrany niklu před oxidací a pasivací před pájením.

Vrstva niklu tvoří difuzní bariéru mezi pájkou a měděným povrchem pájecí plošky. Díky přítomnosti niklu v pájeném spoji se tvoří intermetalické sloučeniny niklu a cínu, jejichž vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Nikl je společně s (6 – 12)hm.% fosforu přenášen na měděný povrch, tím je vytvořena vrstva o tloušťce (3 - 6) μm . Zlato je nanášeno imersně v tloušťce (0,05 – 0,10) μm . V tabulce 2.4 je stručně uveden proces realizace povrchové úpravy ENIG.

Tabulka 2.4 Proces realizace povrchové úpravy ENIG [6].

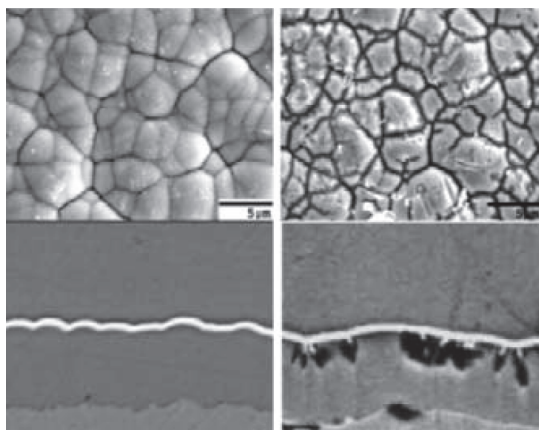
Procesní krok	T [°C]	Čas [s]	Funkce
Čištění	35 až 45	180 až 360	Připravuje měděný povrch na rovnoměrné působení mikroleptání
Oplach	22	60	
Mikroleptání	25 až 35	60 až 120	Zajišťuje požadovanou drsnost povrchu
Oplach	22	60	
Kyselá předúprava	22	180 až 300	Připravuje měděný povrch na následné úpravy
Aktivace	20 až 25	60 až 180	Vytváří aktivní, tenkou a zrnitou vrstvu pro nanášení niklu
Oplach	22	60	
Nanášení niklu	80 až 90	900 až 1800	Autokatalické nanášení niklu na měděný povrch
Oplach	22	60	
Nanášení zlata	80 až 90	420 až 900	Vytěsnění iontů niklu zlatem
Oplach	22	60	
Sušení	40		

Povrchová úprava ENIG po dlouhou dobu výborně chrání měděný povrch před oxidací. Dříve se používala zejména v aplikacích náročnějších na skladování, nebo v případě potřeby bondování, které u HASL a OSP provádět nelze. Asi největší nevýhodou je relativně vysoká teplota potřebná v procesech nanášení niklu a zlata.

Pájení probíhá tak, že vrstva zlata se ihned po kontaktu z roztavenou pájkou v pájce rozpustí a spustí se tvorba intermetalických sloučenin niklu a cínu. Je pájeno na nikl,

který tvoří difuzní bariéru mezi mědí a roztavenou pájkou. Rychlost rozpouštění niklu do cínu je nižší než rozpouštění mědi do cínu u ostatních běžně používaných povrchových úprav. Běžná tloušťka intermetalické vrstvy tvořené Ni_3Sn_4 je do $1\mu m$.

Známým technologickým problémem této povrchové úpravy je tzv. černý nikl, který je nepájitelný, viz. obrázek 2.11. Z fotografií je patrné, že jde o jakousi korozi niklu.



Obrázek 2.11 Vlevo je metalografický výbrus standardní vrstvy niklu, vpravo je výbrus defektní vrstvy [35].

Teorie popisující a vysvětlující vznik tohoto jevu se liší. Dříve se tento defekt připisoval nesprávné koncentraci fosforu v niklové vrstvě v blízkosti rozhraní nikl - roztavená pájka. Omezením obsahu fosforu by se tedy mělo předejít černání niklu. Nedávné výzkumy, například studie: „Impacts of Bulk Phosphorous Content of Electroless Nickel Layers to Solder Joint Integrity and their Use as Gold- and Aluminum-Wire Bond Surfaces“, dokazuje, že 8% až 12% obsah fosforu ve skutečnosti snižuje korozi během ponoru DPS do zlatíci lázně [9]. Jiné studie („A New Generation of Electroless nickel Immersion Gold (ENIG) Process for PWB Surface Finishes“ od K. Chana) dokazují skutečnost, že koncentrace fosforu vyšší než 10% může negativně ovlivnit depozici zlata.

Na kvalitu Ni vrstvy mají vliv následující parametry: čas v lázni, teplota, pH, obsah fosforu, množství DPS pokovených v lázni mezi údržbami. Jde tedy o mnoho parametrů, které musí být přesně udržovány. I přes vyšší složitost procesu a relativně vysokou cenu se ENIG používá ve stále větší míře.

HASL

Hot Air Solder Leveling je povrchová úprava realizovaná nanášením roztavené pájky na DPS, přebytečná pájka je z DPS odstraněna prouděním horkého vzduchu.

Po mnoho let byl HASL nejlepší volbou pro mnoho aplikací. Povrchová úprava se

v podstatě skládala ze stejné slitiny používané pro pájení komponentů. To zajišťovalo velmi příznivé podmínky pro pájení. S přechodem na bezolovnaté pájení vyvstal problém s volbou slitiny pro HASL. Použití bezolovnatého HASL vyžaduje několik změn v procesu, jako například:

- vyšší procesní teploty (260°C až 280°C) podle obsahu niklu v pájce,
- delší doba kontaktu DPS s roztavenou pájkou,
- zlepšení cirkulace pájky pro rychlejší přenos tepla,
- předehřívání DPS,
- použitá chemie (tavidla, oleje) musí odolávat vyšším teplotám,
- je nutné sledovat obsah mědi v pájce [6].

Tyto procesní změny se podařilo vyřešit a pro nenáročné aplikace je nabízena výrobci DPS dál. Za snižujícím se podílem DPS vyráběných s povrchovou úpravou HASL je především výsledná rovinatost povrchu. Důvodem jsou stále menší rozměry osazovaných komponentů. Tloušťka nanesené vrstvy pájky se pohybuje v rozmezí (2,5 – 14)μm. V tabulce 2.5 je uveden ve zkratce proces výroby HASL.

Tabulka 2.5 Proces výroby povrchové úpravy HASL [6].

Procesní krok	T [°C]	Čas [s]	Funkce
Čištění kyselinou	40 až 50	30 až 60	Připravuje měděný povrch na rovnoměrné působení mikroleptání
Oplach	22	60	
Mikroleptání	20 až 30	30 až 60	Zajišťuje požadovanou drsnost povrchu
Oplach	22	60	
Nanesení tavidla	22	50 až 70	Nanesení tavidla před ponorem do roztavené pájky
Ofuk horkým vzduchem	260	120 až 480	Postupně odstraňuje přebytečnou pájku z DPS pomocí "nože" z horkého vzduchu
Čištění	40 až 50	30 až 60	
Oplach	22	60	
Sušení	40		

Důvodem popularity HASL je nízká cena a snadná pájitelnost i po delším skladování (až 12 měsíců). Nevýhodou naopak špatná rovinnost povrchu, možnost tvorby můstků u komponentů s jemnou roztečí (fine pitch) a relativně velký teplotní stres pro DPS.

2.2.2 Pájecí slitiny

Základními požadavky na pájecí slitinu jsou nízká toxicita, nízká cena, nízká teplota tavení a výborné mechanické vlastnosti. Právě požadavky na nízkou toxicitu vyvolaly v devadesátých letech odbornou diskuzi na téma vyloučení některých toxických prvků z průmyslové výroby.

Polemika na téma bezolovnatého pájení

Problémem je, že se některé elektrotechnické výroby bez „svých“ toxických prvků neobejdou. Tato skutečnost způsobila velice paradoxní situace, kdy se například z pájení, za obrovských investic, vyloučilo olovo a při výrobě olověných akumulátorů se ho ročně celosvětově spotřebuje několik stovek milionů tun. Toto číslo se každoročně zvyšuje i díky popularitě jízdních kol s elektromotorem, pouze v Číně se k tomuto účelu spotřebuje ročně přes milion tun olova.

Z pohledu podniku, který se zabývá osazováním a pájením se investice nutné k bezproblémovému přechodu na bezolovnaté pájení dají popsat následovně:

- výměna přetavovacích pecí za zařízení, která umožňují pájení v ochranné atmosféře,
- výměna zařízení na pájení vlnou – bezolovnatá pájka je agresivnější a rozpouští součásti čerpadel,
- zavedení dusíkového hospodářství, fixní náklady na pájení vzrostly o náklady spojené se spotřebou dusíku,
- vedení dvou skladů součástek, které se postupně začaly vyrábět i v bezolovnatém provedení,
- výrazně se zvýšily náklady na pájecí pastu, která obsahuje nejčastěji 3% stříbra a 96% cínu,
 - globální cena stříbra se v roce 2006 zdvojnásobila oproti předchozímu desetiletému období, v roce 2011 byla dokonce ve stejném poměru čtyřnásobná,
 - cena cínu se zdvojnásobila,
- mnoho společností muselo navýšit podlahovou plochu výroby, protože, zejména v přechodném období (v letech 2006 - 2014), bylo nutné díky množství výjimek provozovat obě technologie současně.

Mimo pozornost nezůstali ani výrobci součástek a desek plošných spojů, kteří nově čelili požadavku na bezolovnatou povrchovou úpravu HAL. S odstupem času lze konstatovat, že bylo celé odvětví donuceno k masivním investicím, které byly do značné míry obchodním zájmem dodavatelů pájecích zařízení a dodavatelů technických

plynů. Pozitivním důsledkem je bezesporu vyloučení olova z výrobního procesu a výrazné snížení zdravotních rizik pro zaměstnance v elektrotechnickém průmyslu.

Po přechodu na bezolovnaté pájení se používají převážně níže popsané slitiny.

SnAgCu

SnAgCu je ternární eutektická slitina Sn-Ag-Cu [Sn + (3%-4,1%) Ag + (0,45%-0,9%) Cu] s teplotou tavení (217-219)°C. Cu je přidána do SnAg, aby se zpomalilo rozpouštění mědi, snížila teplota tání a zlepšila smáčivost a charakteristiky tepelné únavy. Firmy Nokia a Multicore dosáhly výtěžnosti a spolehlivosti srovnatelné, nebo dokonce lepší, než u eutektické SnPb pájky [37]. V průmyslu je nejpoužívanější pájecí pasta s názvem SAC 305, které obsahuje 96,5% cínu, 3% stříbra a 0,5% mědi.

SN100C

Sn/Cu_{0,7}/Ni_{0,05} (227°C). SN100C je slitina cínu, mědi a niklu, dnes jde o relativně široce používanou pájecí slitinu v procesu pájení vlnou. Nikl výrazně zvyšuje tekutost, snižuje erozi nerezových dílů a zlepšuje vzhled pájeného spoje.

Sn_{3,5}Ag

Sn_{96,5}/Ag_{3,5} (221°C) je jedna z neslibnějších slitin, která je používána například firmami Ford, Motorola nebo TI Japan. Německé studie tvrdí, že se jedná o jednu z nejvhodnějších slitin. Výhodou je dlouhá zkušenost s touto slitinou. Indium Corp. uvádí, že má při přetavení nejhorší smáčivost ze všech slitin s vysokým obsahem Sn [37]. Tato pájecí pasta má shodný teplotní přetavovací profil jako SAC 305.

Sn_{0,7}Cu

Sn_{99,3}/Cu_{0,7} (227°C) uvádí firma Nortel jako srovnatelnou s eutektickou pájkou SnPb pro výrobu telefonů. Smáčivost při přetavení ve vzdušné atmosféře je snížena. Jinak tato slitina má pravděpodobně nejhorší mechanické vlastnosti ze všech bezolovnatých pájek. Použití této pájky je preferováno při pájení vlnou [37].

Kromě výše uvedených pájek se můžeme setkat s pájkami typu například SnAgCuX, SnAgBiX, SnSb, SnZnX, SnBi nebo SnCuX.

Cínový mor

Prakticky všechny bezolovnaté slitiny obsahují více než 95 hm.% cínu. To představuje nebezpečí z hlediska používání zařízení pájených bezolovnatými pájkami v severských zemích. Kritickou vlastností cínu je tzv. cínový mor.

Při teplotě 13°C dochází v čistém cínu k alotropickým změnám, konkrétně z bílého cínu β-Sn (hustota 7,3g/cm³, tetragonální krystalová mřížka) na šedý α-Sn (5,8g/cm³, kubická krystalová mřížka). Přeměna je provázána zvýšením objemu o 26%.

Cínový mor se může vyskytovat u pájek Sn-0,5Cu a Sn-0,7Cu, naopak pájky s obsahem stříbra cínovému moru nepodléhají.

2.3 Požadavky na pájený spoj

Pájený spoj musí, už z principu své funkce, splňovat dva hlavní požadavky, výbornou elektrickou vodivost a dobré mechanické vlastnosti. K těmto dvěma hlavním kritériím lze zahrnout mnoho dalších.

V následujícím výčtu jsou shrnuty vlastnosti, na které je dáván důraz:

- mechanické vlastnosti,
- elektrická vodivost,
- tepelná vodivost,
- časová stálost,
- nízký šum,
- odolnost vůči korozi.

2.4 Defekty pájených spojů

Defekty pájených spojů lze rozdělit do dvou skupin, podle doby vzniku na defekty, které vznikly ve výrobě a defekty, které vznikly degradací pájeného spoje v průběhu jeho funkčního života. Mnoho defektů vzniká špatnou pájitelností, která je jako příčina vzniku zařazena do následujícího přehledu. Některé kategorie se mohou překrývat.

2.4.1 Přehled defektů po pájení přetavením

V následujícím textu je uveden přehled defektů, které mohou vzniknout po pájení přetavením. Do této skupiny byly zahrnuty defekty, které mají příčinu v:

- chybném tisku pájecí pasty,
- nastavení osazovacího procesu,
- nastavení přetavovací pece a teplotního profilu.

Tvorba můstků, zkratů (Bridging, Solder Short)

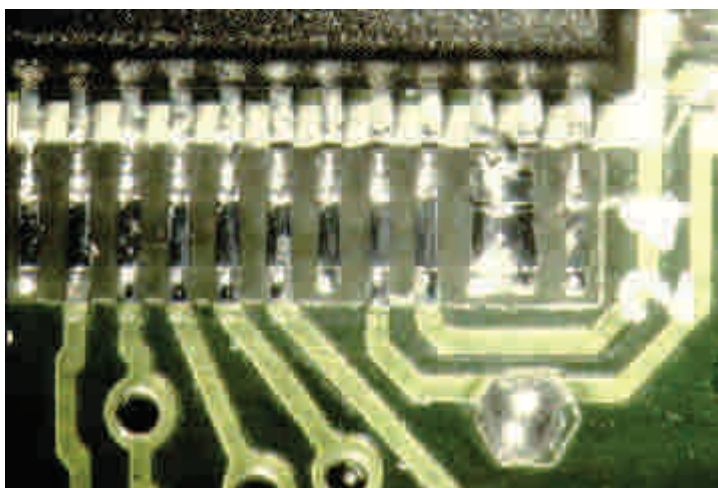
Bridging je vytvoření zkratu z pájky mezi vodivými cestami, nebo ploškami. Tento zkrat je vytvořen pájkou. U pájení přetavením je způsoben nepřesným nanesením pasty přes šablonu, rozmáznutím pasty, stečením pasty, přílišným množstvím pasty, nepřesným umístěním součástky nebo sníženou pájitelností. Při vhodném použití

nepájivé masky lze vznik můstků potlačit. Mezi ploškami by mělo být malé množství nepájivé masky, která zamezí vzniku můstků. Nejběžnějším důvodem vzniku zkratů je příliš mnoho pájecí pasty nebo nízká pájitelnost pájeného spoje. Příklad zkratu vytvořeného chybným osazením nebo během pájení v důsledku použití velkého množství pasty je na obrázku 2.12.



Obrázek 2.12 Zkrat vytvořený chybou v procesu [39].

Další příčinou může být také nesprávné nastavení pájecího profilu. Pokud budeme sledovat formování spoje během pájení, tak je na jemných roztečích často vidět sesutí pasty. V kapalném stavu zkraty „prasknou“ a to je počátek smáčecího procesu. Pokud je ale pájka napjatá mezi vývody a DPS se již začne ochlazovat, zkrat zůstane. Zkrat na obrázku 2.13 může být způsoben právě nesprávným nastavením pájecího profilu.



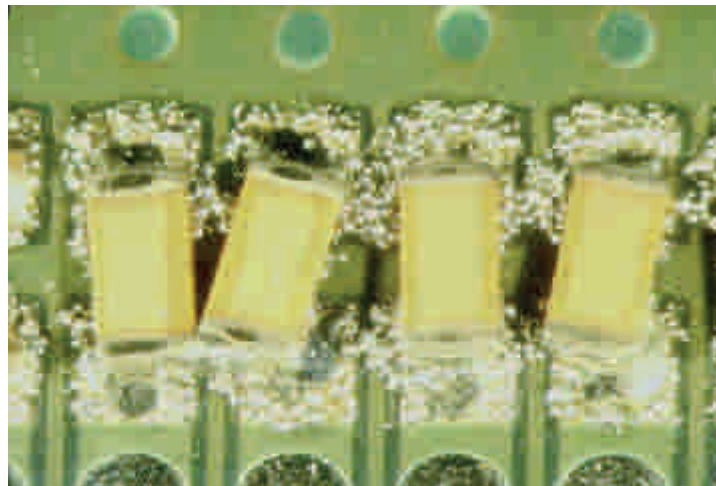
Obrázek 2.13 Zkrat vytvořený chybou v procesu.

Nepřetavená pájecí pasta (Failure To Reflow)

Nepřetavená pájecí pasta souvisí v první řadě s nesprávně nastaveným teplotním profilem pájení (je zde možná chyba obsluhy – po vytvrzování lepidla nedošlo ke změně nastavení pece). Na obrázku 2.14 je ukázka spoje, který byl pájen s neúměrně vysokou teplotou přehřevu (došlo k odpaření tavidla). Tento defekt se může také vyskytovat u desek, které byly z části osazeny a čeká se na dodání chybějících komponent. V tomto případě dojde ke ztrátě aktivity tavidla. Na obrázku 2.15 je fotografie zapájení komponent na desce, která čekala 2 dny na dodání chybějících součástek.



Obrázek 2.14 Spoj pájený s příliš dlouhým přehřevem [39].



Obrázek 2.15 Spoj pájený 2 dny po tisku pájecí pasty [39].

