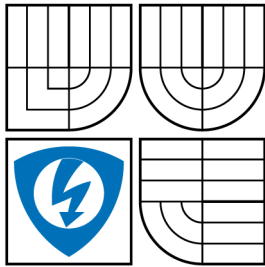
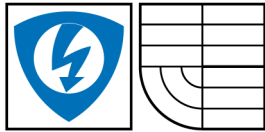


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE



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

ELEKTRICKÁ VODIVOST PÁJENÉHO SPOJE A VLIV NA SPOLEHLIVOST

SOLDER JOINT ELECTRIC CONDUCTIVITY AND SOLDER JOINT RELIABILITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. RADEK LAČNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JIŘÍ STARÝ, PH.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Radek Lačný

ID: 78647

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Elektrická vodivost pájeného spoje a vliv na spolehlivost

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Z dostupné odborné literatury se seznamte s problematikou elektrické vodivosti pájeného spoje a spolehlivosti pájeného spoje.

Navrhněte zkušební testovací obrazec typu Flip Chip 4 x 4 pro sledování materiálových a procesních vlivů.

Navrhněte metodiku sledování elektrické vodivosti pájeného spoje.

Proměřte elektrickou vodivost pájeného spoje ve rozdílných materiálových kombinacích, energetických integrálech pájení, rozdílných výškách spoje. Měření realizujte před a po izotermálním stárnutí i proudové zátěži.

Dosažené výsledky vyhodnotte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 27.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Radek Lačný
Bytem: Nebory 21, Třinec, 739 61
Narozen/a (datum a místo): 7.1.1986 v Třinci

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

Prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Elektrická vodivost pájeného spoje a vliv na spolehlivost

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v* :

- tištěné formě – počet exemplářů2.....
- elektronické formě – počet exemplářů2.....

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 27.5.2010

.....
Nabyvatel

Bc. Radek Lačný

.....
Autor

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou změn elektrické vodivosti bezolovnatých pájených spojů vlivem proudové zátěže a izotermálního stárnutí. V teoretické části jsou popsány faktory ovlivňující elektrickou vodivost pájených spojů, jejich spolehlivost a životnost. Stěžejním úkolem praktické části je návrh metodiky sledování elektrické vodivosti pájených spojů. Cílem měření je pozorování změn elektrické vodivosti po proudové zátěži a izotermálním stárnutí pájených spojů v různých materiálových a procesních kombinacích.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrická vodivost, pájený spoj, bezolovnaté pájení, spolehlivost

ABSTRACT

This work is considered about changes of electric conductivity in lead-free soldered joint's affected by current and thermal stress. The theoretical part describes factors influencing the solder joint electric conductivity and solder joint reliability. The basis of the practical part is the design of the testing method of the soldered joint's electric conductivity. The aim of this part is to measure and observe changes of solder joint electric conductivity after current and thermal stress in various material a procedural combinations.

KEYWORDS

Electric Conductivity, Solder Joint, Lead-free Soldering, Reliability

LAČNÝ, R. *Elektrická vodivost pájeného spoje a vliv na spolehlivost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Elektrická vodivost pájeného spoje a vliv na spolehlivost“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiří Starému, Ph.D. za odbornou pomoc, vstřícný přístup a cenné rady při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Gatema s.r.o. za zhotovení testovacích DPS a firmě SMTplus.CZ s.r.o. za možnost použití jejich vybavení. Děkuji také panu Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za zapůjčení měřících přístrojů.

OBSAH

Úvod	14
1 Teoretický úvod	15
1.1 Pájený spoj	15
1.1.1 Obecné požadavky na pájený spoj	15
1.1.2 Intermetalické vrstvy	16
1.1.3 Bezolovnaté pájení	17
1.1.4 Vybrané povrchové úpravy DPS	20
1.2 Elektrická vodivost pájeného spoje	25
1.2.1 Vliv teploty pájeného spoje na elektrickou vodivost	26
1.2.2 Vliv složení pájeného spoje na elektrickou vodivost	27
1.3 Jakost a spolehlivost pájeného spoje	28
1.3.1 Faktory ovlivňující spolehlivost pájeného spoje	29
1.4 Životnost pájených spojů	31
1.4.1 Stárnutí materiálů	32
1.4.2 Mechanické namáhání	32
1.4.3 Tepelné namáhání	33
1.4.4 Proudová zátěž	33
2 Praktická část	35
2.1 Zkušební testovací obrazec	35
2.2 Výroba prototypové testovací DPS	37
2.2.1 Postup výroby prototypových testovacích DPS	37
2.3 Pájení přetavením	40
2.3.1 Výpočet integrálu energie dodané pájenému spoji	41
2.3.2 Postup při procesu pájení	42
2.4 Metodika sledování elektrické vodivosti pájeného spoje	44
2.4.1 Použité přístroje	44
2.4.2 Průběh vlastního měření vodivosti	45
2.4.3 Povrchové úpravy DPS	46
2.5 Izotermální stárnutí a proudová zátěž	47
2.6 Výsledky a zhodnocení sledování elektrické vodivosti	48
2.6.1 Vliv proudové zátěže	48
2.6.2 Vliv izotermálního stárnutí	50
2.6.3 Porovnání vstupních vodivostí po zapájení	51
3 Závěr	53

Literatura	55
Seznam symbolů, veličin a zkratk	57
Seznam příloh	58
A Příloha č.1	59
A.1 Grafy změn vodivostí po proudové zátěži a izotermálním stárnutí . .	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Schématické znázornění tvorby intermetalických vrstev	16
1.2	Typické PWI parametry pro proces bezolovnatého pájení	20
1.3	Struktura OSP na bázi benzoimidazolů	21
1.4	Příklad fixace OSP na měděném povrchu	21
1.5	Schématický řez pájeným spojem s povrchovou úpravou OSP na DPS	22
1.6	Schématický řez pájeným spojem s povrchovou úpravou Ni/Au na DPS	23
1.7	Ishikawův diagram pro proces pájení [2]	28
1.8	Faktory ovlivňující spolehlivost pájeného spoje	30
1.9	Znázornění vlivu stárnutí a namáhání v intermetalické vrstvě [1] . . .	32
1.10	Znázornění faktorů ovlivňujících životnost pájených spojů	33
1.11	Znázornění degradace pájeného spoje vlivem migrace elektronů [6] . .	34
2.1	Schéma zkušebního testovacího obrazce pro sledování materiálových a procesních vlivů	35
2.2	Rozměry prvků na simulované součástce FC s 2x2 pájecími ploškami	36
2.3	Model simulované součástky FC se zapájenými kuličkami pájky . . .	36
2.4	Osazená a zapájená testovací DPS	38
2.5	Schématický řez modelem zapájené simulované součástky FC	39
2.6	Podélný teplotní profil průchozí přetavovací pece QUAD ZCR 941 . .	40
2.7	Podélný teplotní profil průchozí přetavovací pece QUAD ZCR 941 s vyšším integrálem energie	41
2.8	Přepínač pro měření vodivosti jednotlivých pájených spojů	45
2.9	Změny elektrické vodivosti po proudové zátěži	49
2.10	Rozdílná geometrie a plocha pájecích plošek s povrchovou úpravou Ni/Au	50
2.11	Změny elektrické vodivosti po izotermálním stárnutí při 150°C	51
A.1	Změny elektrické vodivosti po 24h a 72h izotermálního stárnutí na DPS v kombinaci Ni/Au viz. 2.6.	59
A.2	Změny elektrické vodivosti po 24h a 72h proudové zátěže na DPS v kombinaci Ni/Au viz. 2.6.	60
A.3	Změny elektrické vodivosti po 24h a 72h izotermálního stárnutí na DPS v kombinaci Ni/Au (P2V) viz. 2.6.	60
A.4	Změny elektrické vodivosti po 24h a 72h proudové zátěže na DPS v kombinaci Ni/Au (P2V) viz. 2.6.	61
A.5	Změny elektrické vodivosti po 24h a 72h izotermálního stárnutí na DPS v kombinaci OSP viz. 2.6.	61
A.6	Změny elektrické vodivosti po 24h a 72h proudové zátěže na DPS v kombinaci OSP viz. 2.6.	62