Tvorba kuliček (Solder Balling)

Vzhledem k vyšším teplotám můžeme u bezolovnatého pájení zaznamenat zvýšený výskyt kuliček pájky. To je způsobeno rozstříknutím pájky, které závisí na velikosti

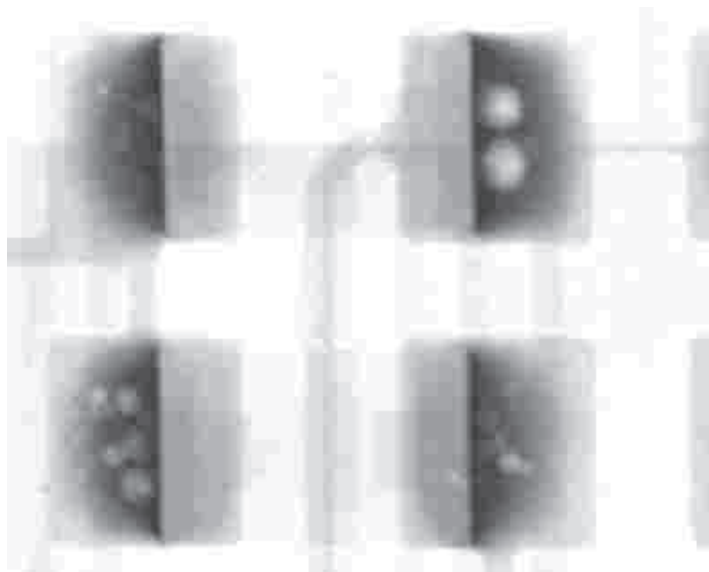
individuálních oblastí spoje, které se pomaleji přetavují. Tvorba kuliček může být způsobena také špatným sesouhlasením šablony a DPS při tisku pasty. Poté dojde k oddělení malého množství pasty od hlavního spoje. Tato oddělená část potom vytvoří na nepáživém povrchu kuličku. Dalším důvodem může být rozmáznutí pasty během manipulace s DPS nebo již při tisku pasty poškozenou šablonou. Na obrázku 2.16 je fotografie pořízená rentgenem, kde jsou v okolí pájených spojů vidět kuličky, které jsou lidským okem viditelné velice obtížně. Pokud se chceme tomuto defektu vyvarovat, musíme zvážit typ pasty, změnu přetavovacího profilu a zajistit dobré předvysoušení. Obvykle je nacházíme ve shluku o průměru $(25 \div 125)\mu\text{m}$.



Obrázek 2.16 Kuličky pájky v okolí pájeného spoje.

Tvorba dutin ve spoji (Voids)

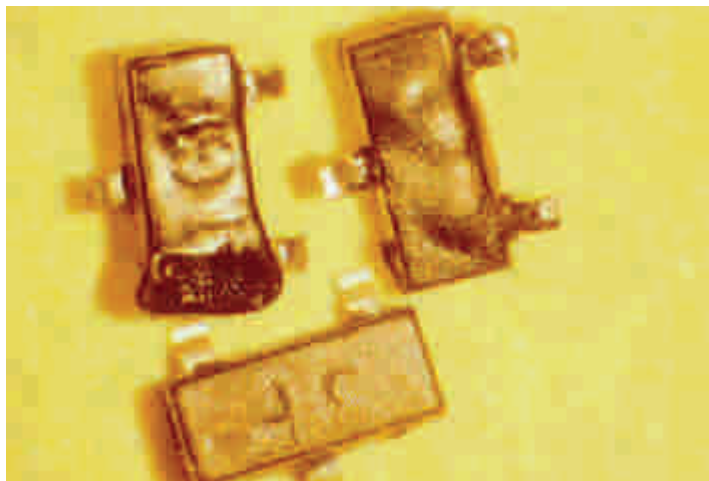
Dutiny ve spoji vznikají kvůli těkavým plynům, které nestačí ze spoje uniknout do té doby, než pájka ztuhne. Příliš mnoho pórů ve spoji snižuje jeho pevnost i elektrická a tepelná vodivost. Takový spoj může znamenat riziko při teplotním namáhání. Nejčastěji můžeme vidět bubliny ve spojích pod nožičkou u vývodu typu „gull wing“ a části jeho ohybu. Vyskytují se také u pouzder typu BGA, kde mohou být póry odhaleny pomocí vhodného rentgenového zařízení. Fotografie dutin pořízená na rentgenu je na obrázku 2.17.



Obrázek 2.17 Dutiny v pájeném spoji.

Měknutí součástek (Plastic Softening)

Součástky na obrázku 2.18 se zdeformovaly, protože na ně bylo působeno vyšší než předepsanou teplotou. Někteří výrobci používají na pouzdra plastové materiály, které nevydrží vyšší teploty používané při opravách. Tento problém se často vyskytoval v době, kdy se přecházelo na bezolovnaté pájky a v procesu se nedopatřením použily komponenty určené pro pájení olovnatou pájkou.

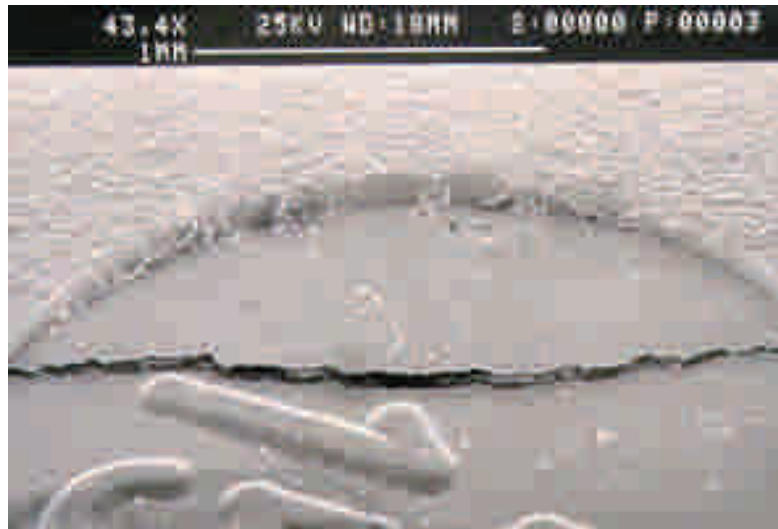


Obrázek 2.18 Komponenty, jejichž pouzdra nevydržela teplotní namáhání.

Zlom součástky (Component Cracking)

Součástky se většinou poškodí tímto způsobem už při osazování. Jedním způsobem poškození je zlomení o podporu při osazování desek, které jsou již z jedné strany osazeny. Druhým způsobem je poškození o hlavu mechanického centrování součástek (pouze u starších zařízení).

Při pájení se součástky lámou zejména kvůli vzniku malých trhlin v pouzdře komponentu během procesu přetavení (Popcorn Effect). Popcorning souvisí s příliš rychlým náběhem teploty přes hodnotu 100 °C teplotního profilu pece. Často souvisí i s kvalitou a stavem skladování součástek. Kritickým faktorem je absorbovaná vlhkost pouzder součástek. Předcházet tomuto defektu můžeme prodloužením fáze předehřevu, vhodným skladováním a vysušováním součástek. Na obrázku 2.19 je uvedena fotografie zlomu na povrchu součástky (pouzdro QFP, zvětšeno 43,4x).



Obrázek 2.19 Zlomený komponent [39].

Tvorba perliček (Solder Beading)

Jedná se o kuličky po stranách součástky, které nejsou součástí spoje. Nejčastěji se vyskytují u čipových kondenzátorů a rezistorů. Narozdíl od tvorby kuliček je poloha perliček konstantní. Jejich vznik je způsoben přílišným množstvím pasty na plošce nebo jejím nepřesným nátiskem. Odpařování rozpouštědel během fáze předehřevu vytvoří hroudu pasty pod součástkou a ta je po přetavení vytlačena na stranu vahou součástky. Tvorba perliček je typická porucha pro proces, ve kterém se neprovádí čištění tavidla. Jestliže je provedeno čištění, jsou perličky odstraněny, protože jsou zachyceny v tavidle, které se spláchne. Jejich průměr je obvykle $(125 \div 750) \mu\text{m}$. Příklad perliček je na obrázku 2.20. Tento defekt lze redukovat zmenšením gradientu teplotního profilu a snížením množství nanášené pasty.



Obrázek 2.20 Kuličky po stranách čipových součástek [39].

2.4.2 Defekty způsobené špatnou pájitelností

Defekty z této skupiny mohou vznikat z mnoha příčin. Většinou jde o špatné přepravní nebo skladovací podmínky desek plošných spojů a komponentů nebo nevhodná manipulace s nimi. Vstupují sem i vlivy předchozí kategorie jako je teplotní profil použitý při pájení.

Odvzlínání (Solder Wicking)

Roztavená pájka smočí vývod součástky a odvzlíná po vývodu pryč z oblasti pájeného spoje. K odvzlínání dochází, když je jeden povrch lépe pájitelný. Příčinou je zpravidla znečištění povrchu DPS nebo rozdílná teplota vývodu součástky a pájecí plošky. Správný výběr teplotního profilu eliminuje tuto možnost. K preventivním opatřením lze přiřadit testování pájitelnosti, správnou volbu teplotního profilu a umístění prokůvů a via děr v dostatečné vzdálenosti od spoje. Na obrázku 2.21 je ukázka odvzlínání u J vývodu.



Obrázek 2.21 Odvzlínání pájky, vývod typu J [39].

Zvedání součástek (Tombstoning)

Zvedání součástek je definováno jako zvedání jednoho konce součástky z pájecí pasty nebo postavení celé součástky. Toto je důsledkem nevyvážení smáčecích sil během přetavení. Vznik tohoto defektu způsobují „samovystředovací“ síly pájky. V případě malých součástek (např. 0402, 0201) panuje mezi povrchovým napětím roztavené pájky na jednotlivých spojích křehká rovnováha. Tato rovnováha může být snadno narušena malými změnami pájitelnosti jednotlivých plošek a rozdílem okamžiků, kdy se pájka na jednotlivých vývodech začne přetavovat. Ke vzniku tohoto defektu přispívá přítomnost dusíkové atmosféry při pájení. Dusíková atmosféra pomáhá zlepšit smáčení a povrchové napětí pájky. Předcházet zvedání součástek se dá zvýšením množství kyslíku v pájecí atmosféře, minimalizací množství tisknuté pasty, změnou přetavovacího profilu (teplotní nárůst předeřevu musí být minimalizován) a ještě nastavením mírné prodlevy v přetavovacím profilu (asi 10 °C pod teplotou likvida). Fotografie tohoto defektu je na obrázku 2.22.



Obrázek 2.22 Zvednutá součástka [22].

Špatné smáčení (Poor Wetting)

Problémy se smáčivostí jsou většinou výsledkem špatného nastavení poměru teploty a času teplotního profilu pece. Při nesmáčení se nevytvoří metalurgická vazba, rozhraní mezi pájkou a povrchem zůstane zřetelné. Tavidlo použité k podpoře pájení nemohlo adekvátně odstranit povrchové znečištění, protože oxidační vrstva je příliš silná nebo tavidlo není dostatečně aktivní. Na obrázku 2.23 je fotografie spoje, jehož špatná smáčivost je způsobena výrobcem součástek (nebo nevhodnou manipulací). Pájecí ploška je smočena dobře, ale J vývod smáčení odolal.



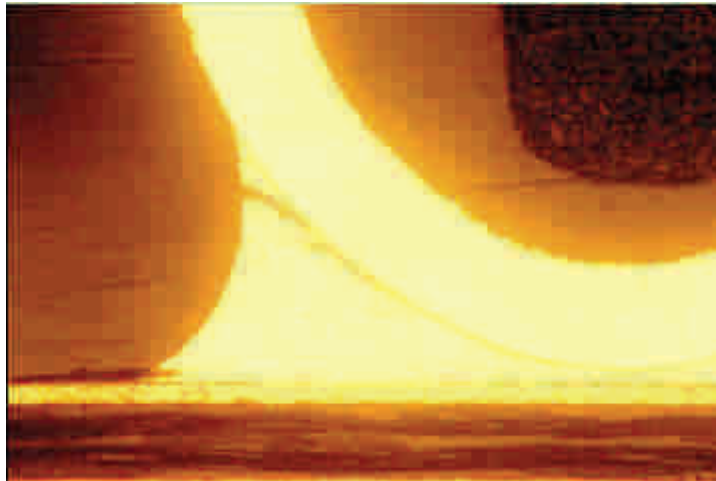
Obrázek 2.23 Špatné smáčení [39].

2.4.3 Defekty způsobené únavou pájeného spoje

V předchozích kategoriích byly uvedeny defekty, které lze odhalit vizuálně, popřípadě funkční kontrolou. Tato kategorie obsahuje defekty, které se projevují až v průběhu funkčního života pájeného spoje. Ke vzniku těchto vad přispívají provozní podmínky zařízení, kde hraje velkou roli teplota i vibrace.

Praskliny ve spoji (Joint Cracking)

Zlomy souvisí se strukturou slitiny vytvořeného pájeného spoje, kdy struktura vykazuje nižší pevnost při termo-mechanickým namáháním během provozu. Nižší pevnost slitiny může být dána přítomností dutých struktur, které vznikaly při růstu dendritických krystalů. Termo-mechanické namáhání může působit na součástku také při pájení spodní strany desky vlnou. I v nejlepších systémech dochází k ohybu desky. Dále může dojít k ohybu desky při kontrolách. Na obrázku 2.24 je fotografie zlomeného spoje.



Obrázek 2.24 Zlomený spoj [39].

Selhání spoje (Joint Failure)

Na obrázku 2.25 je metalografický výbrus vývodu, který je oddělen od pájecí plošky. V tomto příkladě selhal niklový povlak na měděném povrchu plošky nebo došlo k neúměrnému růstu intermetalické vrstvy a následnému selhání spoje. Pájení spoje bylo úspěšné. Dutina ve spoji, viditelná na výbrusu nepřispěla k selhání spoje.



Obrázek 2.25 Oddělení spoje od pájené plochy [39].

3 DOSAVADNÍ VÝVOJ V OBLASTI TESTOVÁNÍ PÁJENÝCH SPOJŮ

V následujícím textu je uveden přehled metod a způsobů, kterými lze zjišťovat kvalita pájeného spoje. Asi nejklasičtější a nejběžnější jsou experimentální zkoušky nebo také spolehlivostní zkoušky, kterými lze hodnotit pájený spoj a následně i odhadnout jeho potencionální životnost. Dále se používají teoretické metody využívající pro stanovení životnosti pájeného spoje různé únavové modely nebo statistické výpočty, které jsou pouze velice obecným odhadem, který nemůže zohledňovat všechny vstupní proměnné (zejména kolísáním časů a teplot ve výrobním procesu), řídí se především teplotou okolí, vlhkostí vzduchu, výkonovým zatížením a mechanickým namáháním.

3.1 Experimentální zkoušky

Experimentální zkoušky se používají pro zjištění deformace pájeného spoje v závislosti na době působení zatěžovacích sil. Kritická oblast pájeného spoje se nachází mezi substrátem a pájkou. Substrát se deformuje pružně na rozdíl od pájky, která se deformuje nepružně. Všechny experimentální zkoušky jsou destruktivní [11]. Cílem experimentálních zkoušek je simulovat reálný provoz ve zrychleném režimu, tedy s nižšími náklady. To úzce souvisí s defekty uvedenými v kapitole 2.4.3 pro jejichž predikci je nutné tyto zkoušky provést.

Podle existujících norem lze základní experimentální zkoušky rozdělit následujícím způsobem:

- zkouška odolnosti proti odtržení ČSN EN 62137-1-1,
- zkouška pevnosti ve smyku ČSN EN 62137-1-2,
- zkouška cyklickým padáním ČSN EN 62137-1-3,
- zkouška cyklickým ohybem ČSN EN 62137-1-4,
- vibrační zkoušky ČSN EN 60068-2-47,
- zkouška teplotním cyklováním a vlhkostí ČSN EN 60068-2-38,
- zkoušky solnou mlhou ČSN EN ISO 9227,
- zkoušky chladem ČSN EN 60068-2-1.

Dále lze experimentální zkoušky dělit podle způsobu namáhání na:

- klimatické zkoušky,
- mechanické zkoušky.

Pomocí experimentálních zkoušek je možné ověřit některé parametry ovlivňující životnost pájeného spoje, které se po zkoušce komparativně vyhodnotí. Není možné realizovat zrychlené zkoušky a nějak přesně je korelovat s reálnou časovou osou, vždy jde pouze o odhad.

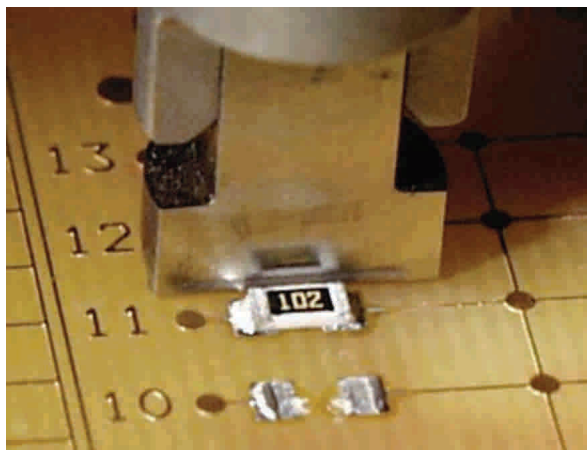
3.1.1 Zkouška odolnosti proti odtržení

Tato zkouška je popsána v normě ČSN EN 62137-1-1, kde je doporučována kombinace s teplotním cyklováním. Zkouška je vhodná pro SMD součástky, které mají vývody mimo pouzdro. Základem zkoušky je přípravek, který je vlastně rovinou nakloněnou pod úhlem 45°, na kterou je připevněna testovaná DPS. Vývody součástky jsou odtrhávány „háčkem“, který je součástí hlavy trhacího zařízení.

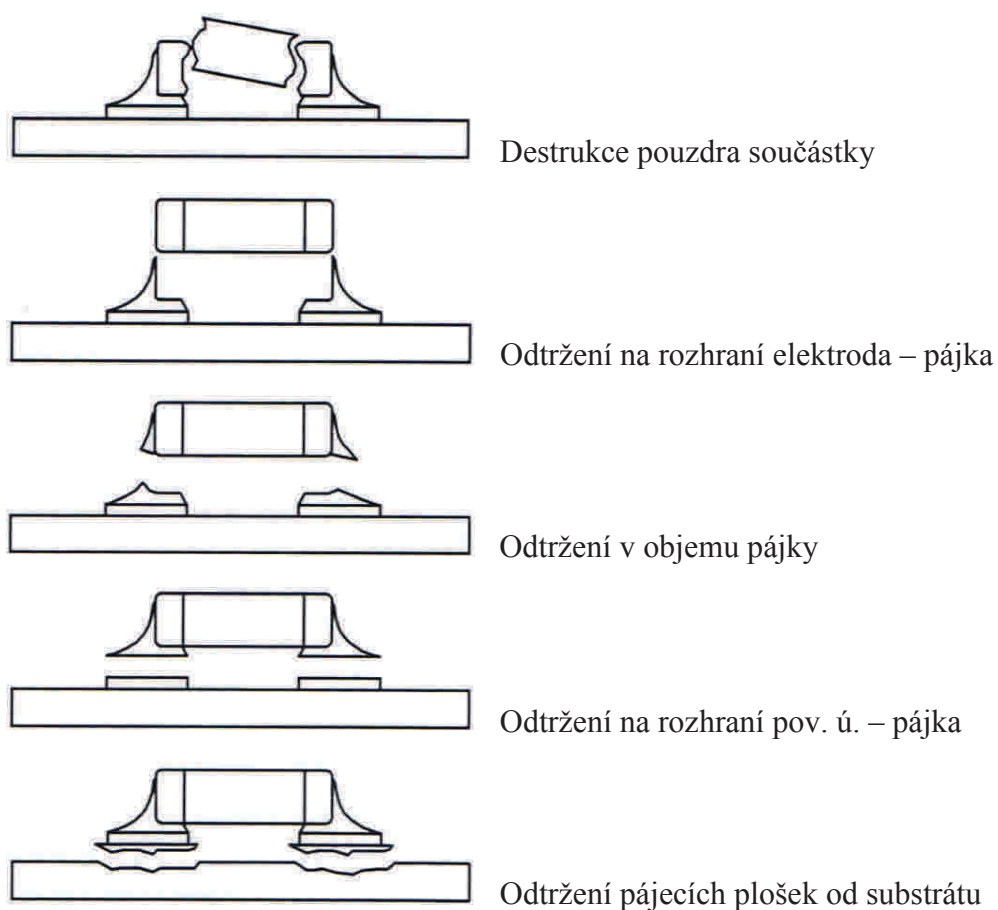
3.1.2 Zkouška pevnosti ve smyku

Zkouška pevnosti ve smyku nebo také zkouška stříhem je jedna z nejrozšířenějších zkušebních technik. Na základě výsledků lze hodnotit míru šíření trhlin, poškození pájeného spoje a také celkovou pevnost spoje.