A.7	Změny elektrické vodivosti po 24h a 72h izotermálního stárnutí na DPS v kombinaci Ni/Au (Def.) viz. 2.6.	62
A.8	Změny elektrické vodivosti po 24h a 72h proudové zátěže na DPS v kombinaci Ni/Au (Def.) viz. 2.6.	63

SEZNAM TABULEK

1.1	Možné intermetalické sloučeniny [3]	17
1.2	Příměsové kovy používané v bezolovnatých pájkách podle teploty tavení [4]	18
1.3	Vlastnosti vybraných bezolovnatých pájek v porovnání s pájkou SnPb	19
1.4	Přehled konduktivity kovů při 0°C [4]	26
1.5	Přehled teplotních součinitelů u vybraných kovů [4]	26
1.6	Vliv poměru cínu a olova v pájecí slitině na elektrickou vodivost [9] .	27
2.1	Integrály energie dodané pájeným spojům při pájení	42
2.2	Změny elektrické vodivosti po proudové zátěži	49
2.3	Změny elektrické vodivosti po izotermálním stárnutí	50
2.4	Průměrná vstupní vodivost spojů po zapájení	51

ÚVOD

Tato diplomová práce pojednává o sledování změn elektrické vodivosti bezolovnatých pájených spojů. V teoretickém úvodu je popsána problematika pájených spojů, bezolovnatého pájení, povrchových úprav desek plošných spojů a dalších vlivů s pájením souvisejících. V kapitole 1.2 je popsána problematika elektrické vodivosti pájených spojů. Další kapitoly v teoretickém úvodu pojednávají o jakosti a životnosti pájených spojů a také o faktorech ovlivňujících jejich spolehlivost.

Hlavní náplní praktické části je návrh metodiky sledování elektrické vodivosti pájených spojů. Nedílnou součástí je také návrh a výroba testovacích DPS typu Flip Chip pro sledování změn elektrické vodivosti v různých materiálových a procesních kombinacích. Pro účely srovnání změn jsou zvoleny povrchové úpravy DPS chemický nikl/imersní zlato a OSP, různá výška pájených spojů a různé integrály energie dodané pájenému spoji při přetavení. Elektrická vodivost jednotlivých pájených spojů je měřena po zapájení a po 72 hodinách izotermálního a proudového stárnutí. Sleduje se vliv různých povrchových úprav DPS, integrálu dodané energie a odlišných výšek pájených spojů na rychlost změn elektrické vodivosti při izotermálním stárnutí a proudové zátěži.

1 TEORETICKÝ ÚVOD

1.1 Pájený spoj

Pájení je definováno jako způsob metalurgického spojování dvou kovů třetím kovem nebo slitinou kovů. Atomy spojovaných kovů, které jsou na povrchu se při procesu pájení dostanou do styku s atomy roztavené pájky. Vzdálenosti těchto atomů při pájení jsou dostatečně malé, aby se mohl projevit účinek adhézních a kohézních sil. Současně se při pájení rozpouštějí a difundují některé prvky spojovaných materiálů. Vzniká tak mezifázové rozhraní mezi pevným kovem a tekutou pájkou. Ve většině případů vznikají přechodové oblasti o určité tloušťce, které mají odlišné mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti nežli materiály vstupující do procesu pájení. Výsledkem celého procesu je pájený spoj, který má plnit požadovanou funkci, především elektrické a mechanické propojení součástí.

Podle teploty tavení pájky se dělí proces pájení na měkké a tvrdé. Při měkkém pájení je teplota tavení pájky menší než 500°C . Pokud je teplota tavení pájky vyšší než 500°C , jedná se o pájení tvrdé. V elektrotechnickém průmyslu se používá pájení měkké. Obecné požadavky na pájený spoj jsou uvedeny v následující kapitole 1.1.1.

1.1.1 Obecné požadavky na pájený spoj

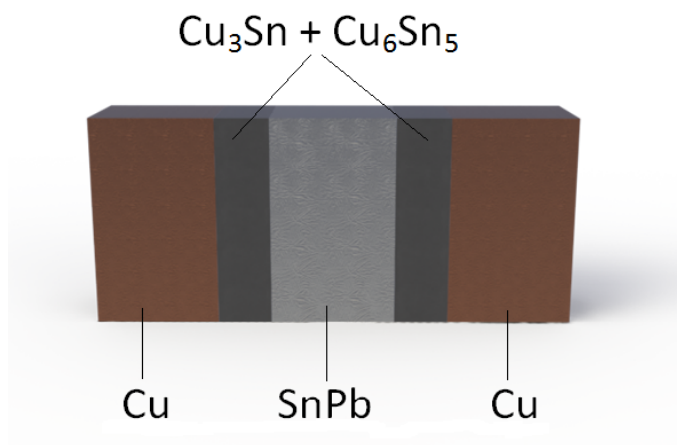
- Mechanická integrita spoje
 - Správný konstrukční návrh spoje
 - Správná volba pájecí slitiny
 - Správný tvar menisků spoje a spoj s minimem dutin
 - Odpovídající pevnost a tažnost spoje
- Tepelné a elektrické vlastnosti spoje
 - Odpovídající elektrický kontakt
 - Odpovídající tepelný kontakt
- Metalurgická stabilita
 - Reakční mechanismy mezi spojovanými kovy a pájkou
 - Sledování reakčních mechanismů v samotné pájce během provozních podmínek
- Environmentální trvanlivost
 - Odolnost vůči korozi

Odolnost vůči oxidaci spoje

- Kompatibilita se statutárními požadavky
- Estetické požadavky [2].

1.1.2 Intermetalické vrstvy

V pájeném spoji Sn-Pb vznikají při přetavení pájky vrstvy Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 . Fáze Cu_6Sn_5 vzniká při teplotě $186^\circ C$ a má formu krystalů, které vytvářejí souvislý povlak. Tato fáze na rozdíl od Cu_3Sn je nepájivá a je zdrojem obtíží se smáčivostí povrchu. Pokud tato fáze vznikne, má tendenci se zvětšovat i za pokojové teploty a může podstatně zhoršit pájitelnost. Pokud je pájený spoj vystaven při provozu vyšším teplotám, rychlost růstu této intermetalické fáze se také zvyšuje. Pozorováním bylo například zjištěno, že u pájky Sn-4Ag-0,5Cu je rychlost růstu tloušťky vrstvy Cu_6Sn_5 při teplotě $170^\circ C$ čtyřnásobná oproti růstu při teplotě $150^\circ C$ [5]. Opatřením může být zvětšení vrstvy pájky na tloušťku minimálně $3 \mu m$, aby vrstva nepronikla na povrch. Pájitelností rozumíme schopnost materiálu být smáčen při určité teplotě a za určitou dobu roztavenou pájkou. Na obrázku 1.1 je znázorněna tvorba intermetalických sloučenin Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 na rozhraní mědi a olovnaté pájky.



Obr. 1.1: Schématické znázornění tvorby intermetalických vrstev

Vznik různých intermetalických sloučenin se odvíjí od použitých materiálů v procesu pájení. Následující tabulka 1.1 popisuje možnosti vzniku jednotlivých intermetalických sloučenin jak v samotné pájce, tak i na podkladové měděné vrstvě v závislosti na použité pájecí slitině.

Tab. 1.1: Možné intermetalické sloučeniny [3]

Slitina pájky	IMC v pájce	IMC na měděném podkladu
Sn-3,5Ag	Ag_3Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-3,4Ag-0,8Cu	Ag_3Sn , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-3Ag-1Bi-0,5Cu	Ag_3Sn , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-3Ag-3Bi	Ag_3Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-0,7Cu	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-9Zn	-	$CuZn$, Cu_5Zn_8 , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-8Zn-3Bi	-	$CuZn$, Cu_5Zn_8 , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Bi-43Sn	-	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , $Cu - Sn - Bi$
Bi-42Sn-0,5Ag	Ag_3Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , $Cu - Sn - Bi$
Sn-5Sb	Sb_2Sn_3	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
In-48Sn	-	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , $Cu - In - Sn$

1.1.3 Bezolovnaté pájení

V minulých letech se k pájení v elektrotechnickém průmyslu používala téměř výhradně olovnatá pájka SnPb nejčastěji ve specifikaci Sn63Pb37 (63% cínu a 37% olova). V roce 2003 vydala Evropská unie směrnici, ve které zařadila olovo a další prvky na seznam materiálů nebezpečných pro životní prostředí. Touto směrnicí EU přinutila většinu firem zabývajících se výrobou elektrotechniky přejít na bezolovnatý proces pájení. Vyjimku k této směrnici obdržely pouze firmy produkující zařízení pro letectví, armádu, automobilový průmysl a další důležité oblasti, ve kterých je spolehlivost pájených spojů kriticky důležitá a přechod na bezolovnatý proces pájení ve stanoveném termínu by mohl přímo ohrozit lidské životy (například v letectví).