Princip je založen na předpokladu, že přítomnost trhlin v pájeném spoji, jejich velikost a rozsah šíření, bude mít vliv na pevnost spoje. Právě z tohoto může být stanovena souvislost mezi pevností pájeného spoje a jeho selháním. Při zkoušce se měří síla potřebná k utržení součástky [11]. Před zkouškou je nutné nastavit parametry trhání. Prvním parametrem je vzdálenost stříhové hlavy od DPS. Druhým je rychlost stříhové hlavy, norma doporučuje rychlost (0,5 – 9)mm/min. Hrot trhacího zařízení je na obr. 3.1. Na obrázku 3.2 jsou zobrazeny případy defektů, které je možné zkouškou způsobit.



Obrázek 3.1 Fotografie hrotu trhacího zařízení, před testem [11].



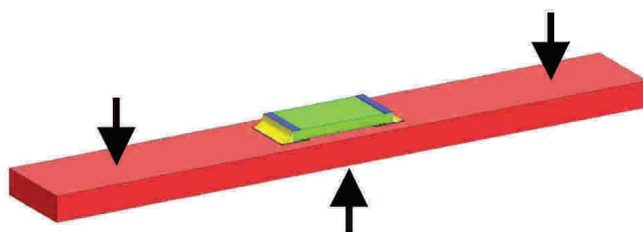
Obrázek 3.2 Případy výsledků zkoušky pevnosti ve smyku [12].

3.1.3 Zkouška cyklickým padáním

Při této zkoušce je podle ČSN EN 62137-1-3 vzorek umístěn na testovací stoličce, která opakovaně simuluje pád z výšky 0,75m nebo 1,5m. Na testované DPS jsou umístěny tenzometry, které měří prohnutí DPS. Současně je přístrojově vyhodnocováno, zda nedošlo k přerušení spoje na DPS. Sledují se i dočasná přerušení s délkou trvání do 100 μ s.

3.1.4 Zkouška cyklickým ohybem

Zkouška cyklickým ohybem simuluje velmi intenzivní namáhání DPS během provozu. Testování probíhá na speciálním zařízení, působení sil je zobrazeno na obrázku 3.3. Průhyb DPS je volen v rozmezí (1 až 4)mm, zároveň lze nastavit rychlost prohýbání a případně prodlevu. Současně je přístrojově vyhodnocováno, zda nedošlo k přerušení spoje na DPS. Sledují se i dočasná přerušení s délkou trvání do 100 μ s.



Obrázek 3.3 Schématické znázornění zkoušky cyklickým ohybem [11].

3.1.5 Vibrační zkoušky

Vibrační zkoušky patří k nejrozšířenějším mechanickým zkouškám, testují odolnost konkrétní elektrotechnické sestavy vůči vibracím. Způsob testování je popsán v ČSN EN 60068-2-47, ale i mnoha dalších normách např. [13]. Výhodou zkoušek je relativně dobře zpracované teoretické zázemí, které ulehčuje nastavení zkoušky. To je způsobeno patrně tím, že jsou tyto zkoušky hojně používány výrobci automobilů. V případě použití dvouosého zařízení lze nastavit vertikální a horizontální frekvenční rozsah obvykle od jednotek Hz až po 2 kHz, dalším parametrem je doba trvání zkoušky. Opět je současně vyhodnocováno, zda nedošlo k přerušení spoje na DPS.

3.1.6 Zkouška teplotním cyklováním a vlhkostí

Tyto zkoušky jsou popsány v ČSN EN 60068-2-38, jejich podstatou jsou cyklické změny teploty, volitelně i s řízenými změnami vlhkosti. Zkouška se provádí v cyklovací

komoře při pomalých změnách teplot a v šokových komorách, kde je vzorek „převážen“ mezi vyhřátou a zchlazenou komorou. Obecně lze nastavit gradienty růstu a klesání teplot, jejich maximální hodnoty, popřípadě prodlevy. I v tomto případě je obvyklá signalizace přerušení testovaných pájených spojů. Zkoušky teplotním cyklováním patří k nejrozšířenějším, proto existuje mnoho norem a předpisů, které je upravují, např IPC-SM-785.

Základním jevem, který provází zkoušku teplotním cyklováním je napětí, které vzniká v pájeném spoji v důsledku rozdílného součinitele teplotní roztažnosti součástky a desky plošného spoje. Díky tomuto napětí vzniká ve spoji takzvané poměrné posunutí, které popisuje vztah 3.1 [16]:

$$\Delta\varepsilon = \frac{L\Delta\alpha\Delta T}{2h}, \quad (3.1)$$

kde $\Delta\varepsilon$ je poměrné posunutí spoje, L je délka součástky [m], $\Delta\alpha$ je rozdíl součinitelů délkové teplotní roztažnosti desky plošného spoje a pouzdra součástky [$\text{ppm}\cdot\text{K}^{-1}$], ΔT je rozdíl teploty [K] a h je výška pájeného spoje [m].

3.1.7 Zkoušky solnou mlhou

K ověření korozní odolnosti elektrotechnických sestav se používají testy v solné mlze, tyto testy popisuje norma ČSN EN ISO 9227. Testuje se tak korozní odolnost DPS, které jsou určeny k provozu v náročných klimatických podmínkách, jde převážně o DPS opatřené lakováním.

3.1.8 Zkoušky chladem

Zkoušky chladem jsou využívány pro simulaci provozu elektrotechnického zařízení v nízkých teplotách. S přechodem na bezolovnaté pájení je často zmiňován jev cínového moru, kdy při teplotách pod 13°C dochází v cínu k alotropickým změnám. Zkoušky popisuje norma ČSN EN 6068-2-1.

3.2 Únavové modely

Základem správného postupu při stanovování životnosti pájeného spoje použitím únavových modelů, je zvolit správné teoretické rovnice pro popis dějů, které pájený

spoj ovlivňují. O zbytek práce se postará výpočetní program, např. ANSYS, kde se výsledky simulací použijí pro výpočet cyklů do poruchy. Následně lze výsledky ověřit experimentálními zkouškami popsanými v kapitole 1.1. Pokud bude předpokládáno pouze teplotní namáhání (podrobně popsáno v [15]) je vhodné použít pro popsání celkové smykové deformace vztah 3.2 [10]:

$$\gamma = \gamma_e + \gamma_p, \quad (3.2)$$

kde γ je celková smyková deformace, γ_e je elastická složka smykové deformace a γ_p je plastická složka deformace. Únavové modely lze podle mechanismu vzniku poruchy rozdělit do pěti hlavních skupin [15]:

- napětí (vibrace, mechanické namáhání),
- plastická deformace nebo deformace tečením,
- výpočet energie hysterezní smyčky napětí nebo deformace,
- akumulace poškození způsobující vznik praskliny,
- jiné mechanismy.

V tabulce č. 3.1 jsou uvedeny únavové modely podrobněji popsané v [10] a [15] s ohledem na typ simulovaného pouzdra a druh simulovaných dějů.

Tabulka 3.1 Únavové modely pro pájený spoj [15].

č.	Únavový model	Typ modelu	Pro pouzdra	Zaměření pozorování
1	Coffin-Manson	plastická deformace	všechna	nízkocyklová únava
2	Coffin-Manson-Basquin (celková deformace)	plastická a elastická deformace	všechna	vysoko i nízkocyklová únava
3	Solomon	plastická smyková deformace	všechna	nízkocyklová únava
4	Engelmaier	celková smyková deformace	TSOP	nízkocyklová únava
5	Miner	plastická deformace tečením	PQFP, FCOB	plastická smyková deformace a deformace tečením
6	Knecht a Fox	mechanismus posunu dislokací	všechna	mechanismus posunu dislokací
7	Syed	kumulace přetvárné práce vyvolané tečením	PBGA, SMD	všechny mechanismy
8	Dasgupta	celková přetvárná práce	LLCC, TSOP	geometrie spoje
9	Liang	hustota přetvárné práce	BGA, olovnaté	konstanty pro testy izotermální nízkocyklové únavy
10	Heinrich	hustota energie	BGA	hysterezní křivka
11	Darveaux	hustota energie	PBGA, bezolovnaté	hysterezní křivka
12	Pan	hustota přetvárné práce	LCCC	hysterezní křivka
13	Stolkarts	kumulace poškozením	všechna	hysterezní křivka a rozvoj poškození
14	Norris-Landzberg	teplota a frekvence	všechna	podmínky testování / použité podmínky

4 POUŽITÉ EXPERIMENTÁLNÍ METODY STUDIA PÁJENÝCH SPOJŮ

4.1 Měření a výpočet smáčecího úhlu

Stručný teoretický úvod k problematice smáčivosti pájených povrchů je uveden v kapitole 3.1.4. Smáčecí úhel lze měřit následujícími metodami:

- metoda smáčecích vah,
- měření smáčecího úhlu kamerou,
- měření plochy roztečení objemu pájky po povrchu a následný výpočet.

4.1.1 Popis měřených vzorků

Nejdříve budou popsány měřené vzorky a následně bude vybrána metoda měření. Pro měření byla navržena zkušební DPS, která byla vyrobena v následujících povrchových úpravách:

- OSP,
- ENIG,
- ImSn.

Vlastní DPS byla navržena jako matice spojů 9 x 5 zapojených v sérii, mezi spoji byly umístěny plošky pro následné kontaktní měření jehlovým polem. U měřených povrchů bude měřen smáčecí úhel při smáčení pájkami KESTER SAC 305, KOKI Sn3,5Ag a doplnkově povrch ENIG při smáčení olovnatou pájkou KOKI SnPb36,8Ag0,4Sb0,2.

Ověření tloušťky povrchových úprav

Měření bylo provedeno z důvodu zajištění kvality vstupních vzorků. Měření probíhalo metodou rentgenové fluorescence na Fischerscope XDAL237 a bylo provedeno vždy 5 měření na 2 deskách plošných spojů.

V tabulce 4.1 jsou výsledky měření povrchové úpravy ENIG a je možné konstatovat, že měřené vzorky vyhovují. V tabulce 4.2 jsou pak uvedeny naměřené hodnoty tloušťky povrchové úpravy ImSn.

Povrchová úprava OSP se kontroluje pouze vizuálně, protože její tloušťku nelze měřit.

Tabulka 4.1 Výsledky měření tloušťky povrchové úpravy ENIG.

		DPS 1					DPS 2				
Au	[μm]	0,074	0,075	0,067	0,072	0,066	0,063	0,066	0,067	0,074	0,069
Ni	[μm]	6,05	5,448	5,545	6,026	5,526	5,783	5,187	5,886	5,2	5,102

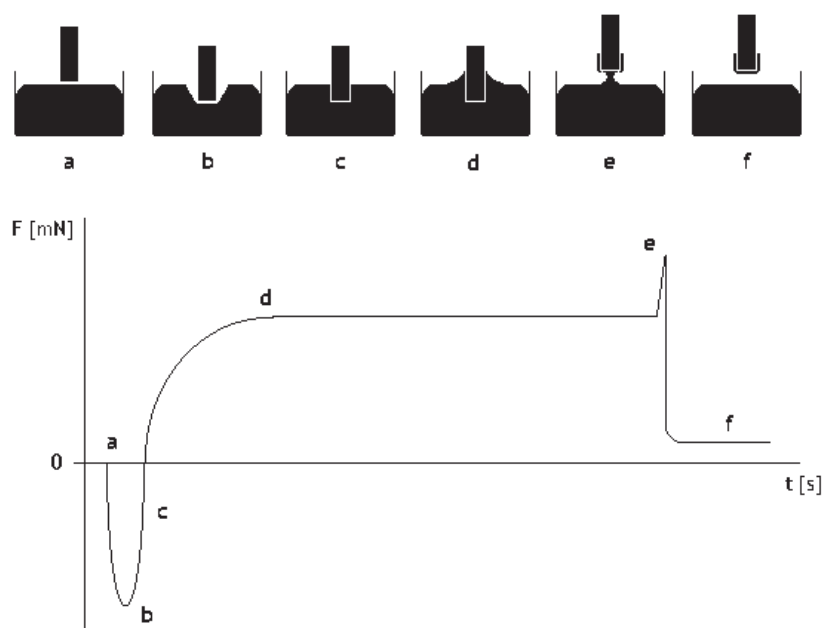
Tabulka 4.2 Výsledky měření tloušťky povrchové úpravy ImSn.

		DPS 1					DPS 2				
Sn	[μm]	1,21	1,311	1,265	1,302	1,248	1,253	1,3	1,27	1,287	1,269

4.1.2 Výběr měřicí metody

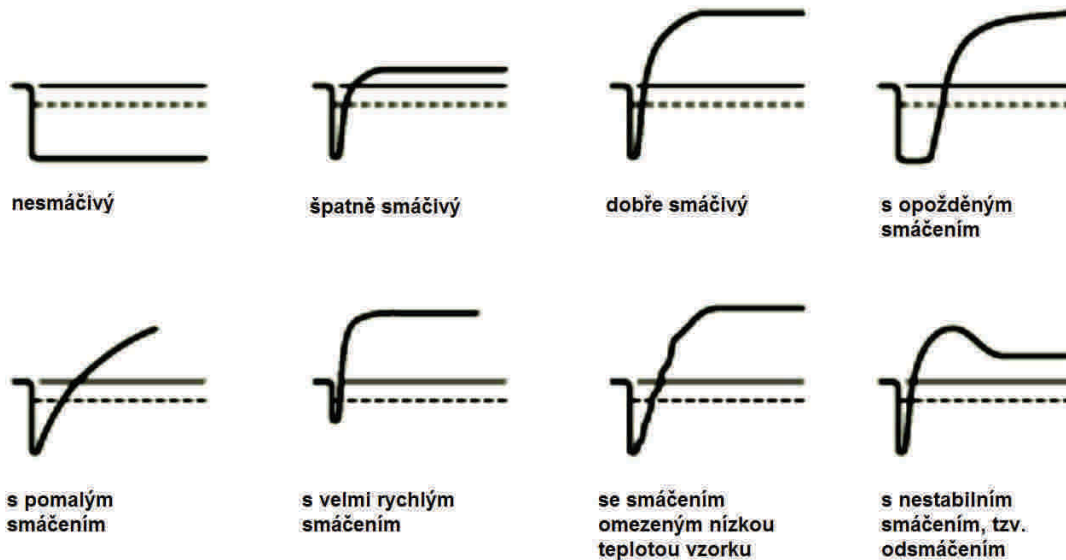
Metoda smáčecích vah

Metoda smáčecích vah spočívá v měření časového průběhu smáčecí síly na meniskografu. Metodu popisuje norma ČSN EN ISO 9455-16 a ČSN EN 60068-58. Vzorek, opatřený měřenou povrchovou úpravou, je namáčen do roztavené pájky, bezprostředně po kontaktu s hladinou pájky je měřena vztahová síla působící na vzorek, směr síly působící na vzorek se obrátí v čase, kdy je smáčecí síla vyšší než síla vztahová. Měřená a vyhodnocovaná závislost je na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1 Průběh sil působících na testovaný vzorek [28].

Klasifikace jednotlivých možných průběhů je na obrázku 4.2. Povrch můžeme podle naměřeného průběhu dělit na:



Obrázek 4.2 Klasifikace smáčivosti povrchu dle křivky naměřené na meniskografu [27].

Z naměřených hodnot lze vypočítat smáčecí úhel, ale je to velice závislé na materiálovém složení vzorku. Nejlépe měřitelné jsou homogenní vzorky, např. vývody nebo celopokovené kupóny. Výpočet kosinu smáčecího úhlu ϕ lze odvodit z rovnice smáčení:

$$\cos \phi = \frac{F + g\rho V}{\gamma p}, \quad (4.1)$$

kde ϕ je smáčecí úhel, F je naměřená síla, g je gravitační zrychlení, ρ je hustota pájky, V je objem ponořené části vzorku, γ je povrchové napětí roztavené pájky a p je obvod vzorku.

Metoda smáčecích vah je velice přesná, ale velice závisí na volbě vzorků i jejich přípravě na měření. Jde o relativně drahou metodu, která má v průmyslu omezené použití, protože běžně užívané desky plošných spojů i většina komponentů měřit na meniskografu nelze.

Měření smáčecího úhlu kamerou

Smáčecí úhel lze měřit opticky přímo při procesu smáčení. Poslouží k tomu pracoviště vybavené temperací vzorku a kamerou s vyhodnocovacím programem. Tato metoda je velice vhodná pro průmyslové využití ke kontrole smáčivosti pájecích plošek dodaných DPS.

Měření probíhá tak, že se na testovaném povrchu (na povrch je aplikováno tavidlo) přetaví natištěná pájecí pasta nebo BGA kulička. Mnoho lze vyčíst i z dynamického chování roztékající se pájky, podrobně popsáno v [2].

Měření plochy pájky roztečené po povrchu

Smáčecí úhel lze odvodit z plochy, na které se roztekl definovaný objem pájky. Měření lze opět provádět s BGA kuličkou (s aplikací tavidla), která má přesně definované rozměry, nebo natištěním definovaného objemu pájecí pasty šablonou. Při zvolení druhého způsobu je třeba mít detailní informace o pájecí pastě (objemová procenta kovu) a vyšší počet měření (ideálně 20 a více), protože opakovatelnost tisku pájecí pasty není vysoká. Metoda však plně vystačuje pro komparativní zjištění pájitelnosti povrchu.