Přechod k bezolovnatému pájení nese sebou kromě ekologických výhod také mnohá úskalí především v podobě vyšší teploty tavení bezolovnaté pájky, odlišných materiálových vlastností této pájky v porovnání s olovnatou pájkou a nezkušeností firem s technologickým procesem bezolovnatého pájení. Jelikož jako náhrada olova v bezolovnatých pájkách se používají především drahé kovy, je také výsledná cena bezolovnaté pájecí slitiny vyšší v porovnání s pájkou SnPb. Pro srovnání jsou v tabulce 1.3 uvedeny nejčastěji používané bezolovnaté pájky, jejich teploty tavení a poměr ceny ve srovnání s olovnatou pájkou SnPb. Jako vhodné náhrady olova v SnPb pájkách se osvědčily například prvky indium, bismut, zlato, stříbro, antimon, zinek a další. Jejich přehled společně s teplotami tavení je uveden v tabulce 1.2.

Bohužel tyto příměsi jako In, Zn, Sb a Bi v bezolovnatých pájkách vykazují horší smáčecí charakteristiky. Jejich použití ale významně ovlivňuje teplotu tavení pájecí slitiny a další důležité vlastnosti spoje. Jednotlivé příměsi nízkého procentního

Tab. 1.2: Příměsové kovy používané v bezolovnatých pájkách podle teploty tavení [4]

Příměs v pájce	Teplota tavení (°C)
Indium	156
Cín	231
Bismut	271
Kadmium	321
Zinek	419
Antimon	630
Hliník	660
Stříbro	961
Měď	1083
Nikl	1452
Železo	1528

zastoupení v pájecí slitině mění její vlastnosti následovně:

- Stříbro (Ag) snižuje difúzi ušlechtilého kovu do pájecí slitiny. Jedná se především o terminály hybridních integrovaných obvodů pokryté slitinou Ag. Zvyšuje pevnost a zlepšuje únavové a čistící vlastnosti spoje.
- Antimon (Sb) zlepšuje smáčivost, mechanickou pevnost a odolnost pájeného spoje.
- Bismut (Bi) snižuje bod tavení pájky a vylepšuje vzhledově povrch pájeného spoje pro snadnější vizuální kontrolu.
- Indium (In) upravuje čistící vlastnosti pájky a snižuje její bod tavení.
- Křemík (Si) zlepšuje smáčivost Au a Al a snižuje bod tavení pájky.
- Měď (Cu) snižuje difúzi měděných spojovaných vodičů do roztavené pájky.

Bod tavení bezolovnaté pájecí slitiny je vyšší o 20°C až 45°C v porovnání s konvenčními olovenými pájecími slitinami. Konvenční SnPb pájka dosahuje tekutého stavu již při 183°C, v praxi běžně používané bezolovnaté pájky mají čáru likvidu v rozmezí teplot cca 195°C - 227°C viz. tabulka 1.3. Technologie pájení tedy vyžaduje vyšší teplotu, což negativně ovlivňuje pájené komponenty a přináší další komplikace. Proces přetavení u bezolovnaté pájky probíhá v užším rozsahu teplot a proto je nutné, aby strojní pájení probíhalo s vyšší přesností regulace teploty.

Tab. 1.3: Vlastnosti vybraných bezolovnatých pájek v porovnání s pájkou SnPb

Slitina pájky	Teplota tavení (°C)	Poměr ceny
Sn63Pb37	183	1,00
Sn42Bi58	139	1,45
Sn77,2In20	185	12,91
Sn91Zn9	199	1,36
Sn91,8Ag34	210	2,63
Sn90Bi7,5Ag2Cu0,5	186 - 212	2,15
Sn96,2Ag2,5Cu0,85Sb0,5	213 - 219	2,31
Sn95,5Ag4Cu0,5	218	2,76
Sn95Ag3,5In1,5	218	3,44
Sn93,5Ag3,5Bi3	216 - 220	2,50
Sn96,5Ag3,5	221	2,67
Sn99,3Cu0,7	227	1,47
Sn95Sb5	232 - 240	1,42

Výrobci bezolovnatých pájek doporučují navíc používat při pájení ochrannou atmosféru s dusíkem, která snižuje oxidaci kovových povrchů a eliminuje matnější vzhled spojů (lepší smáčivost). Pro kvalitně provedený pájený spoj je také nezbytně nutné použít vhodné tavidlo. Funkcí tavidla je co nejrychleji a v co největší míře odstranit povrchové oxidy na pájených plochách, zabránit jejich oxidaci při pájení a maximálně podpořit roztékání a smáčivost pájky. Při bezolovnatém pájení je možné použít například bezoplachové tavidlo s označením TSF-6592LV nebo TSF-6852 firmy Kester.

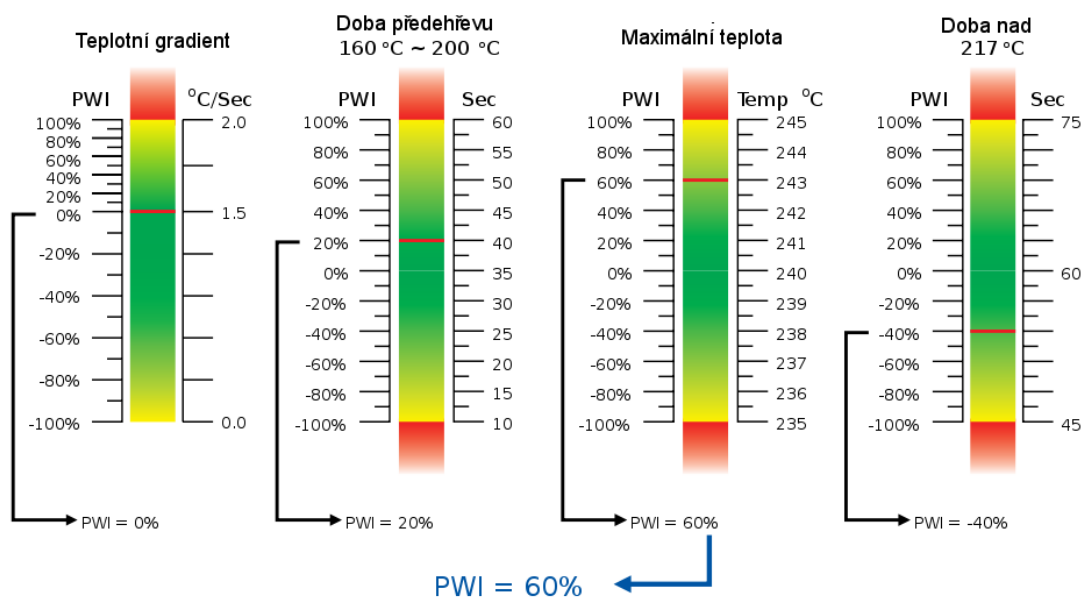
Process Window Index (PWI)

Process Window Index je statistické vyhodnocení, které popisuje důkladnost výrobního procesu zahrnujícího ohřev a chlazení. V elektrotechnickém průmyslu se PWI používá pro kvalitativní popis kalibrace zařízení pro pájení. PWI vyjadřuje procentuálně odchylku od předem statisticky definovaných optimálních parametrů. Na obrázku 1.2 jsou znázorněny typické PWI parametry společně s jejich stupnicí v procesu bezolovnatého pájení.

Pro výpočet PWI se používá následující vzorec 1.1.

$$PWI = 100 \times \max_{[i,j]} \left\{ \frac{\text{measured}_{[i,j]} - \text{limits}_{[i,j]}}{\text{range}_{[i,j]}/2} \right\}, \quad (1.1)$$

kde



Obr. 1.2: Typické PWI parametry pro proces bezolovnatého pájení

- $i = 1$ až n (počet termočlánků),
- $j = 1$ až m (počet statistik pro termočlánek),
- measured značí statistickou hodnotu parametrů i a j ,
- limits značí průměrnou hodnotu maximálních a minimálních limitů parametrů i a j ,
- range značí rozdíl maximálního a minimálního limitu parametrů i a j .