I přes uvedené zápory byla tato metoda vybrána pro experimenty. Důvodem je vysoká rychlost a nenáročnost měření spolu s možností měření s konkrétními materiály použitými v následujících experimentech. Jde zejména o pájecí pasty a desky plošných spojů s rozdílnými povrchovými úpravami, které by nebylo možno nějak odpovědně měřit na meniskografu. Vztah pro výpočet smáčecího úhlu byl odvozen v [3] následujícím způsobem:

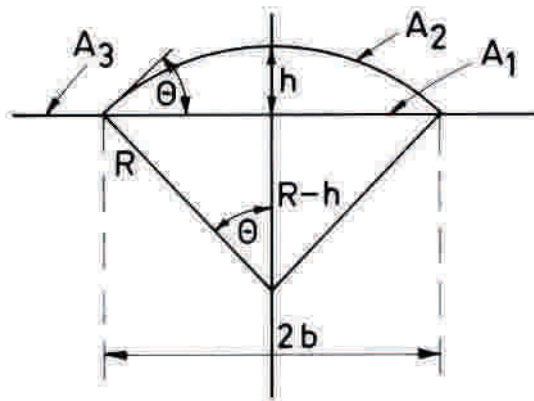
$$\tan \phi = \frac{2bh}{b^2 - h^2}, \quad (4.2)$$

kde ϕ je smáčecí úhel, b je poloměr plochy roztečené pájky a h je výška kulového vrchlíku, který tvoří pájka na povrchu. Výšku kulového vrchlíku lze vypočítat podle následujícího vztahu:

$$h = \left(\frac{3V}{\pi} + \sqrt{\left(\frac{3V}{\pi} \right)^2 + b^6} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(\frac{3V}{\pi} - \sqrt{\left(\frac{3V}{\pi} \right)^2 + b^6} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4.3)$$

kde h je výška kulového vrchlíku, který tvoří pájka na povrchu, V je objem roztavené pájky a b je poloměr plochy roztečené pájky.

Pro lepší pochopení situace je přiložen obrázek 4.3, kde je A1 smočený povrch, A2 je povrch pájky a A3 je nesmočený povrch.



Obrázek 4.3 Zobrazení kulového vrchlíku pájky s kótami rozměrů dosazovaných do vztahu 4.3 [3].

Závěr

Pro měření byla vybrána metoda výpočtu smáčecího úhlu z průměru oblasti roztečení pájky. Důvodem bylo především možnost měření přímo na vzorcích použitých v některých dalších experimentech a také možnost vyzkoušet pájecí pasty, které byly uměle stárnuty v následujícím experimentu.

4.1.3 Příprava a průběh experimentu

Pro experiment byla vyrobena šablona o tloušťce 80 μm s kruhovými otvory o průměru 0,7 mm. Ve vztahu 4.4 je vypočten teoretický objem O natištěné pájecí pasty.

$$O = \pi r^2 l = 3,14 \times 0,35^2 \times 0,08 = 0,03077 \text{ mm}^3, \quad (4.4)$$

kde je O objem natištěné pájecí pasty, r je poloměr otvoru v šabloně a l je tloušťka šablony. Z objemu O je nutné vypočítat % objemu kovu v natištěné pájecí pastě. To by mělo být v materiálovém listu, ale není to tam. Objemová % kovu obsaženého v pájecí pastě byla změřena a vypočtena. Známa jsou hmotnostní % obsahu kovů v pájecí pastě a hmotnostní % obsahu tavidla, u KOKI je to 10%, u Kester 11,5%. Postup měření a výpočtu objemových % je následujícím výčtu:

- měření objemu 0,1kg pájecí pasty,
- výpočet hmotnosti kovu v pájecí pastě z hmotnostních % obsahu kovu v pájecí pastě,
- výpočet hustoty kovů obsažených v pastě, u SAC 305 je to známých 7500kg/m³,
- výpočet objemových % obsahu kovu v pastě.

Výsledek výpočtu objemových % obsahu kovu v pájecí pastě

KOKI M955	60%
KOKI Sn3,5Ag	60%
Kester EM907	59%

Vzhledem k podobnosti vypočtených hodnot předchozích výsledků je, vzhledem k možným nepřesnostem v měření a výpočtech, možné zanedbat 1% rozdíl a sjednotit výsledek na 60%. Nyní je možné dokončit výpočet objemu kovové části natištěné pájecí pasty. Tj. 60% z 0,03077mm².

Objem kovové části pájecí pasty natištěné zkušební šablonou V je 0,01846mm³.

V tabulce 4.3 jsou uvedeny použité přístroje a materiál.

Tabulka 4.3 Použité přístroje a materiál.

Zařízení/ materiál	Specifikace
Pájecí pec	ERSA ERS 220
Mikroskop	AmScope, stereomikroskop 3x-220x
Měřicí software	AmScope 3.7
Sítotisk	PBT, Uniprint
Pájecí pasta	Kester SAC 305
Pájecí pasta	KOKI SnPb36,8Ag0,4Sb0,2
Pájecí pasta	Sn3,5Ag
DPS	ENIG, ImSn, OSP
Šablona	laserem řezaná nerezová šablona
Váhy	přesnost 0,01g

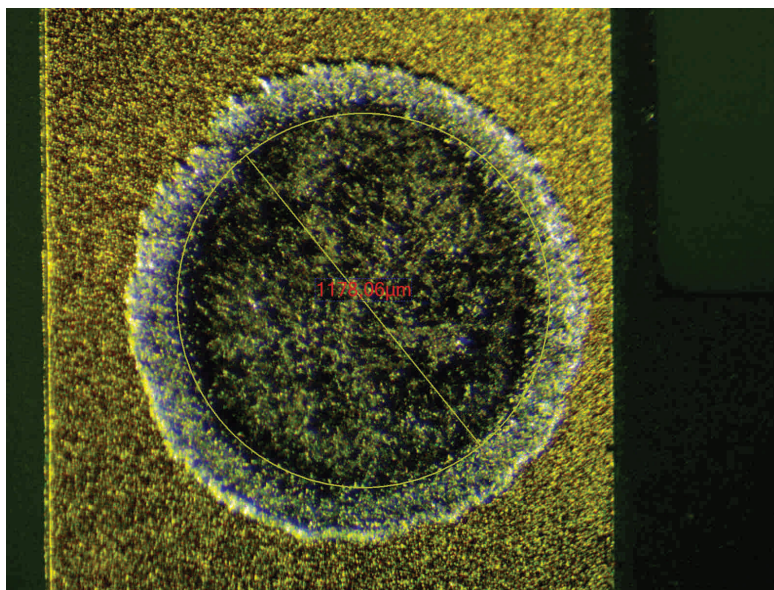
Jak již bylo dříve zmíněno, na tuto metodu mají vliv nepřesnosti v tisku pájecí pasty. Z těchto důvodů bylo při měření smáčecího úhlu měřeno 45 hodnot, ze 3 tisků, pro každou povrchovou úpravu.

Průběh experimentu lze popsat jako:

- tisk pájecí pasty,
- přetavení v průběžné přetavovací peci,
- měření průměru oblasti roztečení pájky,
- výpočet výšky kulových vrchlíků,

- výpočet smáčecího úhlu,
- vyhodnocení.

Měření průměru oblasti roztečení pájky bylo měřeno v kalibrovaném software AmScope 3.7. K měření byla použita funkce „Měření průměru aproximací třemi body“, ukázka je na obrázku 4.4. Pro rychlé výpočty smáčecích úhlů touto metodou bylo vytvořeno makro v excelu.



Obrázek 4.4 Způsob měření průměru oblasti roztečení pájky.

4.1.4 Výsledky

Výsledky byly zpracovány, jak již bylo řečeno, v programu MS Excel s použitím makra pro rychlejší a pohodlnější výpočet. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 4.4.

Tabulka 4.4 Závěrečné výsledky měření smáčecích úhlů.

Povrchová úprava	Pájecí pasta	Smáčecí úhel	Směrodatná odchylka
OSP	SAC 305	20,2°	±3°
ENIG	SAC 305	18°	±2,6°
ImSn	SAC 305	18,5°	±3,8°
ENIG	SnPb36,8Ag0,4Sb0,2	12°	±2,3°
ENIG	Sn3,5Ag	23°	±3,1°

Z tabulky 4.4 je na první pohled zřejmé, že má olovnatá pájecí pasta výrazně nižší smáčecí úhel než pasta bezolovnatá. To je normální jev, proto je doporučováno

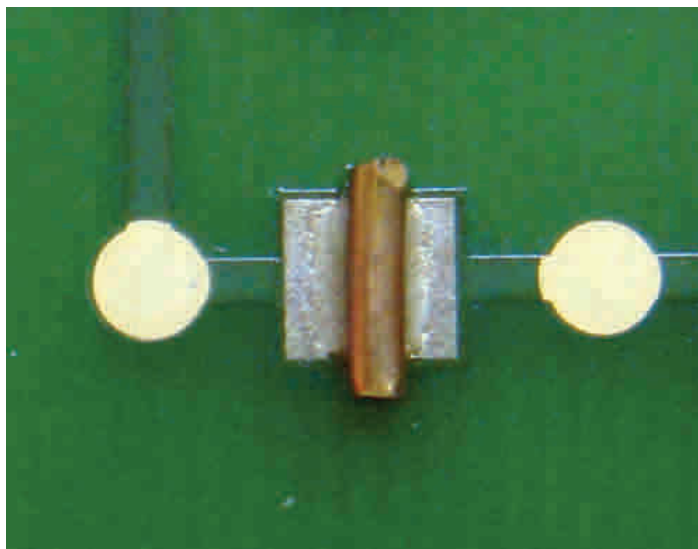
složitější elektrotechnické sestavy pájet v ochranné atmosféře, kde dojde k výraznému zlepšení smáčení, podrobně zpracováno v [2].

4.2 Měření tloušťky intermetalické vrstvy po izotermálním stárnutí

Jak již bylo zmíněno, na mezifázovém rozhraní pájka – pájecí ploška vzniká ihned po kontaktu intermetalická vrstva, která zajišťuje pevnost spoje. V této vrstvě dochází během provozu pájeného spoje ke změnám. Je to dáno tím, že difuzní jevy na rozhraní neustaly po ukončení pájení, ale pokračují dál. Zejména v závislosti na teplotě a čase, ale také v závislosti například na proudové hustotě, které je pájený spoj vystaven. Vzorky byly vystaveny dvouúrovňovému izotermálnímu stárnutí a v návaznosti na to byly připraveny metalografické výbrusy jednotlivých povrchových úprav.

4.2.1 Popis měřených vzorků

Testovány byly stejné zkušební DPS, které byly vyrobeny pro experiment 4.1, tzn. DPS s povrchovými úpravami OSP, ENIG a ImSn za použití dvou druhů pájecích past. Na DPS je matice pájených spojů 9x5. Na zkušební DPS je pájen měděný váleček o průměru 1,4mm a délce 6mm, viz obrázek 4.5, kde je zobrazen v připájeném stavu. Vzorky jsou připraveny z kvalitního měděného vodiče. Osazení a pájení probíhalo bezprostředně po oříznutí izolace.



Obrázek 4.5 Zkušební vzorek připájený na testovací pájecí plošce.

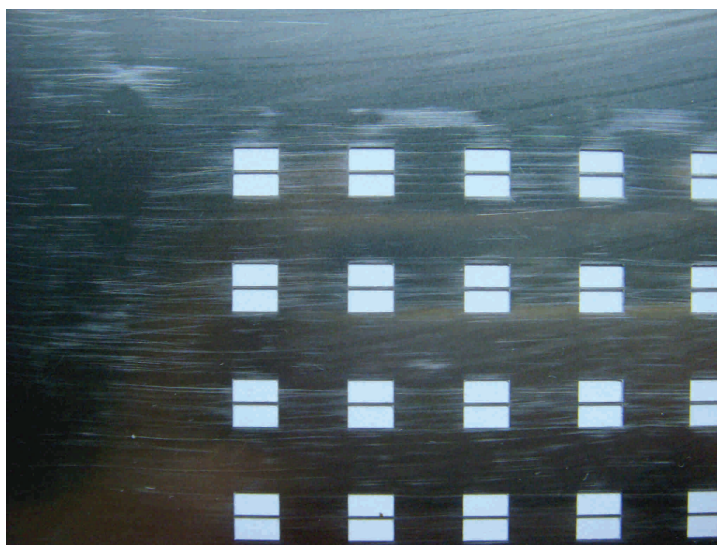
4.2.2 Metodika měření

Intermetalické vrstvy nelze spolehlivě měřit ani pozorovat bez destruktivního zásahu do pájeného spoje. Jediný dostupný postup je metoda příčného řezu – tzv. metalografický výbrus, jeho příprava je popsána níže. Po provedení příčného řezu lze pozorovat a měřit intermetalickou vrstvu a to již při zvětšení 1000x.

Vzorky byly podrobeny izotermálnímu stárnutí 240 hodin/ 125° C a 720 hodin/ 125° C, analyzovány byly i vzorky bez stárnutí.

4.2.3 Příprava a průběh experimentu

Pro experiment byly použity DPS totožné s experimentem měření a výpočtu smáčecího úhlu, tedy DPS s motivem uvedeným v příloze A.1. Také byla vyrobena nerezová šablona pro tisk pájecí pasty o tloušťce 150 μm s motivem, jehož část je znázorněna na obrázku 4.6.



Obrázek 4.6 Fotografie šablony použité pro tisk pájecí pasty.

Doba přípravy experimentu byla poměrně dlouhá, to bylo způsobeno stárnutím, které trvalo 720 hodin, tzn. 30 dní. Osazené a zapájené DPS s povrchovými úpravami OSP, ENIG a ImSn byly izotermálně stárnuty při konstantní vlhkosti 30%. Průběh stárnutí je uveden v tabulce 4.5. Byly měřeny vždy 3 hodnoty ve třech skupinách, bezprostředně po pájení, stárnuté 240 hodin a 720 hodin. Podle [34] 720 hodin stárnutí při 125° C odpovídá osmi rokům provozu zařízení při teplotě 60° C.

Tabulka 4.5 Průběh izotermálního stárnutí.

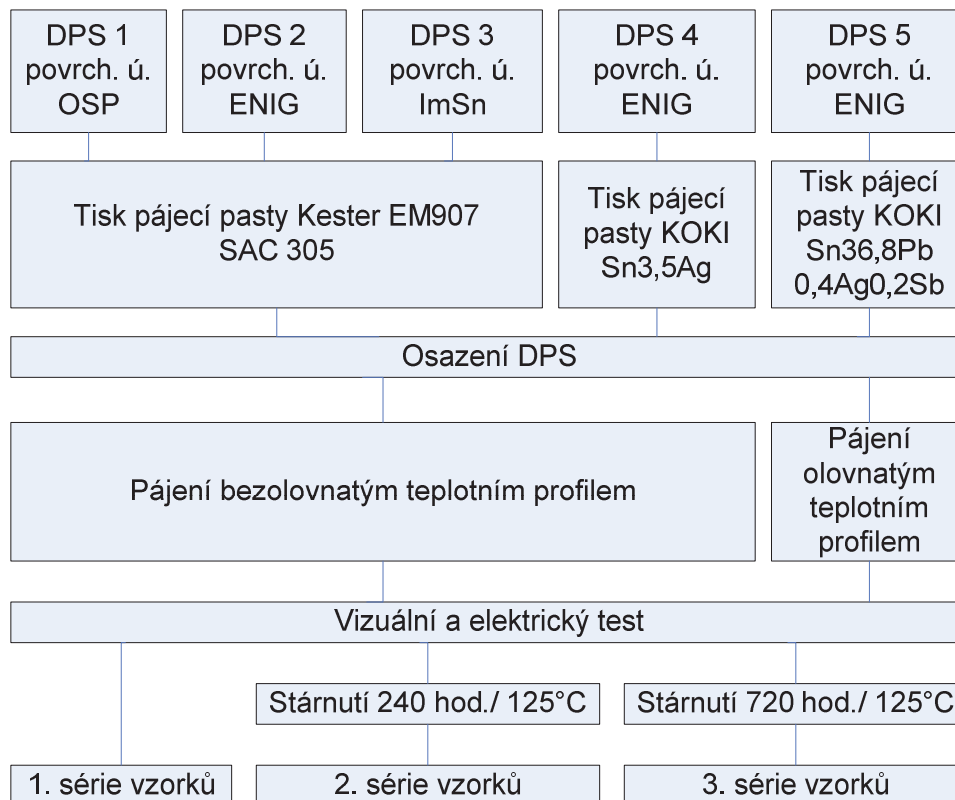
			Teplota 125°C	
Pájka	Povrch. úprava	Po pájení	Čas stárnutí	
SAC	OSP	0 hod.	240 hod.	720 hod.
SAC	ENIG	0 hod.	240 hod.	720 hod.
SAC	ImSn	0 hod.	240 hod.	720 hod.
SnPb	ENIG	0 hod.	240 hod.	720 hod.

Podmínky izotermálního stárnutí byly vybrány na základě nastudovaných podkladů [33], [34]. Bylo přihlédnuto také k faktu, že inovativní metoda měření a predikce chování pájeného spoje, uvedená v poslední kapitole praktické části, je určena především pro náročné aplikace, kde dochází obvykle i k výraznému teplotnímu namáhání elektrotechnických sestav. Po změření všech hodnot byly vypočteny směrodatné odchylky a doplněny fotografie z elektronového mikroskopu. Průběh experimentu je v diagramu na obrázku 4.7.

V tabulce 4.6 jsou uvedeny použité přístroje a materiál.

Tabulka 4.6 Použité přístroje a materiál.

Zařízení/ materiál	Specifikace
Pájecí pec	ERSA ERS 220
Mikroskop	Carl Zeis JENAPHOT 2000 40x – 1000x
Měřicí software	AmScope 3.7
Sítotisk	PBT, Uniprint
Pájecí pasta	Kester SAC 305
Pájecí pasta	KOKI SnPb36,8Ag0,4Sb0,2
DPS	ENIG, ImSn, OSP
Šablona	laserem řezaná nerezová šablona
Klimakomora	Weiss WTL



Obrázek 4.7 Blokový diagram průběhu experimentu.

Příprava metalografického výbrusu

Pro měření tloušťky intermetalické vrstvy je nutné pečlivě připravit vzorky. Jak už bylo zmíněno, vrstvu lze nejlépe pozorovat z řezu, k sledování řezu je nutné připravit metalografické výbrusy. V následujícím textu je popsán použitý postup přípravy:

Extrakce vzorku z DPS

Vzorek byl opatrně vyříznut z DPS lupínkovou pilkou a označen.

Preparace vzorku

Byla použita technika preparace zaléváním. Vzorek byl uchycen do klipu a vložen do silikonové formy (s aplikovaným separátorem), která byla vložena do tlakové nádoby.

Pro zalití vzorků do forem byl použit Varikleer (Buehler), dvousložková (prášek + kapalina, 2:1) zalévací hmota s vysokou zatékavostí. Dávkování bylo prováděno odvažováním.

Po zalití je důležité vysát z forem vzduchové bubliny, pro odsátí byla použita podtlaková nádoba s vývěvou. Doba odsávání – 1 min.

Po odpojení odsávání je nutné nechat dokončit reakci probíhající ve vytvrzované zalévací hmotě. Doba trvání – 10 min.

Po vytvrzení hmoty je nutné vzorek pečlivě popsat a vysunout z formy.