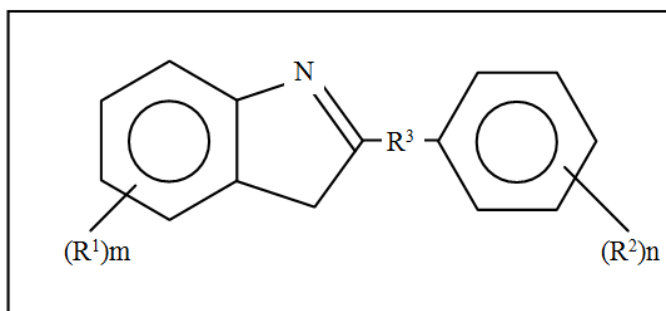
Obecně lze konstatovat, že proces pájení, jenž je ohodnocen PWI v rozmezí -100% až +100% je kvalitativně vyhovující. Nejlepších výsledků je možné dosáhnout s PWI blížící se hodnotě 0 %.

1.1.4 Vybrané povrchové úpravy DPS

Povrchové úpravy slouží k zamezení oxidace měděného pájecího povrchu DPS a k udržení jeho smáčivosti. Nanesením ochranné vrstvy v podobě některé povrchové úpravy se také významně prodlužuje doba skladovatelnosti DPS. V kapitolách 1.1.4 a 1.1.4 jsou podrobněji popsány dvě povrchové úpravy DPS použité v praktické části této diplomové práce.

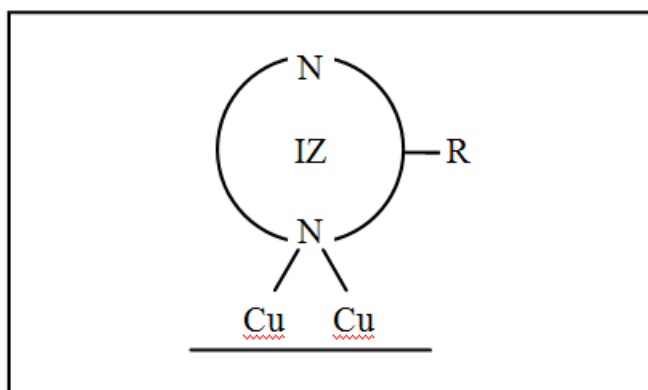
OSP - (Organic Solderability Preservative)

Jedná se o chemickou metodu nanášení organických inhibitorů oxidace mědi na odhalený měděný povrch DPS, zpravidla po tisku nepájivé masky, který reakcí s mědí vytvoří organometalickou vrstvu. Před samotným nanášením ochranné vrstvy OSP se působením ultrazvuku zbaví povrch desek prachových částic vzniklých při formátování a desky pak postupují do čistícího a zaleptávacího modulu, kde dojde k mikrozaleptání a vyčištění pájecích ploch. Po průchodu oplachovým modulem se desky ponoří do lázně OSP. Organický povlak se vytváří pouze na měděných plochách a zabraňuje oxidaci čerstvě zaleptaného povrchu mědi. Po průchodu oplachovým modulem, je deska horkovzdušně sušena a zabalena. OSP chrání pájecí plochy před oxidací po dobu až půl roku v závislosti na skladovacích podmínkách. V OSP lázni se často používají látky na bázi benzoimidazolů viz obrázek 1.3 [2].



Obr. 1.3: Struktura OSP na bázi benzoimidazolů

Vrstva OSP je na povrch mědi fixována slabými Van der Waalsovými silami jak je znázorněno na obrázku 1.4. Tato vrstva je velmi tenká a je téměř neviditelná.



Obr. 1.4: Příklad fixace OSP na měděném povrchu

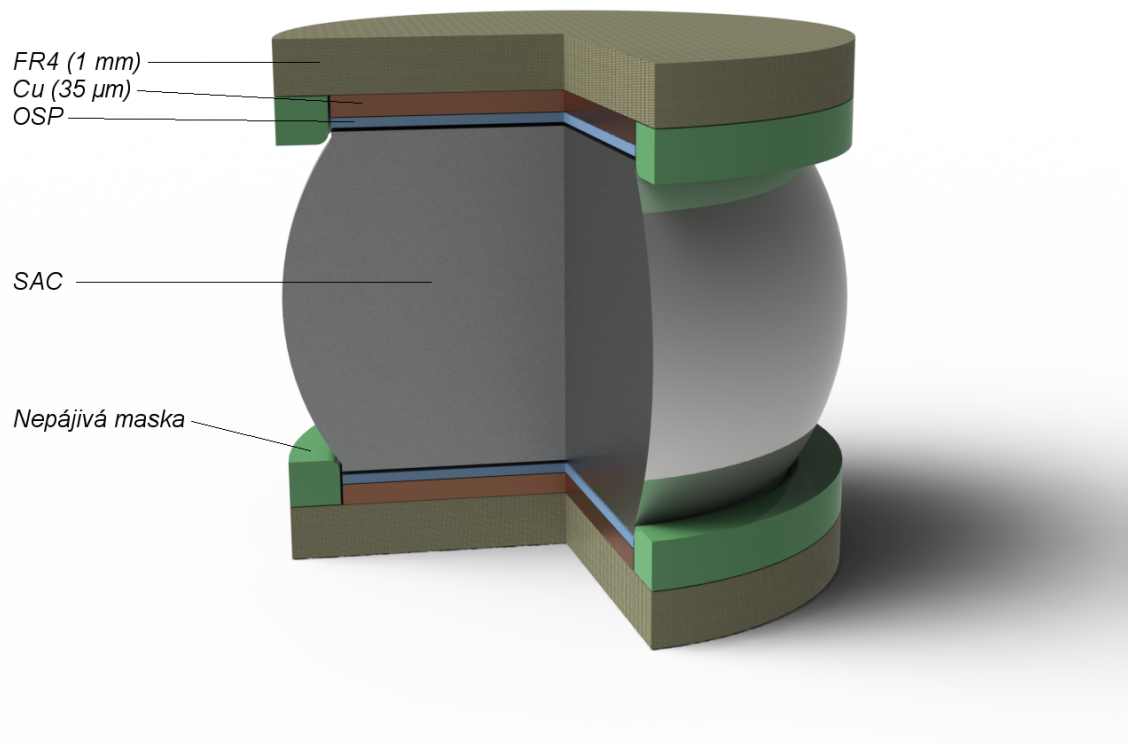
Výhody OSP:

- nízké procesní náklady
- bezproblémová kompatibilita součástek
- bezproblémové osazování

Nevýhody OSP:

- kratší doba skladovatelnosti DPS
- náchylná k poškození
- měnící se vlastnosti po průchodu přetavovací pecí

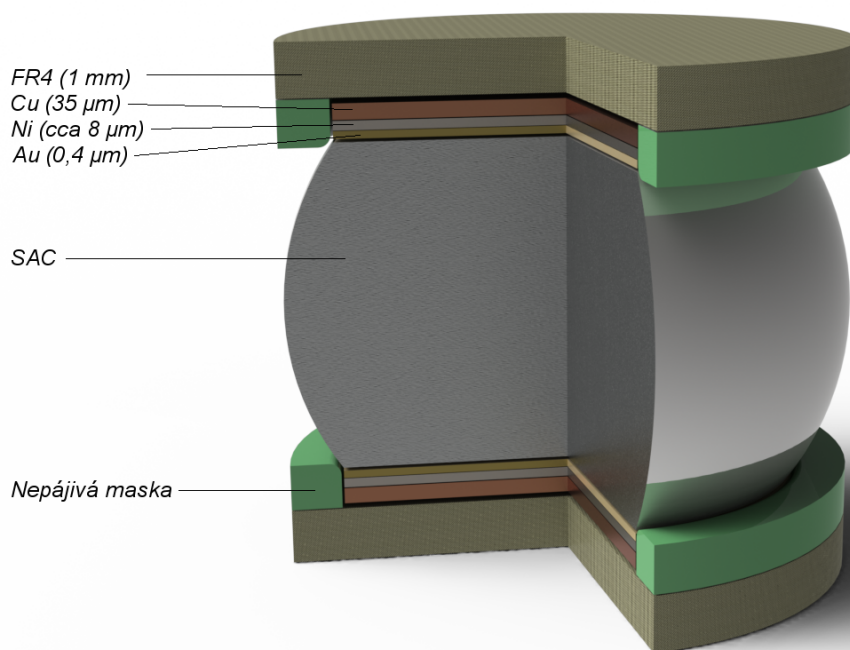
Na obrázku 1.5 je znázorněn schématický řez pájeným spojem typu FC s povrchovou úpravou OSP na DPS. Jako podkladový materiál je použit skloepoxidový laminát typu FR-4. Jedná se pouze o schématické znázornění a jednotlivé vrstvy spoje neodpovídají skutečným tloušťkám. Povrchová úprava OSP je nanесena na obou DPS na obrázku 1.5.