Broušení vzorku

Broušení je proces plošného odběru materiálu za účelem dosažení minimální drsnosti povrchu. Broušení probíhalo pod vodou při použití následujících drsností brusných papírů:

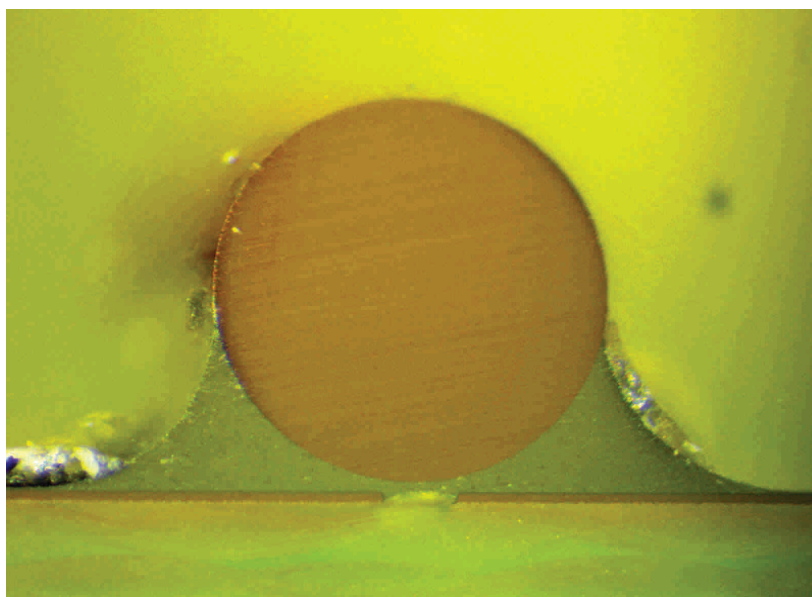
- zrnitost 220 – používala se pouze k probroušení-se na střed pájeného spoje, oplach,
- zrnitost 600 – broušení s délkou 30s, oplach,
- zrnitost 1200 – broušení s délkou 30s, oplach,
- zrnitost 2500 – broušení s délkou 30s, oplach.

Leštění vzorku

Pro pozorování vzorku na mikroskopu je nutné zbavit jeho povrch zbylých nerovností po broušení. Pro leštění vzorku byl použit podlepený leštící kotouč, na který byla aplikována 3 μ m leštící suspenze (Buehler), leštění probíhalo za použití lihu.

Vyvolání struktury

Struktura byla vyvolána pomocí leptadla. Složení leptadla: 2% HCl (30%) + 5% HNO₃ (70%) + IPA. Aplikace leptadla – 3s, bezprostředně po vyvolání struktury byly vzorky podrobeny oplachu, sušení a pozorování na digitalizovaném mikroskopu JENAPHOT 2000. Ukázka vzorku v řezu je na obrázku 4.8, fotografie pracoviště pak na obrázku 4.9.



Obrázek 4.8 Ukázka metalografického výbrusu zapájeného vzorku.



Obrázek 4.9 Pracoviště vybavené mikroskopy JENAPHOT 2000 (vlevo) a stereomikroskopem (vpravo).

4.2.4 Výsledky měření

Výsledkem měření jsou tloušťky intermetalických vrstev na rozhraní povrchová úprava – pájka u jednotlivých vzorků, viz. tabulka 4.7. Výsledná hodnota je vždy součet tloušťky Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 . Měření probíhalo vždy na třech vzorcích pro každou délku stárnutí (vzorky označeny 1, 2, 3). Směrodatné odchylky měření jsou uvedeny v tabulce 4.8 a dokládají vyrovnanost jednotlivých výsledků měření.

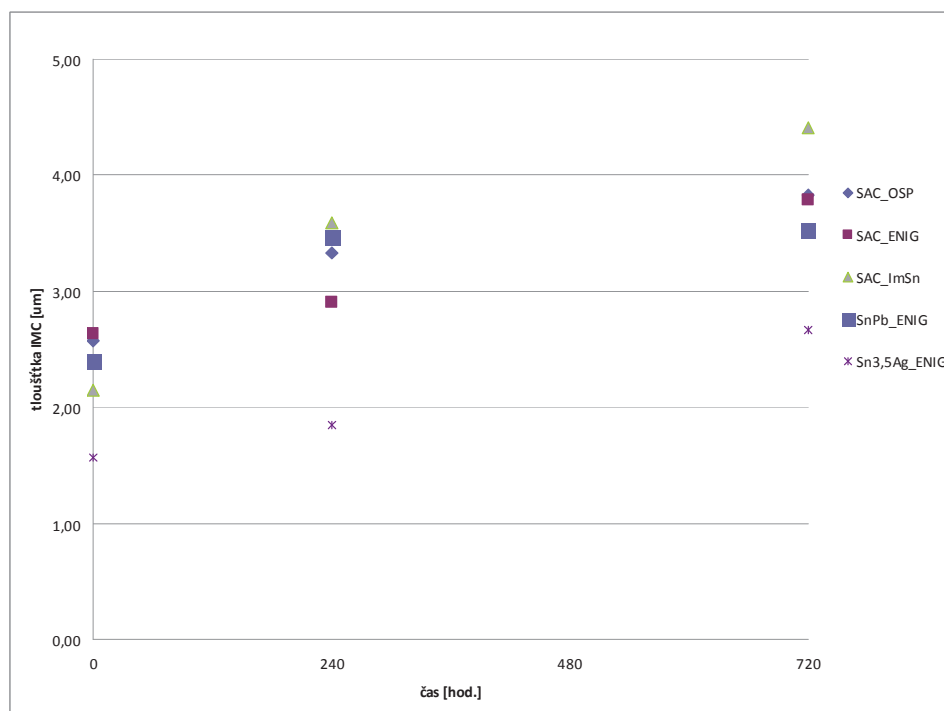
Tabulka 4.7 Výsledky měření tloušťky intermetalických vrstev.

		Po pájení			240 hod.			720 hod.		
		Vzorek 1	2	3	Vzorek 1	2	3	Vzorek 1	2	3
Pájka	Povrch. úprava	tl. [μm]	tl. [μm]	tl. [μm]	tl. [μm]	tl. [μm]	tl. [μm]	tl. [μm]	tl. [μm]	tl. [μm]
SAC 305	OSP	2,51	2,81	2,4	3,23	3,67	3,1	3,95	3,74	3,8
SAC 305	ENIG	2,49	2,5	2,9	2,76	2,95	3	3,6	3,8	3,95
SAC 305	ImSn	2,23	1,9	2,3	3,9	3,56	3,31	4,23	4,6	4,4
SnPb	ENIG	2,4	2,1	2,7	3,72	3,12	3,56	3,7	3,36	3,52
Sn3,5Ag	ENIG	1,5	1,8	1,4	1,9	1,65	2	2,6	2,3	3,1

Tabulka 4.8 Směrodatné odchylky měření tloušťky IMC.

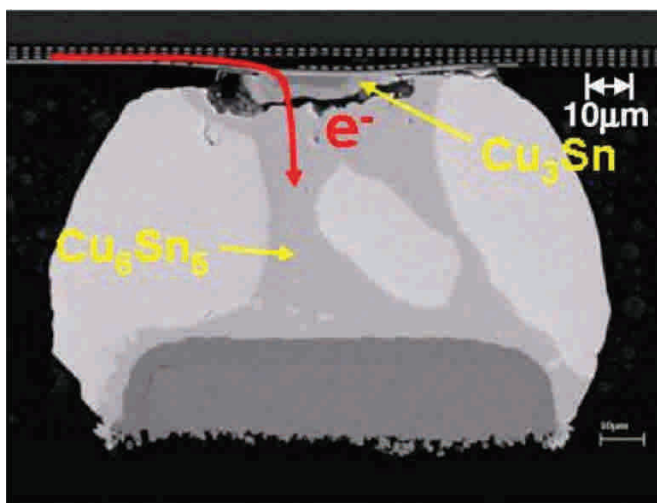
Pájka	Povrch. úprava	Jednotka	Po pájení	240 hod.	720 hod.
SAC	OSP	[μm]	0,173	0,243	0,088
SAC	ENIG	[μm]	0,19	0,103	0,143
SAC	ImSn	[μm]	0,174	0,241	0,151
SnPb	ENIG	[μm]	0,244	0,253	0,138
Sn3,5Ag	ENIG	[μm]	0,169	0,147	0,329

Změřené hodnoty tloušťky intermetalických vrstev jsou vyneseny do grafu na obrázku 4.10. Z naměřených hodnot lze vyčíst, že zatímco tloušťka všech povrchových úprav po 2. stárnutí roste pouze mírně, tloušťka povrchové úpravy ImSn v kombinaci s pájecí pastou SAC 305 roste téměř lineárně dál. Dalším zjištěním je relativně nízká tloušťka IMC vrstvy u povrchové úpravy ENIG v kombinaci s pájecí pastou Sn3,5Ag, která byla následně ověřena i v literatuře.

**Obrázek 4.10 Tloušťky IMC testovaných povrchových úprav a pájek.**

Je nutné podotknout, že intermetalické vrstvy rostou i v závislosti na proudové hustotě procházejícího proudu. Této problematice se věnuje mnoho odborných prací. Vliv proudové hustoty na růst intermetalické vrstvy v řádu mikrometrů byl sledován pouze za extrémních, v provozu nereálných proudových hustot. Například ve studii [41] je popisováno zatěžování pájeného spoje proudovou hustotou $5000\text{A}/\text{cm}^2$ po dobu

400 hodin, současně s izotermálním stárnutím při 140°C. Na obrázku 4.11 je snímek pájených spojů BGA kuličky ze studie [41].



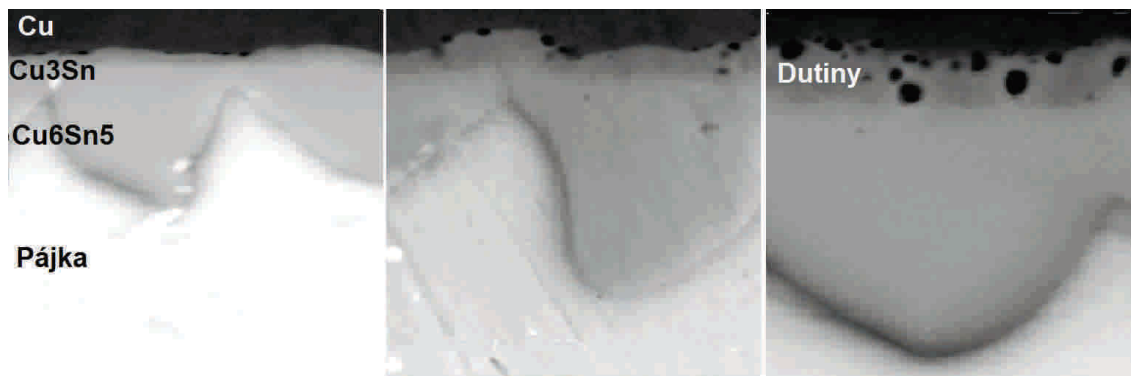
Obrázek 4.11 Obrázek BGA kuličky po působení vysoké proudové hustoty.

4.3 Zjišťování přítomnosti a velikosti dutin

Jak již bylo řečeno, dutiny v pájených spojích mají několik příčin vzniku. Malé dutiny, vznikající na mezifázovém rozhraní se nazývají Kirkedallové voidy. Příčinou jejich vzniku jsou difuzní jevy na rozhraní dvou kovů. Jako první je popsali a experimentálně ověřili Smigelkas a Kirkedall v [40]. Jejich práce dokazuje, že difuzní koeficienty dvou kovů nejsou stejné a jeden kov vždy difunduje do druhého rychleji než je tomu naopak, experimenty prováděli na zinku s mědí. Ani v pájených spojích tomu není jinak.

Jak již bylo zmíněno v předchozím textu, hlavním motorem tvorby dutin na rozhraní jsou difuzní jevy a s tím spojená tvorba a růst intermetalických sloučenin Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 , které rostou již při teplotách od 60°C.

Z obrázku 4.12 je patrné, jak se izotermálním stárnutím urychluje růst dutin v pájených spojích a zároveň tím dochází k úbytku materiálu na mezifázovém rozhraní.



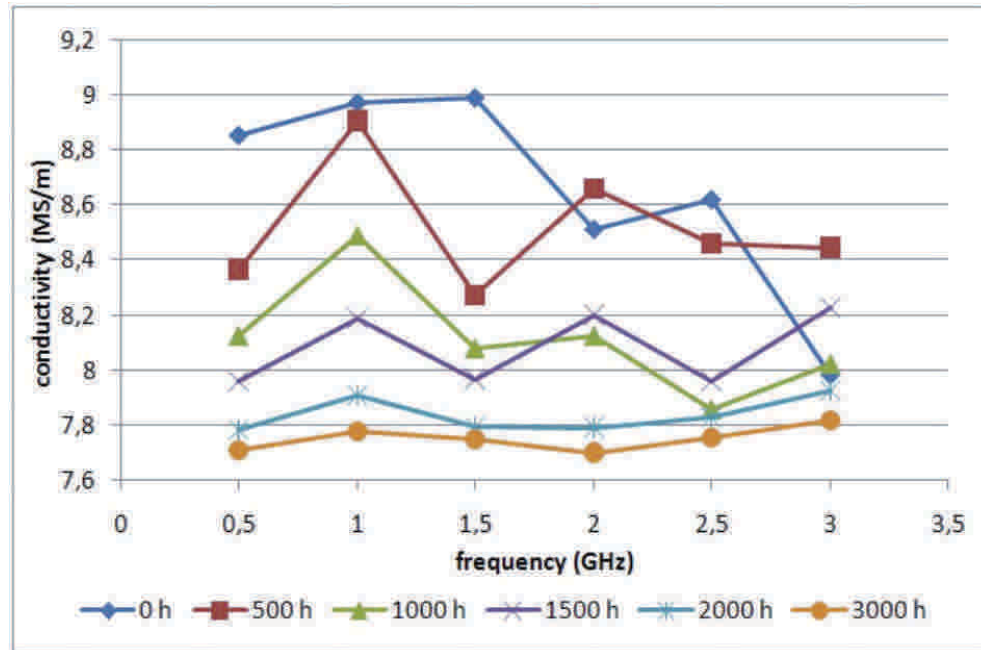
Obrázek 4.12 Vlevo je řez pájeným spojem bezprostředně po pájení, dále pak po 240 hod. a po 720 hod stárnutí při 125°C, pájka SAC 305.

Právě dutiny, které se tvoří přímo na rozhraní pájecí ploška – pájka, tedy v nejkřehčím místě spoje mají za následek postupné snižování pevnosti pájeného spoje. V konečném důsledku lze jejich výskyt a množství diagnostikovat pouze destruktivně – metalografickým výbrusem. Dalším krokem tedy bylo navržení nedestruktivní metody měření, která by vykazovala korelaci s množstvím dutin na rozhraní.

4.4 Měření změn šumu v pájených spojích

Jak již bylo řečeno, pájený spoj by měl vykazovat nízký odpor, nízký šum a vysokou stabilitu v čase. Proč bylo využito měření šumu v pájených spojích k jejich diagnostice? V literatuře existují prekuzory souvislosti tloušťky intermetalické vrstvy, počtem dutin na rozhraní a obecně kondicí spoje, s šumem, který vykazuje pájený spoj.

Mezi konduktivitou a tloušťkou intermetalické vrstvy existuje také souvislost. Závislost konduktivity na frekvenci měření při různých dobách stárnutí, potažmo při různých tloušťkách intermetalických vrstev je podrobně popsáno v [29], kde byla změřena i frekvenční závislost z obrázku 4.13. V grafu je pozoruhodná nepatrná frekvenční závislost konduktivity vzorků. Vzorky byly pájeny pájkou Sn-4Ag. V jiné studii [30] byla měřena konduktivita v časovém rozsahu 0 až 500 hodin, stejnosměrně, kde bylo zjištěno, že se konduktivita po zhruba padesáti hodinách snížila v průměru zhruba o 30% a dále setrvala konstantní.



Obrázek 4.13 Závislost vodivosti na frekvenci, měřeno se stárnutými vzorky [29].

Měření šumu v pájených spojích bylo uskutečněno z důvodu absence referencí k této oblasti. Při rešerši literatury nebyly nalezeny žádné relevantní reference, přitom šum už z principu může ukázat daleko více o pomalých dějích v pájeném spoji než například výše zmíněná konduktivita. Důvodem je skutečnost, že změny šumu se projevují podstatně dříve než změny konduktivity, tato skutečnost byla potvrzena.

Nespornou výhodou této metody je možnost nedestruktivního zjišťování kondice pájených spojů přímo v reálných podmínkách zařízení.

Šumů je několik druhů, pro diagnostiku pájených spojů byl zvolen šum tepelný.

Tepelný šum

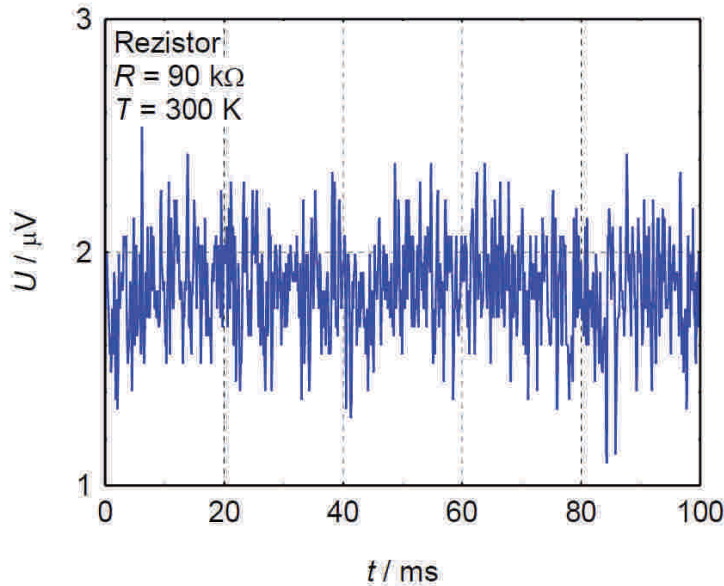
Jde o první objevený a nejznámější typ šumu. V homogenním vodivém či polovodivém materiálu nejsou žádné potenciálové bariéry. Přesto je zde generován šum, i když neprotéká proud. Je to způsobeno tepelným pohybem volných nosičů a mřížky a jejich vzájemnými náhodnými srážkami. Tento jev bývá někdy nazýván jako Brownův pohyb nábojů způsobený tepelnou energií. Na nositele u tohoto šumu nepůsobí žádná vnější síla, a proto je rychlost v každém směru mezi srážkami konstantní.

Důležitým parametrem je spektrální hustota fluktuace napětí, která je vyjádřena ve vztahu 4.5.

$$S_U = \frac{\langle \Delta U^2 \rangle}{\Delta f} = 4kTR, \quad (4.5)$$

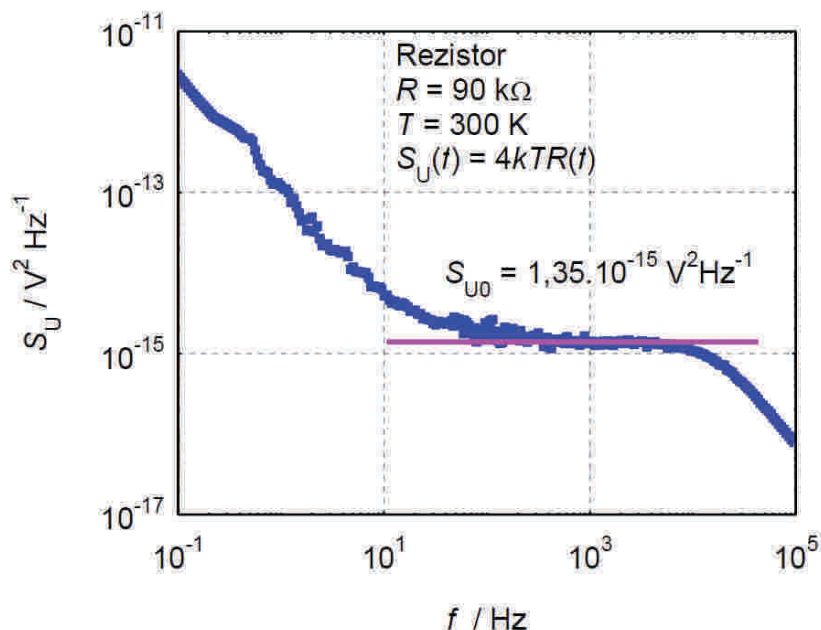
což je Nyquistův vztah pro Johnsonův šum, kde ΔU je fluktuace napětí, k je Boltzmannova konstanta, T je teplota v K a R je odpor.

Na obrázku 4.14 je ukázka časové závislosti fluktuace napětí rezistoru o hodnotě $R = 90 \text{ k}\Omega$ a při teplotě $T = 300 \text{ K}$. Měření šumu u rezistorů je velice blízké měření šumu u pájených spojů.



Obrázek 4.14 Ukázka časové závislosti fluktuace napětí na rezistoru.

Pokud se časový signál převede do frekvenční oblasti a vypočítá se spektrální hustota fluktuace šumového napětí, získá se závislost, která je uvedena na obrázku 4.15. Podle vztahu 4.5 lze vypočítat spektrální výkonová hustota napěťových fluktuací tepelného šumu.



Obrázek 4.15 Spektrální hustota fluktuace šumového napětí na rezistoru.

4.4.1 Popis měřených vzorků

Testovány byly stejné zkušební DPS, které byly vyrobeny pro experiment 4.1, tzn. DPS s povrchovými úpravami OSP, ENIG a ImSn za použití dvou druhů pájecích past. Na DPS je matice pájených spojů 9x5. Na zkušební DPS je připájen měděný válec o průměru 1,4mm a délce 6mm, viz obrázek 4.5, kde je zobrazen v připájeném stavu. Vzorky jsou připraveny z kvalitního měděného vodiče. Osazení a pájení probíhalo bezprostředně po oříznutí izolace.

4.4.2 Metodika měření

Klíčovým problémem bylo nalezení vhodné měřicí metody. Ke spolehlivému a přesnému měření je potřeba nízkošumový zesilovač, oddělený zdroj napájení a izolaci od rušení, nejlépe měřit v uzavřeném kovovém prostoru s konstantní teplotou okolí. Je zde podobnost s měřením biologických signálů u lékařských přístrojů. Úroveň šumu pájeného spoje je velice nízká, měřicí aparatura byla navržena s ohledem na potlačení šumu kontaktů.

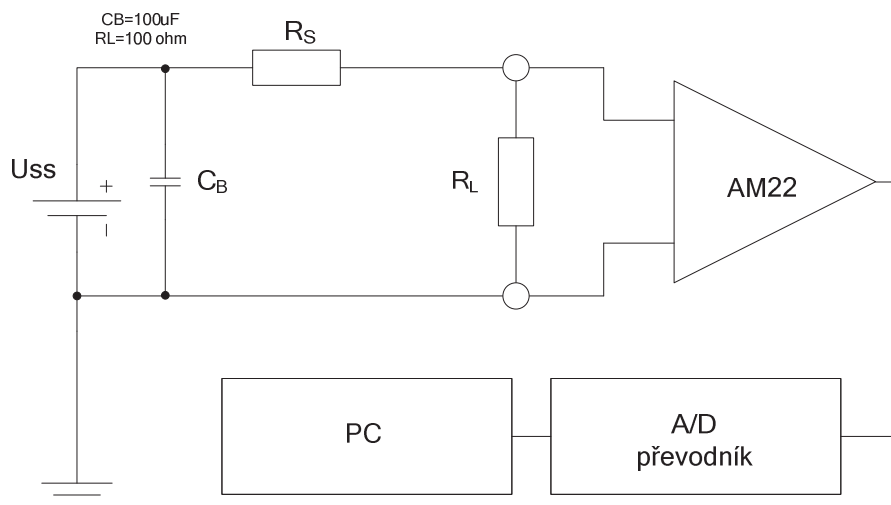
Vzorky byly podrobeny izotermálnímu stárnutí 240 hodin/ 125° C a 720 hodin/ 125° C, analyzovány byly i vzorky bez stárnutí. Průběh izotermálního stárnutí tedy odpovídá tabulce 4.5.

4.4.3 Příprava a průběh experimentu

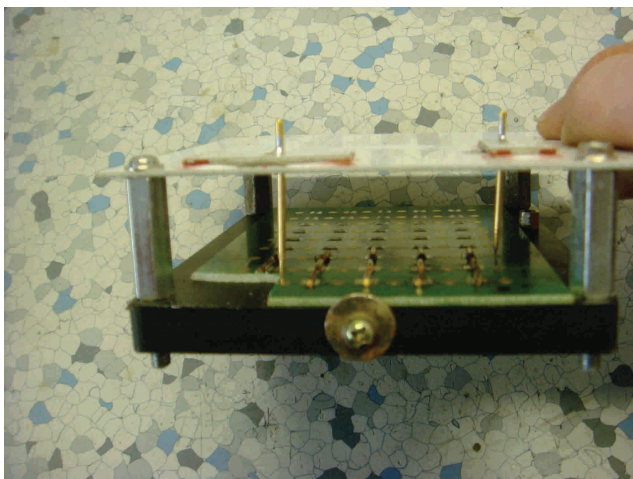
Pro experiment byly použity DPS totožné s předchozími experimenty, tedy DPS s motivem uvedeným v příloze A.1. Na obrázku 4.19 je blokové schéma přípravy vzorků pro experiment. K měření byla použita měřící aparatura zobrazená na obrázku 4.18, její blokové schéma je znázorněno na obrázku 4.16.

Pro připojování vzorků do měřícího obvodu bylo zkonstruováno jednoduché kontaktní „jehlové pole“, viz. obrázek 4.16. Použití jehlového pole bylo nezbytné, kdyby se vzorek vždy pájel do měřeného obvodu, vnášela by se do měření významná chyba. V této konfiguraci je měřeno vždy se stejnými pájenými spoji a systém zaznamenává pouze rozdíly spektrální hustoty fluktuace šumových napětí měřených vzorků.

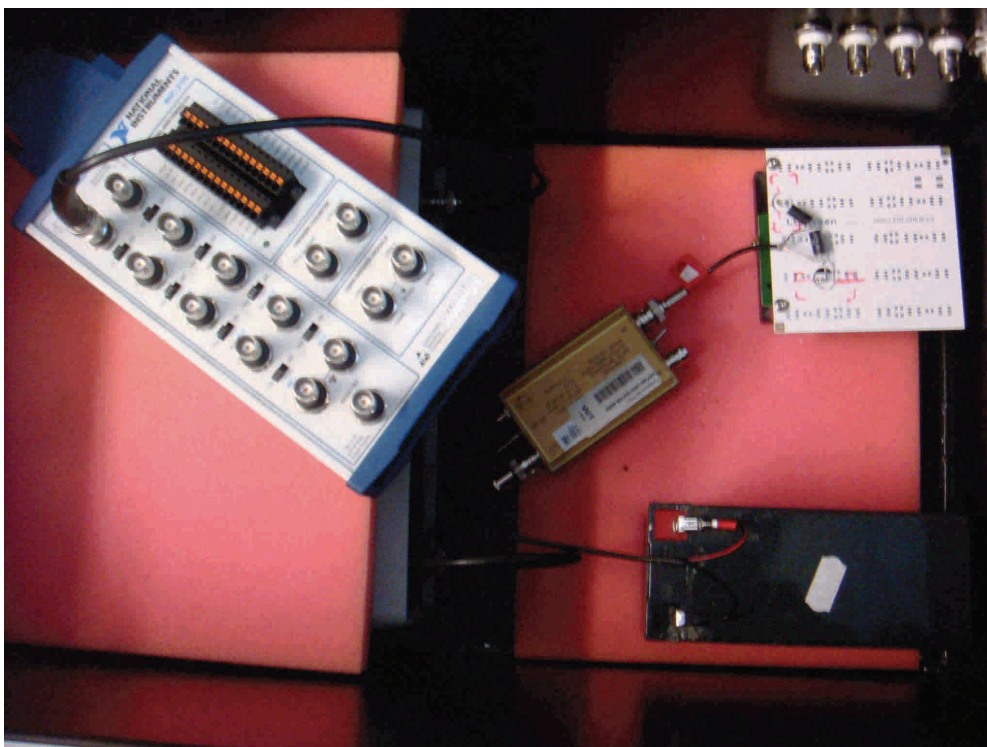
Problémem je jeden požadavek na pájený spoj - nízký odpor. Spektrální hustota fluktuace šumových napětí totiž nelze měřit na vzorku s nulovým odporem. Do obvodu byl proto vložen velice přesný nízkošumový odpor a bylo změřeno takzvané pozadí aparatury.



Obrázek 4.16 Blokové schéma měřící aparatury.



Obrázek 4.17 Kontaktní pole, které bylo použito pro připojování vzorků do obvodu.

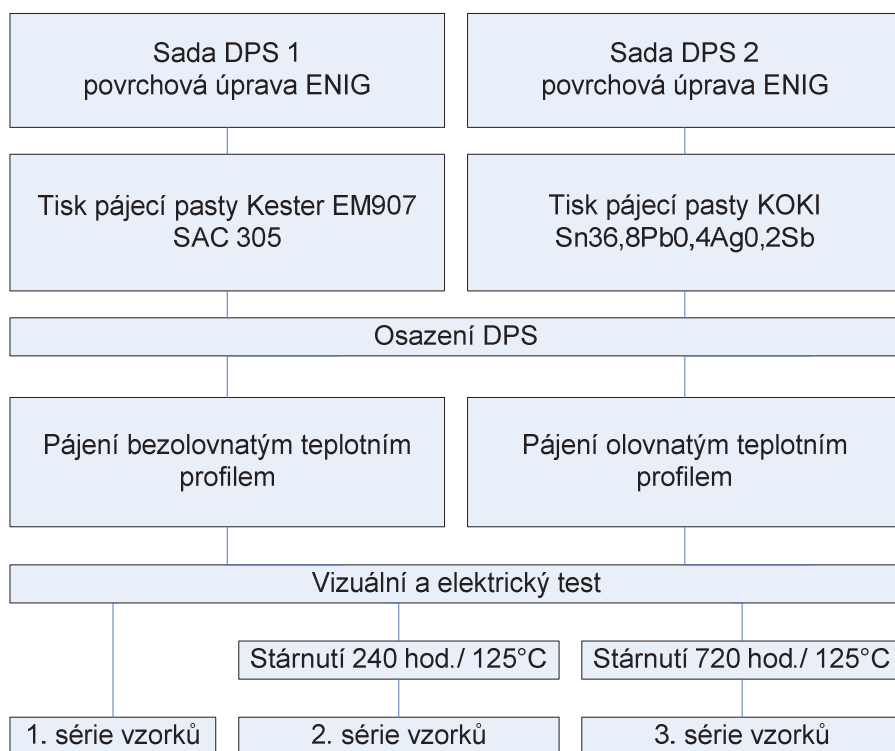


Obrázek 4.18 Fotografie měřící aparatury.

V tabulce 4.9 jsou uvedeny použité přístroje a materiál.

Tabulka 4.9 Použité přístroje a materiál.

Zařízení/ materiál	Specifikace
Pájecí pec	ERSA ERS 220
Zesilovač	Sedlak AM22
Měřicí karta	NI PCI-6115
Sítotisk	PBT, Uniprint
Pájecí pasta	Kester SAC 305
Pájecí pasta	KOKI SnPb36,8Ag0,4Sb0,2
Software	ContMeas
Šablona	laserem řezaná nerezová šablona
Klimakomora	Weiss WTL



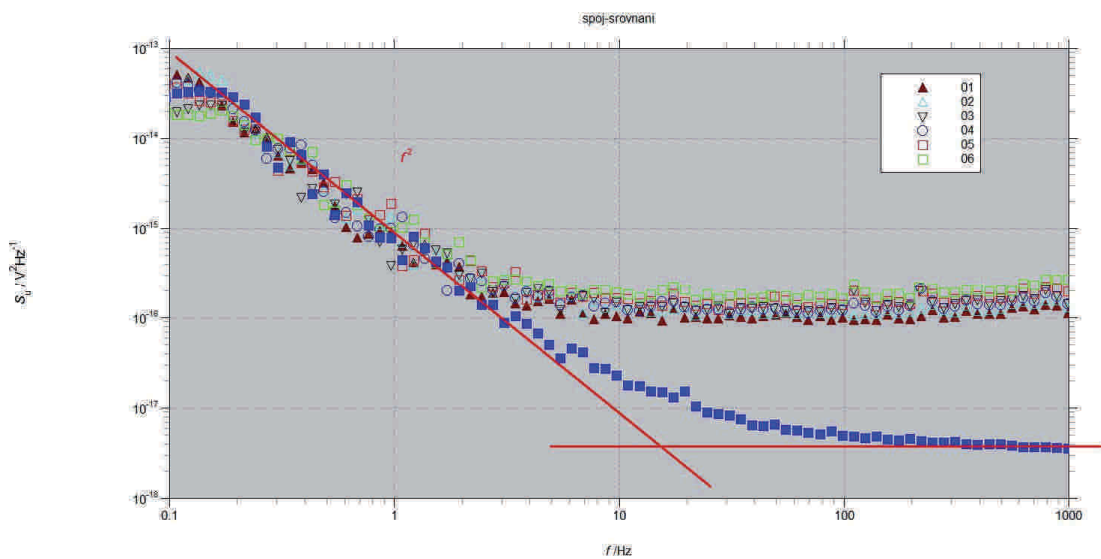
Obrázek 4.19 Blokový diagram přípravy vzorků.

4.4.4 Výsledky měření

Výsledky měření lze rozdělit do dvou skupin. V prvním případě byl připraven experiment, který dokazuje, že se úroveň šumu změřeného v pájeném spoji mění s délkou stárnutí vzorků. Na obrázku 4.20 je graf výsledků měření jednotlivých vzorků, v tabulce 4.10 je legenda ke grafu na obrázku 4.20.

Tabulka 4.10 Legenda ke grafu 4.19.

Číslo vzorku	Typ stárnutí
1	SnPb po pájení
2	SnPb, stárnuto 240 h.
3	SnPb, stárnuto 720 h.
4	SAC po pájení
5	SAC, stárnuto 240 h.
6	SAC, stárnuto 720 h.



Obrázek 4.20 Výsledky měření spektrální hustoty fluktuace šumového napětí v pájených spojih.

Modrými čtverci je v grafu 4.20 vyznačena spektrální hustota fluktuace šumových napětí SHFN aparatury, která byla odečtena od změřených výsledků.

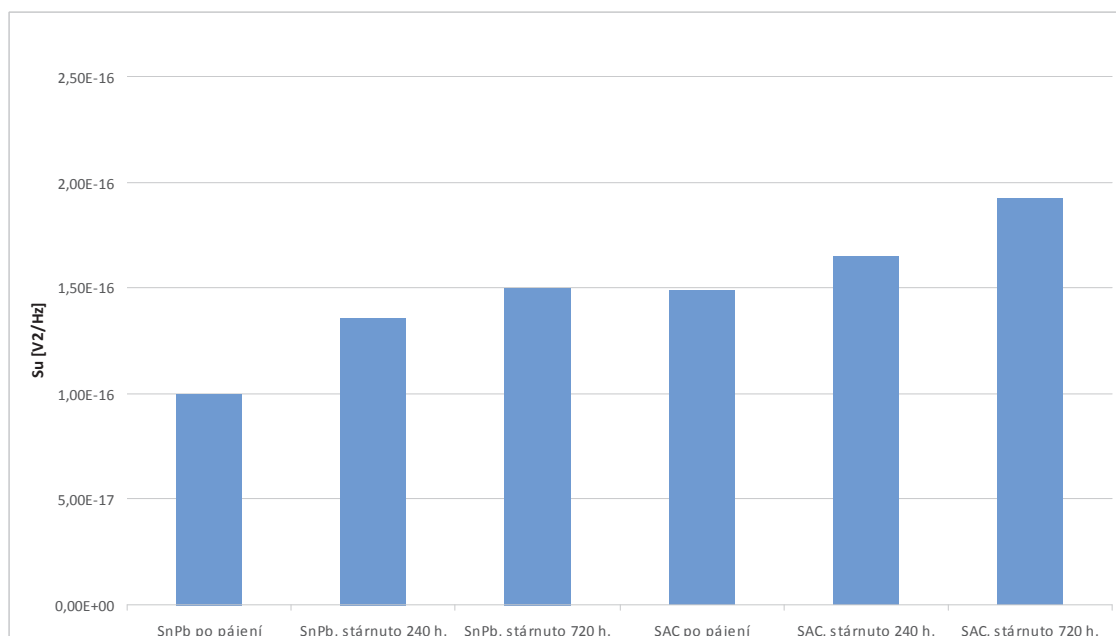
V tabulce 4.11 jsou uvedeny hodnoty SHFN odečtené z grafu při frekvencích 10Hz, 100Hz a 1000Hz. Odečet při různých frekvencích byl proveden z důvodu zjištění stálosti úrovně SHFN. Dále bylo nutné vyhodnotit výsledky, k tomuto účelu jsou v tabulce dopočítány odpory R_X pro jednotlivé frekvence. Výpočet odporu při jednotlivých frekvencích probíhal podle vztahu 4.6.

$$S_U = 4kTR_X, \quad (4.6)$$

kde k je Boltzmanova konstanta, T je teplota v K a R_X je odpor. Pro výpočet byl z rovnice vyjádřen odpor R_X .

Tabulka 4.11 Tabulka odečtených hodnot SHFN a vypočtených hodnot odporu R_x .

	S_U10	S_U100	S_U1000	R_x10	R_x100	R_x1000
	[V ₂ /Hz]	[V ₂ /Hz]	[V ₂ /Hz]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
Šum aparatury	2,26E-17	4,91E-18	3,54E-18	1,38E+03	2,99E+02	2,16E+02
SnPb po pájení	1,00E-16	9,78E-17	1,11E-16	6,10E+03	5,96E+03	6,77E+03
SnPb, stárnuo 240 h.	1,36E-16	1,20E-16	1,28E-16	8,29E+03	7,32E+03	7,80E+03
SnPb, stárnuo 720 h.	1,50E-16	1,23E-16	1,45E-16	9,15E+03	7,50E+03	8,84E+03
SAC po pájení	1,49E-16	1,22E-16	1,42E-16	9,08E+03	7,44E+03	8,66E+03
SAC, stárnuo 240 h.	1,65E-16	1,39E-16	1,97E-16	1,01E+04	8,47E+03	1,20E+04
SAC, stárnuo 720 h.	1,92E-16	1,66E-16	2,68E-16	1,17E+04	1,01E+04	1,63E+04

**Obrázek 4.21** Výsledky měření SHFN, odečteno při 10 Hz.

Z hodnot v tabulce 4.11 je patrné, že SHFN je nezávislá na frekvenci. Z grafu na obrázku 4.21 je zřejmá závislost SHFN na době stárnutí vzorků. Pro srovnání, na obrázku 4.12 jsou snímky řezů z elektronového mikroskopu, které ukazují rozhraní pájecí ploška – pájka u pájeného spoje tvořeného pájkou SAC 305.