Obr. 1.5: Schématický řez pájeným spojem s povrchovou úpravou OSP na DPS

Chemický nikl/imersní zlato

Při tomto typu povrchové úpravy se na vrstvu niklu, chemicky nebo galvanicky nanesenou na měděném povrchu, nanese tenká ochranná vrstva zlata. Charakteristické vlastnosti niklu (např.: tvrdost, pájitelnost a stejnoměrnost povrchu) činí z tohoto typu povrchové úpravy výbornou alternativu pro použití v širokém spektru elektrotechnických aplikací. Tenká vrstva imersního zlata zajišťuje dobrou pájitelnost povrchu a ochranu vysoce aktivního niklu před oxidací. Ni/Au povrchy mohou beze ztráty pájitelnosti přestát šest i více teplotních cyklů. Šířka vrstvy niklu je zpravidla 3 - 5 μm a šířka vrstvy zlata je zpravidla 0,05 - 0,2 μm v závislosti na technologickém postupu nanášení. Ni/Au povrchová úprava je kompatibilní jak s technologiemi SMT, Flip Chip a BGA, tak také s technologií Through hole. Tento povrch je také kompatibilní s kontaktováním Al drátů. Skladovatelnost DPS s povrchovou úpravou Ni/Au je podstatně vyšší nežli v případě povrchové úpravy OSP a dosahuje až dvou let [1]. Na obrázku 1.6 je znázorněn schématický řez pájeným spojem typu BGA s povrchovou úpravou Ni/Au na DPS.



Obr. 1.6: Schématický řez pájeným spojem s povrchovou úpravou Ni/Au na DPS

Výhody Ni/Au:

- možnost kontaktování

- rovnost povrchu
- delší skladovatelnost DPS

Nevýhody Ni/Au:

- u silnějších vrstev Au difúze zlata z povrchu DPS do spoje
- náročnější technologický proces
- vyšší cena

1.2 Elektrická vodivost pájeného spoje

Základním kvalitativním požadavkem pájeného spoje je jeho dobrá elektrická vodivost po celou dobu životnosti spoje. Samotnou vodivost spoje ovlivňují především materiály tvořící pájený spoj a také technologický proces tvorby pájeného spoje. Významný podíl na negativním ovlivnění elektrické vodivosti pájeného spoje mají intermetalické sloučeniny na rozhraní pájeného povrchu a pájky viz. kapitola 1.1.2. Tyto sloučeniny se tvoří především v průběhu samotného přetavení pájky a pokud vzniknou, mají tendenci s časem růst a tím negativně ovlivňovat elektrické a mechanické charakteristiky pájených spojů. Typickými vlastnostmi těchto sloučenin je křehkost, nesmáčivost a nízká elektrická vodivost.

Elektrická vodivost G je převrácenou hodnotou elektrického odporu R a lze ji vypočítat ze vztahu 1.2.

$$G = \frac{1}{R}, \quad (1.2)$$

kde

- G značí elektrickou vodivost,
- R značí elektrický odpor soustavy.

Pokud jsou známy rozměry měřeného bloku a také jeho přesné složení, je možné vypočítat elektrickou vodivost G ze závislosti na rozměrech a měrné elektrické vodivosti látky podle vzorce 1.3.

$$G = \frac{\gamma \times S}{l}, \quad (1.3)$$

kde

- γ značí měrnou elektrickou vodivost látky,
- S značí obsah kolmého průřezu,
- l značí délku tělesa.

Ze vzorce 1.3 tedy vyplývá, že elektrická vodivost G je přímo úměrná měrné elektrické vodivosti γ a tedy že je do značné míry závislá na materiálech tvořící pájený spoj.

V tabulce 1.4 jsou uvedeny konduktivity vybraných, nejčastěji používaných kovů v elektrotechnice.

Z této tabulky 1.4 je patrné, že rozdíl měrné elektrické vodivosti mezi mědí a cínem je téměř jeden řád. Z toho plyne, že pájený spoj, ve kterém je většinové zastoupení cínu, musí být dimenzován na řádově větší průřez než je průřez měděného vodiče například na DPS, aby se zajistila dostatečná elektrická vodivost celé pájené soustavy a nedocházelo k nadměrnému namáhání spoje.

Tab. 1.4: Přehled konduktivity kovů při 0°C [4]

Kov	Konduktivita (MSm^{-1})
Cín (Sn)	5,9
Hliník (Al)	37
Měď (Cu)	56
Olovo (Pb)	4,8
Platina (Pt)	9,5
Stříbro (Ag)	63

1.2.1 Vliv teploty pájeného spoje na elektrickou vodivost

Při návrhu elektrických obvodů by měla být brána v potaz také provozní teplota elektronických zařízení včetně pájených spojů, jelikož teplota nepřímo úměrně ovlivňuje elektrickou vodivost spojů. Každý vodič má takzvaný teplotní součinitel elektrického odporu α , který vyjadřuje závislost elektrického odporu/vodivosti v závislosti na teplotě. V tabulce 1.5 je stručný přehled některých kovů a jejich teplotních součinitelů elektrického odporu.

Tab. 1.5: Přehled teplotních součinitelů u vybraných kovů [4]

Kov	Teplotní součinitel α ($10^{-3}K^{-1}$)
Cín (Sn)	4,7
Hliník (Al)	4
Měď (Cu)	4
Olovo (Pb)	3,9
Nikl (Ni)	5,8
Platina (Pt)	3,6
Stříbro (Ag)	3,8
Zinek (Zn)	3,8

Jeli známa počáteční vodivost G_0 , teplotní součinitel vodiče α a rozdíl teplot ΔT , lze elektrickou vodivost G při určité teplotě vyjádřit vztahem 1.4.

$$G = \frac{G_0}{1 + \alpha\Delta T}, \quad (1.4)$$

Z tabulky 1.5 je zřejmé, že elektrická vodivost většiny kovů je závislá na jejich teplotě. Například kovy, jejichž teplotní součinitel α je přibližně roven hodnotě $0,004 K^{-1}$ vykazují pokles elektrické vodivosti o 10% při zvýšení teploty o $25^\circ C$. Tato závislost může způsobovat problémy v některých elektronických zařízeních, u kterých

je definována elektrická vodivost spojů a každá změna způsobuje odchylky od regulární funkce zařízení. Například u analogově-digitálních převodníků se tyto změny projeví odlišnými převodními charakteristikami těchto zařízení.

1.2.2 Vliv složení pájeného spoje na elektrickou vodivost

Jak už bylo zmíněno v předešlých kapitolách, elektrickou vodivost pájeného spoje ovlivňuje také složení samotné pájecí slitiny. Pro srovnání jsou v tabulce 1.6 uvedeny elektrické vodivosti SnPb pájky ve srovnání s procentuálním zastoupením jejich prvků v objemu pájky.