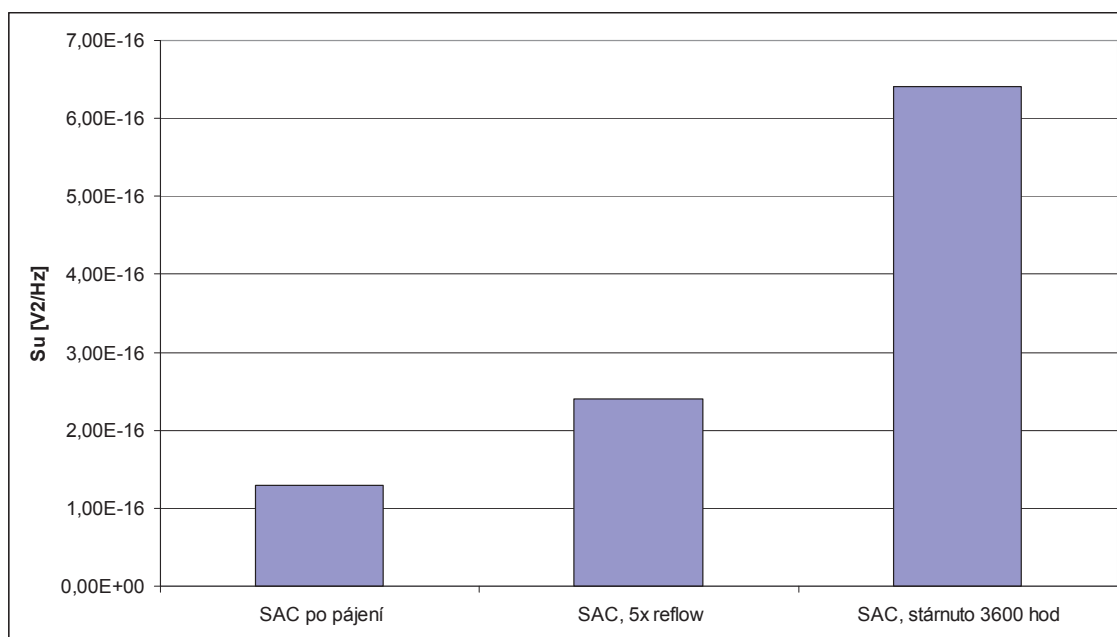
Po zhodnocení výsledků byl navržen ještě jeden experiment s cílem změřit SHFN a úroveň konduktivity u pájených spojů, které jsou již na hranici své životnosti. Byl proveden experiment, kdy byly vzorky podrobeny izotermálnímu stárnutí 3600 hodin při 125°C, kdy došlo k nárůstu tloušťky intermetalické vrstvy až na 16μm, snímek zachycující pájený spoj v příčném řezu je na obrázku 4.22. Na snímku je pouze vrstva Cu₃Sn, která měla tloušťku 6μm. Pájené spoje byly i po vizuální stránce v horší kondici.



Obrázek 4.22 Snímek vrstvy Cu₃Sn.

Elektrický odpor pájených spojů však nejevil známky větších změn. Po mechanické stránce byly spoje velice křehké, měděný válec bylo možné vytrhnout z pájeného spoje pinzetou. Porovnání spektrálních hustot je znázorněno v grafu na obrázku 4.23.

Z metalografických výbrusů vzorků, u kterých bylo ukončeno stárnutí po 1500, 1800 a 3600 hodinách lze usoudit, že u testovaných vzorků je možné považovat SHFN na úrovni $5 \cdot 10^{-16} \text{ V}^2/\text{Hz}$ jako horní hranici SHFN pro spolehlivý pájený spoj. Vyšší hodnoty predikují možné omezení funkce pájeného spoje v blízké budoucnosti.



Obrázek 4.23 Výsledky měření SHFN.

4.5 Měření nelinearity pájených spojů

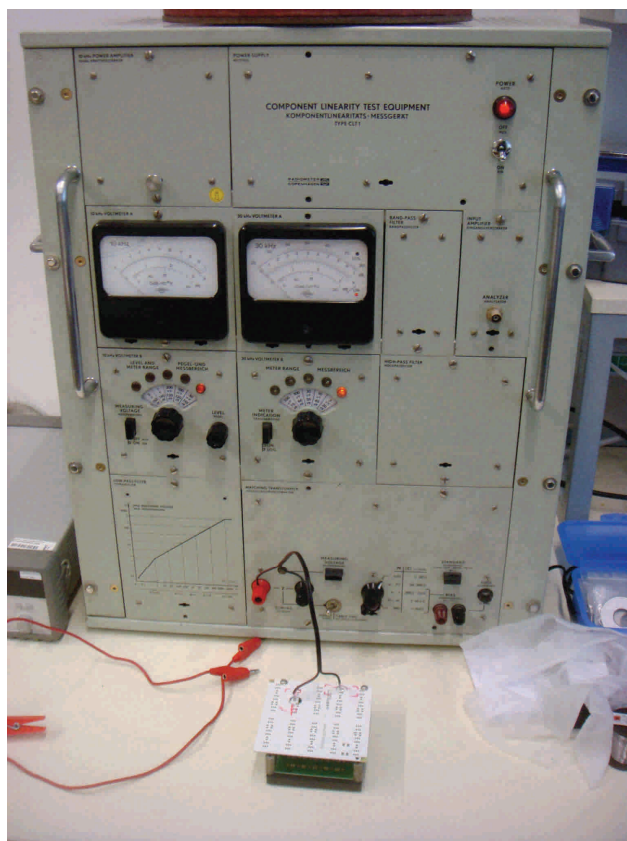
K měření nelinearity pájených spojů bylo přistoupeno z důvodu výsledků studie [29], kde se objevila mírná závislost konduktivity vzorků na frekvenci, viz. obrázek 4.12.

4.5.1 Popis průběhu experimentu

Při měření byly použity shodné vzorky jako v ostatních měřeních. Pro připojování vzorků do měřicího obvodu bylo použito shodné kontaktní jehlové pole jako u měření šumu. Měření probíhalo na aparatuře pro testování linearity, typ CLT1.

Tabulka 4.12 Popis měřených vzorků

			Teplota 125°C	
Pájka	Povrch. úprava	Po pájení	Čas stárnutí	
SAC	ENIG	0 hod.	240 hod.	720 hod.
SnPb	ENIG	0 hod.	240 hod.	720 hod.



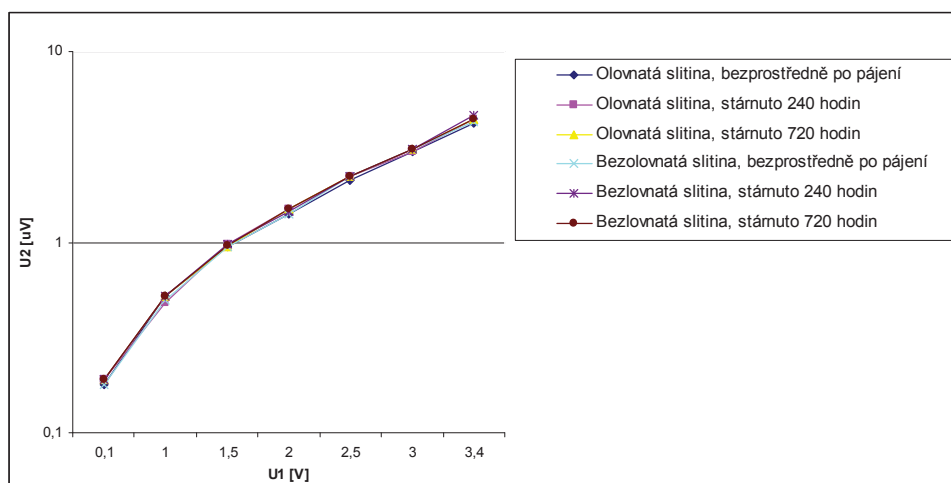
Obrázek 4.24 Měřící aparatura pro testování linearity.

4.5.2 Výsledky měření

Na měřicí aparatuře se nastavovala amplituda napětí 1. harmonické (U_1) při 10kHz a byla odečítána amplituda 3. harmonické (U_3). Změřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.13 a pro názornost zobrazeny v grafu na obrázku 4.25. Z grafu jednoznačně plyne, že mezi stupněm stárnutí, potažmo tloušťkou intermetalické vrstvy a linearitou pájeného spoje, neexistuje souvislost, pouze u nestárnutých vzorků došlo k velmi mírným odlišnostem.

Tabulka 4.13 Výsledky měření nelinearity

F=10 kHz	U_1 [V]	0,1	1	1,5	2	2,5	3	3,4
SnPb slitina, po pájení	U_3 [μ V]	0,18	0,50	0,94	1,4	2,1	3	4,2
SnPb slitina, stárnuo 240 hod.		0,19	0,48	0,98	1,5	2,2	3	4,4
SnPb slitina, stárnuo 720 hod.		0,19	0,52	0,95	1,5	2,2	3,1	4,4
SAC slitina, po pájení		0,18	0,5	0,94	1,4	2,1	3,1	4,3
SAC slitina, stárnuo 240 hod.		0,19	0,52	0,98	1,45	2,2	3,1	4,6
SAC slitina, stárnuo 720 hod.		0,19	0,52	0,96	1,5	2,2	3,1	4,4



Obrázek 4.25 Graf závislosti U_3 na U_1 u jednotlivých vzorků.

5 ZÁVĚRY A PŘÍNOSY DIZERTAČNÍ PRÁCE

Dizertační práce je zaměřená na kvalitu pájeného spoje, způsoby diagnostiky a predikci jeho spolehlivosti. Již na počátku studia pájených spojů se ukázalo, že klíčovým problémem bude nějaká nedestruktivní metoda testování stavu pájených spojů. Protože by bylo elegantní měřit testovací pájený spoj integrovaný na reálné DPS, které byla nějakou dobu v provozu a změřit v jakém stavu pájený spoj je. Tento pájený spoj by byl umístěn například na přívodu napájení a tak vystaven všem vlivům, podobně jako ostatní spoje na desce:

- procházejícímu proudu,
- vibracím,
- teplotě,
- atmosféře,
- a ostatním vlivům.

Studiem různých metod diagnostiky pájených spojů včetně aplikovatelnosti matematických modelů bylo přistoupeno k hledání veličiny vhodné k vyjádření stavu pájeného spoje nedestruktivní cestou. Inspirací v hledání bylo nedestruktivní měření polovodičových přechodů nebo například svarů tvořených při připojování vývodů tantalových kondenzátorů. V těchto oblastech bylo zaznamenáno použití spektrální hustoty fluktuace napětí (SHFN) jako nástroj pro nedestruktivní diagnostiku.

Byly vyrobeny zkušební DPS s několika povrchovými úpravami, které byly podrobeny měření tloušťky a měření smáčecího úhlu v kombinaci s několika pájecími slitinami. Poté byly jednotlivými pájecími slitinami připájeny na desky měděné válce a sestavy podrobeny izotermálnímu stárnutí.

Na vzorcích byly po izotermálním stárnutí změřeny tloušťky intermetalických vrstev a pozorovány dutiny na rozhraní pájecí ploška – pájka.

Dále bylo provedeno měření SHFN za účelem diagnostiky pájeného spoje. Toto měření bylo provedeno z důvodu nalezení korelace mezi měřenou veličinou a kondicí pájeného spoje. Cenným výsledkem této práce je zjištění skutečnosti, že zatímco je konduktivita, tzn. i funkčnost pájeného spoje v pořádku a pájený spoj po extrémním stárnutí stále funguje, jeho mechanické vlastnosti jsou již velice špatné a SVH již vykazuje výrazné změny a lze ji tedy považovat za prekurzor dalšího vývoje spolehlivosti pájeného spoje.

Jako poslední bylo doplňkově provedeno měření nelinearity izotermálně stárnutých pájených spojů. Měření bylo realizováno v návaznosti na studovanou literaturu, ale očekávaná souvislost mezi možným vznikem nelinearity a strukturálními změnami v pájeném spoji se nepotvrdila.

Závěry práce

- Byl sestaven přehled defektů, které mohou vzniknout u pájených spojů při technologii povrchové montáže. V přehledu byly definovány příčiny defektů. Zbytek práce se zabývá defekty uvedenými v poslední kapitole: „Defekty způsobené únavou pájeného spoje“.
- Byl sestaven přehled experimentálních zkoušek pájených spojů včetně odkazů na příslušné normy. Pozornost byla věnována jak zkouškám mechanickým, tak i zkouškám, kde je činitelem teplota nebo agresivita prostředí.
- Pro experiment byly navrženy desky plošných spojů (viz. příloha), s povrchovými úpravami ENIG, ImSn a OSP, na kterých byla pomocí rentgenové fluorescence změřena tloušťka povrchových úprav.
- Byl měřen průměr roztečení pájky na pájecích ploškách a vypočítán smáčecí úhel jednotlivých pájecích slitin na povrchových úpravách. Nejnižší smáčecí úhel měla olovnatá pájecí slitina (12°) na povrchové úpravě ENIG. Bezolovnaté pájecí slitiny vykazovaly, podle očekávání, smáčecí od 18° .
- Připájením měděných válců byly vyrobeny vzorky, které byly podrobeny izotermálnímu stárnutí 240 hodin a 720 hodin při 125°C .
- Byly zhotoveny metalografické výbrusy a změřena tloušťka intermetalických vrstev, jako nejnižší byla vyhodnocena tloušťka IMC vrstvy u povrchové úpravy ENIG v kombinaci s pájecí pastou Sn_{3,5}Ag, která se od ostatních lišila o 1 μm .
- Pozornost byla věnována i výskytu dutin na rozhraní povrchová úprava – pájka.
- Pro zjišťování stavu pájeného spoje byla použita metoda měření spektrální hustoty fluktuace napětí (SHFN). U izotermálně stárnutých vzorků 240 hodin a 720 hodin při 125°C SVH korelovala s tloušťkou intermetalické vrstvy. Pro zjištění SHFN u pájených spojů před koncem životnosti bylo provedeno izotermální stárnutí 3600 hodin při 125°C . Pájené spoje byly i po vizuální stránce v horší kondici, elektrický odpor pájených spojů však nejevil známky větších změn. Po mechanické stránce byly spoje velice křehké, měděný válec bylo možné vytrhnout z pájeného spoje pinzetou. SHFN byla proti nestárnutému spoji pětinasobná. Na fotografii rozhraní z metalografického výbrusu byly objeveny rozsáhlé dutiny a tloušťka pouze intermetalické vrstvy dosahovala

16 μ m.

- Pro měření SHFN bylo zkonstruováno jednoduché „jehlové“ kontaktní pole.

Po analýze všech výsledků lze konstatovat, že je možné měření spektrální výkonové hustoty šumu použít pro predikci spolehlivosti pájeného spoje jako metodu, která věrohodně informuje o stavu pájeného spoje i o jeho možném chování v budoucnosti.

Z metalografických výbrusů vzorků, u kterých bylo ukončeno stárnutí po 1200, 1800 a 3600 hodinách lze usoudit, že u testovaných vzorků je možné považovat SHFN na úrovni $5 \cdot 10^{-16}$ V²/Hz jako horní hranici SHFN pro spolehlivý pájený spoj. Vyšší hodnoty predikují možné omezení funkce pájeného spoje v blízké budoucnosti.

Cílem dizertační práce bylo hlubší studium dějů, které se odehrávají při formování pájeného spoje, ale také materiálů, které se těchto dějů účastní. V průběhu studia dějů a postupného vstřebávání problematiky hromadného pájení se hlavním cílem stalo nalezení souvislosti mezi spolehlivostí, potažmo kvalitou pájeného spoje a nějakou veličinou, kterou lze nedestruktivně měřit přímo na pájeném spoji.

Dalším cílem dizertační práce bylo nalezení způsobu využití měřených dat pro predikci spolehlivosti pájeného spoje, dále pak nalezení úrovně, kdy lze považovat pájený spoj za nespolehlivý.

Na základě výsledků dizertační práce lze konstatovat, že cíle práce byly naplněny.

Doporučení pro další vývoj

V dalším kroku by bylo vhodné nějak optimalizovat metodu měření spektrální výkonové hustoty šumu pájených spojů, aby byla komfortněji použitelná v reálné praxi.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] RUŽA, V. *Pájení*, 2. upravené vydání, SNTL/ALFA, 1988.
- [2] STARÝ, J. Disertační práce, *Bezolovnaté pájení - materiállová a procesní kompatibilita v inertní a inertně/redukční atmosféře*. FEKT, VUT Brno.
- [3] WASSINK, K. *Soldering in Electronics*. Ayr, Scotland, Electrochemical Publications Limited, 1984. ISBN 0-901150-14-2.
- [4] STEJSKAL, P. *The Impact of Intermetallic Compounds on Reliability of Solder Joint*. Student EEICT 2008. Brno: Brno University of Technology, 2008, p. 380 – 384. ISBN 978-80-214-3617-6.
- [5] PULLITZ, K., STALTER, K. A. *Handbook of Lead-Free Solder Technology For Microelectronic Assemblies*. New York: Marccel Dekker, Inc. 2004, s. 432. ISBN 0-8247-4870-0.
- [6] BARTH, J. *Lead-Free Soldering*. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. ISBN 978-0-387-68422-2.
- [7] J-STD-001D Standard, *Requirements For Soldered Electrical and Electronic Assemblies*. Bannockburn: IPC, 2005.
- [8] SHENLIANG, S., YAU, Y., FUDALA, J., FARRELL, R., FAN, C., XU, C, WENGENROTH, K., CHEUNG, M., ABYS, J. *Novel OSP coatings for lead-free processes: organic solderability preservative (OSP) coatings are among the leading surface finish options in lead-free soldering because of their excellent solderability, ease of processing, and low cost.(Cover story)*. CircuiTree. BNP Media. 2006. HighBeam Research. 1 Aug. 2014 <<http://www.highbeam.com>>.
- [9] JOHAL, K. *Impact of BulkPhosphorous Content of Electroless Nickel Layers to Solder Joint Integrity and their Use as Gold- and Aluminium- Wire Bond Surfaces*. Proceedings of SMTA Pan Pacific Microelectronics Symposium. 2006.
- [10] LEE, W., NGUYEN, L., SELVADURAY, G. *Solder Joint Fatigue models: Review and Applicatibility to chip scale packages*. Microelectronic Reliability. Vol. 40, 2000, ISSN 0026-2714.
- [11] DUSEK, M., HUNT, C., *Crack Detection Methods for Lead Free Solder Joints*[online]. 3/2004, [cit. 2014-06-01] dostupné z: <http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/matc164.pdf>
- [12] ČSN EN 62137-1-2. *Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1-2: Zkouška pevnosti ve smyku*. 2008.
- [13] VW 80101. *Electrical and Electronic Assemblies in Motor Vehicles. General Test Conditions*.
- [14] Standart IPC-SM-785. *Guidelines for Accelerated Reliability Test of Surface Mount Solder Attachments*. 1992.