Tab. 1.6: Vliv poměru cínu a olova v pájecí slitině na elektrickou vodivost [9]

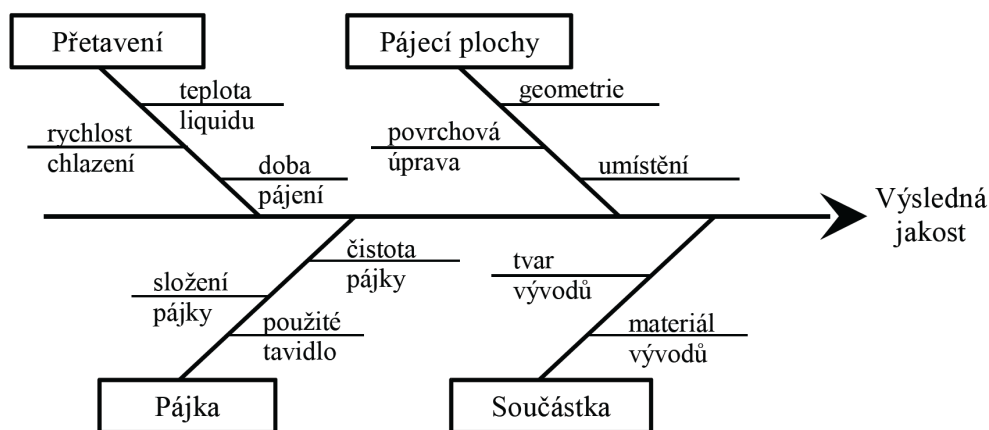
Cín (%)	Olovo (%)	Elektrická vodivost (% IACS)
5	95	8,1
10	90	8,2
15	85	8,5
20	80	8,7
30	70	9,3
50	50	10,9
55	45	11,2
60	40	11,5
63	37	11,8
70	30	12,5
80	20	13,8
85	15	13,6
90	10	13,1

V tabulce 1.6 jsou elektrické vodivosti uvedeny ve tvaru procentuálního poměru k IACS. IACS je standardizovaná konstanta, udávající elektrickou vodivost měkké mědi a její hodnota činí 58 MS/m.

1.3 Jakost a spolehlivost pájeného spoje

Jakost pájených spojů může být posuzována z různých hledisek. Z funkčního hlediska je ve většině případů rozhodujícím faktorem životnost pájeného spoje. Je to doba, po kterou je zaručena spolehlivá funkce, čili elektrická vodivost spoje.

Zachytit všechny technologické faktory působící v procesu pájení je velmi obtížné, avšak alespoň ty nejdůležitější jsou znázorněny v Ishikawově diagramu na obrázku 1.7.



Obr. 1.7: Ishikawův diagram pro proces pájení [2]

Z diagramu na obrázku 1.7 je patrné, že v procesu pájení působí na jakost spoje čtyři základní faktory a to:

- teplotní profil
 - náběh teploty likvidu
 - teplota nad likvidem
 - doba likvidu
 - rychlost chlazení
- geometrie pájecích ploch
 - tvar
 - velikost
 - umístění na substrátu
- materiál pájecích ploch
 - čistota

složení

povrchová úprava

- pájka

složení

čistota

tavidlo

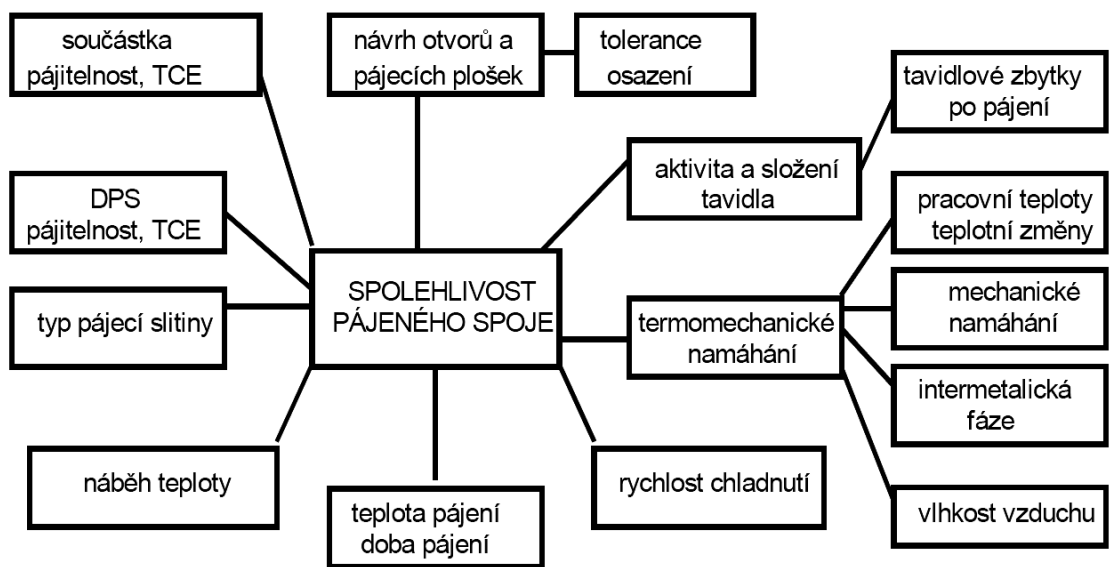
Pokud tedy budou dodrženy všechny předepsané materiálové a procesní faktory při výrobě, výsledkem bude jakostní pájený spoj s velmi vysokou elektrickou vodivostí a dobrými mechanickými vlastnostmi schopný plnit svou predikovanou funkci. Jestliže ale pomineme dodržení byť jen některých technologických faktorů zobrazených v diagramu na obrázku 1.7, výsledkem může být pájený spoj s menší elektrickou vodivostí a horšími mechanickými vlastnostmi.

Jakost pájených spojů v praxi se jen velmi obtížně posuzuje, jelikož je většinou možná pouze optická a základní elektrická kontrola. Mechanické testy se ve většině případů provádí destruktivně, což není v reálné produkci akceptovatelné.

1.3.1 Faktory ovlivňující spolehlivost pájeného spoje

Spolehlivý pájený spoj je základním požadavkem v elektronické výrobě. Ideální pájený spoj je charakterizován konkávním pájecím kuželem, lesklým a hladkým povrchem pájky s dokonale smočeným vývodem součástky i pájecí ploškou/pájecím mezikružím DPS. Takto vizuálně charakterizovaný pájený spoj má i dostatečnou pevnost, která odpovídá úrovni pájecího procesu.[2]

Spolehlivost je dána kompatibilitou pájených i pájecích materiálů a pájecím procesem. Základním předpokladem pro vytvoření spolehlivého pájeného spoje je dobrá pájitelnost všech pájených částí - přívodů součástek a pájecích plošek plošného spoje. Pájitelnost je podmíněna dobrou smáčivostí[2]. Přehled faktorů majících vliv na spolehlivost pájených spojů je znázorněn v diagramu na obrázku 1.8.



Obr. 1.8: Faktory ovlivňující spolehlivost pájeného spoje

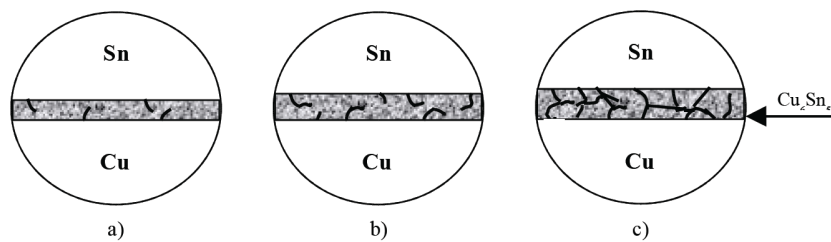
1.4 Životnost pájených spojů

Životnost výrobku je obecně definována jako doba, za kterou se výrobek opotřebuje natolik, že nemůže dále plnit svou funkci. Jelikož životnost většiny výrobků se pohybuje v rozsahu několika let, již v minulosti se u klasických součástek zjišťovala pomocí takzvaných zrychlených zkoušek. Jedná se o simulaci pracovního režimu výrobku za ztížených podmínek (například zvýšené provozní teploty, střídání kladných a záporných teplot a také zvýšené relativní vlhkosti). Tyto podmínky urychlují stárnutí a degradaci a dochází k stimulaci vnitřních jevů v pájených spojkách. Jedná se především o fyzikální procesy difúze a elektrochemický proces koroze. Difúze materiálů se projevuje již zmíněným vznikem intermetalických slitin a jejich neustálým nárůstem. Vzhledem k tomu, že tyto vrstvy vykazují zhoršené elektrické a mechanické vlastnosti, především sníženou elektrickou vodivost a křehkost, vede tento proces k degradaci, a postupně k nefunkčnosti spoje. Elektrochemická koroze mění vlastnosti materiálů spoje, především narušuje jeho homogenitu, zhoršuje adhezi a rovněž vede k jeho destrukci.

Pro testování životnosti pájených spojů je možné stanovit zkoušky teplotními cykly po určitou dobu nebo po určitý počet cyklů. Tyto zkoušky mohou probíhat navíc za zvýšené relativní vlhkosti, např. 95%. Pro simulaci mechanického namáhání, např. pro automobilový průmysl lze využít také vibrace. Sleduje se elektrická vodivost spojů, jejich vzhled a mechanická pevnost pravidelně po uplynutí určité doby, což se vyhodnocuje obvykle pomocí statistických metod.

Z hlediska pájitelnosti a zvláště pak smáčivosti je difúzní jev hodnocen jako pozitivní, neboť svědčí o vlastním vytvoření spoje. Avšak jeho sekundárním jevem je růst intermetalických vrstev. Tato vrstva tvoří bariéru mezi pájkou na jedné straně a kovem na straně druhé. Vznik difúzní vrstvy je z hlediska vytvoření spoje nezbytným průvodním jevem, ovšem s rostoucí tloušťkou snižuje jeho pevnost. Nadměrný růst této vrstvy může být zapříčiněn buď v samotném počátku vzniku spoje při ohřevu (příliš vysoká teplota nebo dlouhá doba ohřevu), nebo ohřevem spoje v průběhu provozu. Nárůst difúzní vrstvy probíhá především na úkor cínu, a tím vlastně dochází k postupnému úbytku samotného pájeného spoje. To způsobuje znatelné zhoršení elektrických a mechanických vlastností spoje, vedoucí postupem času až k jeho nefunkčnosti. Projevující se účinky stárnutí a namáhání v intermetalické vrstvě jsou v průběhu tří časových sekvencí znázorněny na demonstrativním mikroskopickém pohledu na obrázku 1.9. Tloušťka intermetalické vrstvy nejen roste, ale současně se zvětšují i trhliny, postupně se spojují, až dojde k úplné degradaci pájeného spoje [1].

Životnost pájeného spoje je ovlivněna řadou faktorů, z nichž mezi ty nejzákladnější patří:



Obr. 1.9: Znázornění vlivu stárnutí a namáhání v intermetalické vrstvě [1]

- stárnutí materiálů
- mechanické namáhání
- teplotní namáhání

1.4.1 Stárnutí materiálů

Pájený spoj představuje heterogenní dynamický systém, jehož přibližné složení tvoří 75% pájky, 15 - 20% kontaktní plochy na substrátu a 5 - 10% vývod součástky. I když procentuální zastoupení jednotlivých složek může být odlišné, jejich podíl na jakosti spoje může být zásadní. To znamená, že je všem třem složkám podílejících se na pážitelnosti nezbytné věnovat na počátku stejně vysokou pozornost.

Základní otázkou je, jakým způsobem lze životnost spoje určit, resp. jakou životnost pájených spojů lze pro danou aplikaci zaručit. Životnost spoje lze v tomto případě chápat jako dobu, po níž je zaručena spolehlivá funkce spoje.

Stárnutí pájených spojů je zásadním způsobem ovlivněno tvorbou difúzní vrstvy vytvořené na rozhraní cínu a mědi. Tato vrstva na jedné straně potvrzuje, že došlo k vytvoření pájeného spoje, na straně druhé působí negativně na zhoršení jeho vlastností, ať už zvyšováním elektrického odporu spoje nebo postupem času dokonce jeho mechanickým narušením. Difúzní vrstva je tvořena intermetalickými sloučeninami, které mají tu vlastnost, že s časem narůstají, což je výrazně urychlováno působením zvýšených teplot. Běžné tloušťky difúzních vrstev se pohybují řádově v mikrometrech, avšak mohou narůstat až na několik desítek mikrometrů. Takový spoj potom ztrácí své mechanické a elektrické vlastnosti a v určitém okamžiku přestává plnit požadovanou funkci[1].

1.4.2 Mechanické namáhání

Mechanické namáhání dělíme na dva typy a to na:

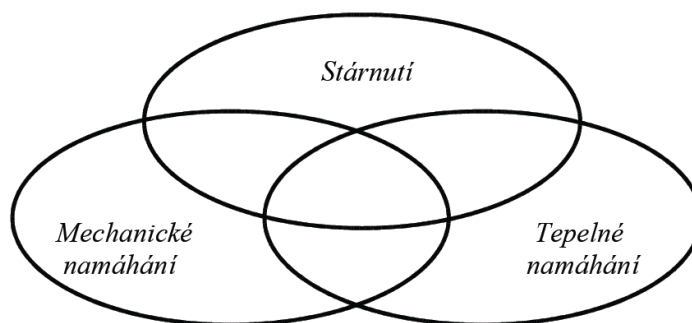
- interní (spoj je namáhán v důsledku vnitřních změn, např. tepelným namáháním)
- externí (spoj je namáhán vnějšími silami, např. vibrace)

K internímu mechanickému namáhání řadíme také creepovou únavu materiálu způsobenou dlouhodobě zvýšenou teplotou (nad 20°C) a vlhkostí okolního prostředí (nad 50%). Mechanické namáhání způsobuje únavu materiálu spoje, která se následně projeví snížením jeho mechanických vlastností a následným mechanickým narušením. V průmyslových odvětvích jako je třeba automobilový a letecký průmysl, kde jsou pájené spoje vystaveny při provozu nadměrnému mechanickému namáhání vlivem vibrací, může mít narušení mechanických vlastností spoje fatální následky.

1.4.3 Tepelné namáhání

Tepelné namáhání je důsledkem tepla působícího na pájený spoj. Může být způsobeno vlivem okolí (například aplikace v automobilovém průmyslu, v topných elektrospotřebičích apod.), nebo vzniká v samotném obvodu jako vedlejší produkt v důsledku vyzařovaného ztrátového výkonu (to je charakteristické pro růst integrace, kdy je ve stále menším objemu vyzařován stále větší výkon formou ztrátového tepla).

Působení tepla vyvolává jevy, které jsou buď nevratné (stárnutí materiálu v důsledku změny struktury, difúze apod.), nebo vratné (změny rozměrů, průhyby materiálu apod.). Z uvedeného je patrné, že všechny tři faktory spolu úzce souvisí, jak je naznačeno na obrázku 1.10.

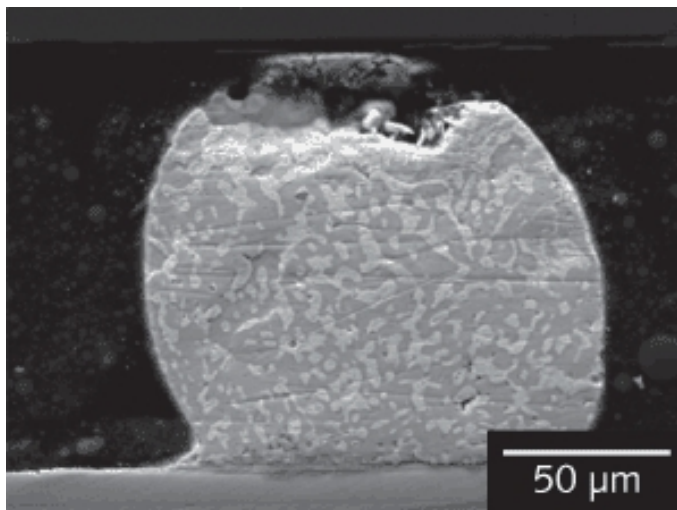


Obr. 1.10: Znázornění faktorů ovlivňujících životnost pájených spojů

1.4.4 Proudová zátěž

Průchod elektrického proudu pájeným spojem způsobuje ve většině případů urychlení jevu stárnutí materiálů především vlivem ztrátového výkonu přeměněného na

tepelnou energii. Pokud je ale proudová hustota v pájeném spoji extrémně vysoká (nad 10^4 Acm^{-2}), může dojít vlivem srážek elektronů k jeho degradaci jak je znázorněno na obrázku 1.11.