- [15] ŠVECOVÁ, O. *Spolehlivost bezolovnatých pájek a vybrané způsoby odhadu jejich životnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012.
- [16] SZENDIUCH, I. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Brno, 2006, ISBN 80-214-3292-6.
- [17] STEJSKAL, P. *Mezioperační kontrola kvality v povrchové montáži součástek*. Brno: 2007. 65 s. Vedoucí diplomové práce: ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [18] HU, Y., LIN, C., KAO, C. *Electromigration Failure in Flip Chip Solder Joints Due to Rapid Dissolution of Copper*. Journal of Materials Research, 18, 2003. 10.1557/JMR.2003.0355.
- [19] KERR, M., CHAWLA, N. *Creep deformation behavior of Sn–3.5Ag solder/Cu couple at small length scales*. Acta Materialia 52. 2004.
- [20] WEINBERG, K., BOHME, T., MULLER, W. *Kirkendall Voids in the Intermetallic Layers of Solder Joints in MEMS*. Computational Materials Science, Volume 45, no. 3, Proceedings of the 17th International Workshop on Computational Mechanics of Materials - IWCMM-17, 2009, p. 827-831, ISSN 0927-0256.
- [21] TOLENO, B. *The effects of Pb-free solder paste formulation on voiding in reflowed assemblies*. [online]. 2005, [cit. 2014-07-05] dostupné z <http://www.emsnow.com/npps/story.cfm?pg=story&id=12376>.
- [22] HILL, M. *IPC-A-610, Revision D*. Northbrook, Illinois, 2000. 420 s. ISBN 1-580982-32-8.
- [23] FELLER, L., HARTMANN, S., SCHNEIDER, D. *Lifetime Analysis of Solder Joints in High Power IGBT Modules for Increasing the Reliability for Operation at 150°C*. Microelectronic Reliability. Volume 48, Issues 8-9, 19th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (ESREF 2008), 2008, p. 1161-1166, ISSN 0026-2714.
- [24] STEJSKAL, P. *Vliv čistících prostředků na smáčení povrchu DPS roztavenou pájkou*. In Elektrotechnika a informatika 2007. doc. Ing. Jiří Hammerbauer, CSc. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2007. s. 93-94. ISBN: 978-80-7043-572- 4.
- [25] VŠCHT [online]. Elektronická skripta VŠCHT Praha [cit. 2014-08-10]. Dostupné z <http://www.vscht.cz/fch/prikladnik/prikladnik/p.12.1.html>
- [26] HORA, P. *Kalibrace snímačů akustické emise impulzní metodou*. 1990. 97s. ČVUT v Praze. Kandidátská disertační práce.
- [27] AMI [online]. Solderability Testing – [cit. 2014-06-10]. Dostupné z: http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0149_stst/.
- [28] Harant, P., Steiner, F. *Testování pájitelnosti metodou smáčecích vah*, Electroscopie, 1/2007, ISSN 1802 – 4564.

- [29] PODZEMSKÝ, J., PAPEŽ, V., URBÁNEK, J., DUŠEK, K. *Influence of Intermetallic Compounds on RF Resistance of Joints Soldered with Lead Free Alloys*. [online]. Radioengineering, VOL. 21, NO. 2, 2012. [cit. 2014-08-15] Dostupné z: http://www.radioeng.cz/fulltexts/2012/12_02_0573_0579.pdf
- [30] MACH, L. *Vliv množství pájky a izotermálního stárnutí na vodivost pájeného spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2012. 45 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý Ph.D.
- [31] MEI, Z. *Lead-free solder interconnect reliability*, ed. Shangguan, D. (Materials Park: ASM International), 1th printing, 2005. ISBN 0-87170-816-7.
- [32] SUGANUMA, K. *Lead-free soldering in electronics. 1th printing*, 2004. ISBN 0-8247-4102-1.
- [33] PAN, J., SILK, J., POWERS, M., HYLAND, P. *Effect of Gold Content on the Microstructural Evolution of SAC305 Solder Joints Under Isothermal Aging* [online]. 2011, 8 s. [cit. 2014-09-05]. Dostupný z: http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1081&context=ime_fac
- [34] PAN, J., SILK, J., POWERS, M. *The Morphology Evolution and Voiding of Solder Joints on QFN Central Pads with a Ni/Au Finish* [online]. 2012, 12 s. [cit. 2014-09-10]. Dostupný z: http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1086&context=ime_fac
- [35] ATOTECH [online]. *Final Finishing* – [cit. 2014-09-10]. Dostupné z: <http://www.atotech.com/products/electronics/final-finishing.html>.
- [36] UMEL FEEC VUT [online]. *Pájení v elektrotechnice* – [cit. 2014-09-11]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pajeni-v-elektrotechnice/>
- [37] STARÝ, J.; ZATLOUKAL, M.; STEJSKAL, P. *Montážní a propojovací technologie*. pracovní verze 90503, 2009.
- [38] STEINER, F., HAMÁČEK, A., SKOČIL, V. *Implementace bezolovnaté technologie pájení v elektronické výrobě*. ElectroScope. 2007, no. 0. ISSN 1802-4564.
- [39] GLOBAL SMT & PACKAGING [online]. Somerset, United Kingdom, 2007 [cit. 20. 4. 2014]. Dostupné z: <http://www.trafalgar2.com/troubleshooter>.
- [40] SMIGELSKAS, A.D., KIRKEDALL, E.O. *Trans AIME* 171 130, 1947.
- [41] Chao, B. H. L., Zhang, X., Chae, S. H., & Ho, P. S. (2009). Recent advances on kinetic analysis of electromigration enhanced intermetallic growth and damage formation in Pb-free solder joints. *Microelectronics Reliability*, 49(3), 253-263.

AUTORSKÉ PUBLIKACE

- [1] STEJSKAL, P. The Impact of Isothermal Aging on Reliability of Solder Joint. Čeká na publikaci.
- [2] STEJSKAL, P. *SUPERCAPACITORS, WETTABILITY OF ELECTROLYTES*. In *SECOND FORUM OF YOUNG RESEARCHERS*. Izhevsk: Publishing House of Izhevsk State Technical University, 2010. s. 403-405. ISBN: 978-5-7526-0442- 3.
- [3] STARÝ, J.; STEJSKAL, P. Solderability *Dependence on Surface Roughness*. In EDS '09. Brno: NOVOPRESS, 2009.s. 271-276. ISBN: 978-80-214-3933- 7.
- [4] STEJSKAL, P. *THE IMPACT OF INTERMETALLIC COMPOUNDS ON RELIABILITY OF SOLDER JOINT*. In STUDENT EEICT 2008, Volume 4. Martin Dražanský, Filip Orság. Brno: Ing. Zdeněk Novotný CSc., 2008. s. 380-384. ISBN: 978-80-214-3617- 6.
- [5] STARÝ, J.; STEJSKAL, P. *Influence of special cleaning compounds on PCBs solderability*. In *ESTC 2008*. Piscataway: IEEE, 2008. s. 117-120. ISBN: 978-1-4244-2814- 4.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$\Delta\alpha$	Rozdíl součinitelů délkové teplotní roztažnosti
ΔT	Rozdíl teploty
h	Výška pájeného spoje
d	Tloušťka difuzní vrstvy
d_0	Tloušťka difuzní vrstvy po pájení
D	Součinitel difuze
k	Boltzmannova konstanta $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
Q	Aktivační energie růstu intermetalických sloučenin
R	Univerzální plynová konstanta $8,314 \text{ J.K}^{-1}\text{mol}^{-1}$
S_U	Spektrální hustota fluktuace šumového napětí
θ	Smáčecí úhel
AE	Akustická emise
BGA	Ball Grid Array, typ pouzdra
DI	Deionizovaná voda
DIG	Direct Immersion Gold
DPS	Deska plošných spojů
ENIG	Electroless Nickel/ Immersion Gold
ENIGEG	Electroless Nickel/ Immersion Gold/ Electrolytic Gold
FR4	Označení základního materiálu plošných spojů
ICT	In Circuit Tester, vnitroobvodový tester
IMC	Intermetallic Compound, intermetalická sloučenina
Imm Ag	Imerzní stříbro
Imm Sn	Imerzní cín
IPA	Izopropylalkohol

HASL	Hot Air Solder Leveling
LCCC	Leadless Ceramic Chip Carrier, typ pouzdra
LLCC	Leadless Leaded Chip Carrier, typ pouzdra
LTCC	Low Temperature Co-fired Ceramic, typ pouzdra
SMD	Surface Mount Device, povrchově montovaná součástka
SMT	Surface Mount Techology, technologie povrchové montáže
SHFN	Spektrální hustota fluktuace napětí
OSP	Organic Solderability Preservative
PBGA	Plastic Ball Grid Array, typ pouzdra
RoHS	Evropské enviromentální regulační směrnice
THT	Trough Hole Technology, technologie vývodové montáže

ŽIVOTOPIS

Petr Stejskal

OSOBNÍ INFORMACE

Datum narození: 1. 4. 1982

Adresa: Ladova 1182
256 01 Benešov

Telefon: +420 720 323 484

Email: stejskal@ledlumen.cz

PRAXE

2011 – dosud LEDlumen

OSVČ, moje vlastní živnost

1/ Provádění analýz a posudků kvality desek plošných spojů, pájených spojů a lisovaných spojů v elektrotechnice.

Zařízení: vytvrzování vzorků ve vakuu, metalografická bruska, mikroskopy (stereomikroskop 40x - 220x, metalografický mikroskop Carl Zeis JEN Aphot 2000 40x - 1000x), spotřební materiál zn. Buehler.

2/ Výroba LED výzbrojí pro výrobce designových svítidel ECO- DESIGN spol. s r.o., výroba vlastních LED svítidel LEDlumen, dovoz a prodej LED diod.

Zařízení: šablonový tisk pájecí pasty (PBT Uniprint), dispenzer, pracoviště pro osazování SMD, přetavovací pece (Inframat 180, ERSA ERS220), pájecí stanice (HAKKO).

2014 – dosud KERS Investment s.r.o.

Technologická příprava, zadávání a organizace vysoce technologicky náročné výroby luxusních uměleckých předmětů.

Externí dodavatel.

2012 – 2014 BTL Medical Technologies CZ, a.s.

Řízení výroby plastových výlisků. Zajišťování dodávek plastových výlisků, jejich kvality. Organizace změn dodavatelů, rozjezd výrob u nových dodavatelů. Organizace oprav forem a rozjezdy forem nových. Výběr a nákup materiálu. Dodávky obalového materiálu.

Externí dodavatel.

2011 – 2012 BTL Medical Technologies CZ, a.s.

Elektrotechnická výroba, projektová technologie. Zajištění mostu mezi vývojem, prototypovou výrobou a sériovou výrobou, zajištění vyrobiteľnosti a příprava výroby. Práce na samostatných projektech. Výběr zařízení AOI, posuzování kvality pájení, ESD kampaň, systémové návrhy na zvýšení kvality, optimalizační školení vývojových pracovníků.

Plný úvazek.

2009 – 2011 Vysoké učení technické v Brně, FEKT

Výuka předmětů pro 3. a 4. ročník prezenčního studia (Plošné spoje a povrchová montáž, Montážní a propojovací technologie). Práce na výzkumných a vývojových projektech, posuzování kvality výroby. Spolupráce s firmami: Jablotron Alarms, PCB Benešov, Čemebo Blansko, Bochemie Bohumín.

Částečný úvazek.

2006 - 2010 SITRONICS Telecom Solutions, Czech Republic a.s., Votice

Elektrotechnická výroba, práce na samostatných projektech. Analýza nové výrobní linky a návrh typů dat vhodných pro sběr a další zpracování. Návrh zavedení systému zlepšovacích návrhů. Technologické úpravy zvyšující kvalitu výroby.

Částečný úvazek.

VZDĚLÁNÍ**2007 - dosud Vysoké učení technické v Brně, FEKT**

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, doktorské studium.

Obor: Mikroelektronika a technologie

Téma disertační práce: Predikce spolehlivosti pájeného spoje

2005 – 2007 Vysoké učení technické v Brně, FEKT

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, magisterské studium.

Obor: Elektrotechnická výroba a management

Téma diplomové práce: Mezioperační kontrola kvality v povrchové montáži součástek

2002 – 2005 Vysoké učení technické v Brně, FEKT

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, bakalářské studium.

Obor: Mikroelektronika a technologie

Téma bakalářské práce: Návrh úpravy pokovovací linky duplex Ni - Cr

1998 – 2002 VOŠ a SPŠ Kutná Hora

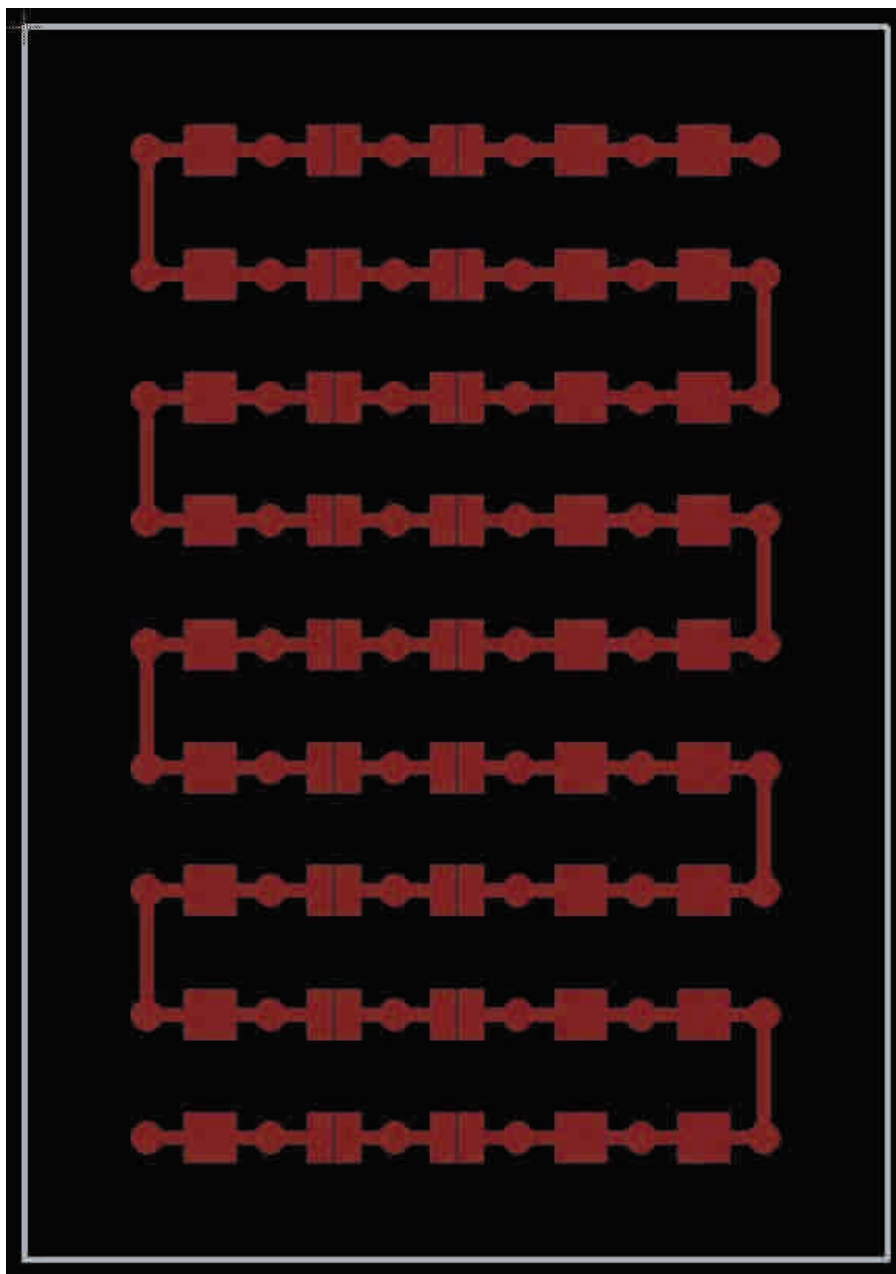
Obor: Automatizace

SEZNAM PŘÍLOH

A	Návrh DPS	81
A.1	Deska plošného spoje - návrh	81
A.2	Deska plošného spoje – foto	82

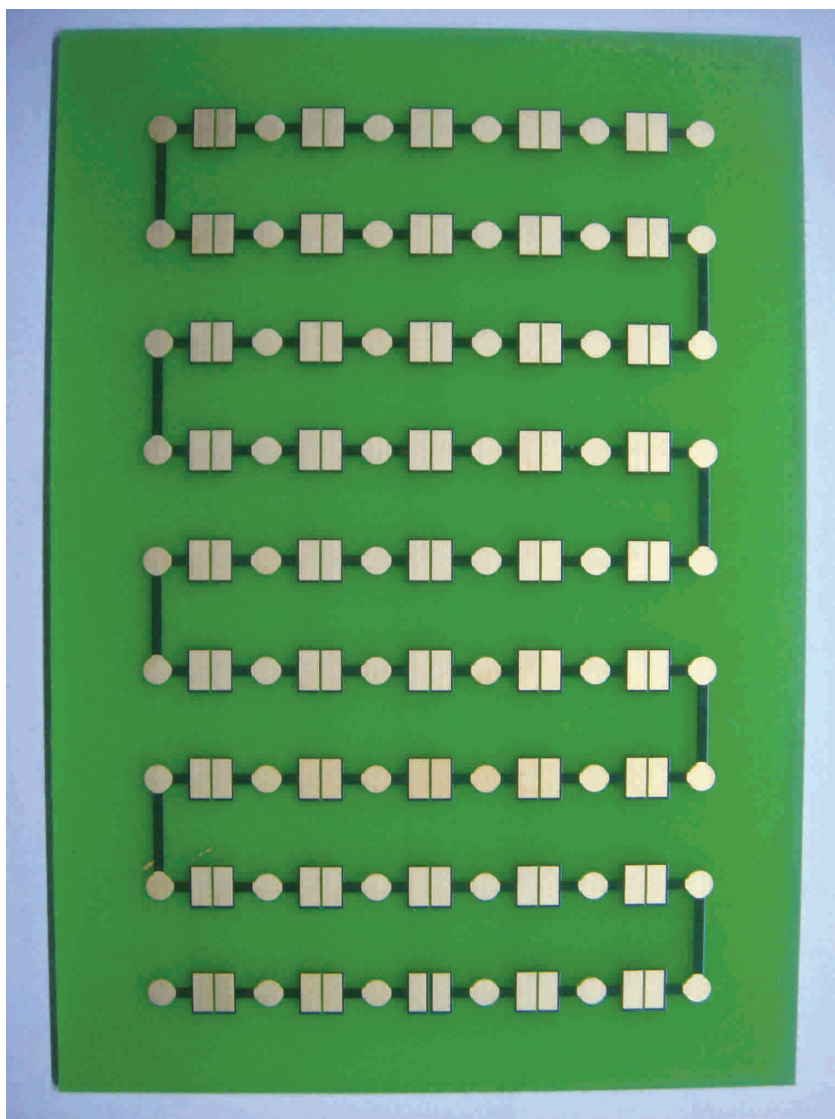
A NÁVRH DPS POUŽITÉ V EXPERIMENTU

A.1 Deska plošného spoje - návrh



Rozměr desky 70 x 100 [mm]

A.2 Deska plošného spoje – foto



Rozměr desky 70 x 100 [mm]