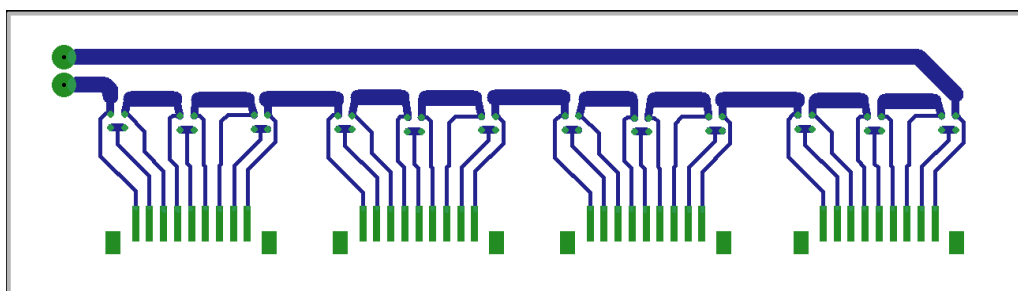


Obr. 1.11: Znázornění degradace pájeného spoje vlivem migrace elektronů [6]

2 PRAKTICKÁ ČÁST

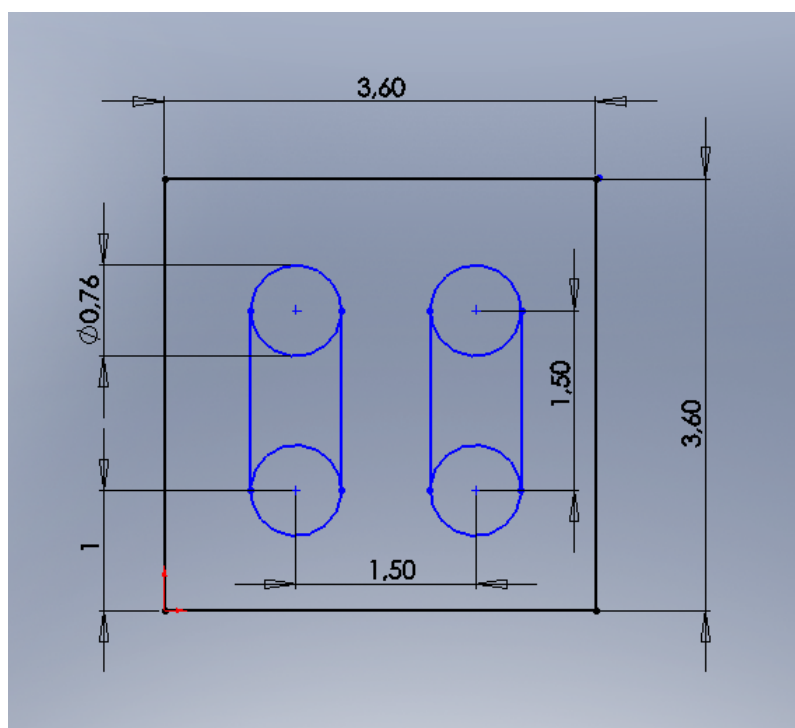
2.1 Zkušební testovací obrazec

Pro sledování elektrické vodivosti pájených spojů byla navržena zkušební DPS znázorněná na obrázku 2.1. Na této DPS je dvanáct polí pájecích plošek 2x2. Jednotlivé propoje mezi pájecími ploškami jsou vyvedeny na devíti-pinové SMD konektory. Všechny pájecí plošky pro kuličky pájky mají kruhový tvar o průměru 0,76 mm.

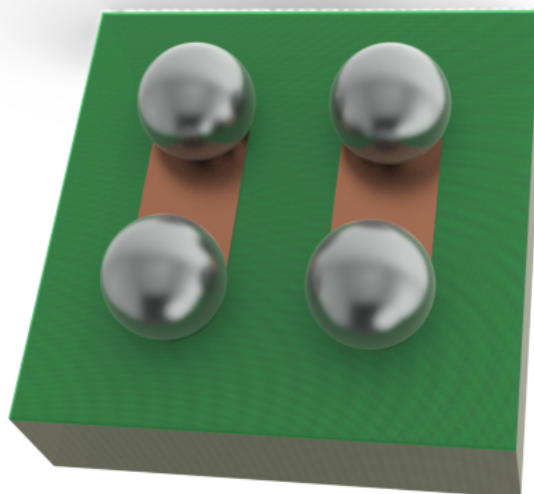


Obr. 2.1: Schéma zkušební testovacího obrazce pro sledování materiálových a procesních vlivů

Na každé toto pole s 2x2 pájecími ploškami se přetavením zapájí simulovaná součástka FC znázorněná na obrázku 2.3. Pájecí plošky jsou vhodně propojeny, aby po zapájení mohl celou zkušební deskou protékat elektrický proud, čímž je umožněno měření pomocí čtyřbodové metody, ale také proudové stárnutí. Měří se vždy sériové zapojení dvou pájených spojů, jelikož realizace desky pro měření jednotlivých spojů by byla technicky velmi náročná. Rozměry prvků na DPS jsou naznačeny na obrázku 2.2. Rozteč pájecích plošek pro devíti-pinové konektory je 1,5 mm. Celkové rozměry zkušební DPS jsou 107 mm x 30 mm.



Obr. 2.2: Rozměry prvků na simulované součástce FC s 2x2 pájecími ploškami



Obr. 2.3: Model simulované součástky FC se zapájenými kuličkami pájky

2.2 Výroba prototypové testovací DPS

Zkušební vzorky desek pro účely vyzkoušení měřící metody byly vyrobeny ve školní laboratoři. Původně byly vyrobeny DPS s 4x4 pájecími ploškami připojenými na jeden měřící konektor a metodika měření byla odzkoušena na těchto deskách. Bohužel v návaznosti na další bakalářské a diplomové práce, byl tento návrh desek postupně modifikován na verzi 3x3 pájecích plošek a finálně se jako nejlepší varianta osvědčila verze s třemi poli s 2x2 pájecími ploškami připojenými na jeden měřící konektor. Tyto modifikace návrhu byly vynuceny z důvodu možnosti mechanických zkoušek těchto pájených spojů. Výsledkem je tedy testovací obrazec znázorněný na obrázku 2.1 a popsán v kapitole 2.1.

2.2.1 Postup výroby prototypových testovacích DPS

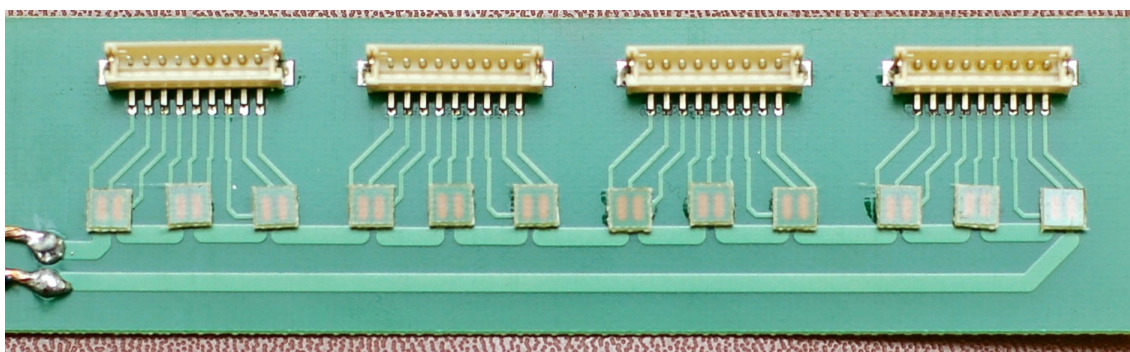
- Vytvoření negativních filmových předloh obrazce testovací DPS, simulovaných součástek FC a nepájivých masek
- Očištění a odmaštění základního materiálu FR-4 plátovaného 35 μ m mědí
- Nalaminování fotorezistu na základní materiál FR-4
- Ustálení fotorezistu (10 minut)
- Osvit DPS po dobu 18ti vteřin na osvitové jednotce.
- Ustálení osvícené DPS (10 minut)
- Vyvolání vodivého obrazce na DPS ve vývojce (uhlíčitan sodný - Na_2CO_3)
- Odleptání exponované mědi z DPS v leptacím roztoku ($\frac{3}{5}$ vody - H_2O ; $\frac{1}{5}$ peroxidu vodíku - H_2O_2 ; $\frac{1}{5}$ kyseliny chlorovodíkové - HCl)
- Opláchnutí DPS
- Odstripování fotorezistu z vodivého motivu DPS v 10% roztoku hydroxidu sodného - $NaOH$
- Opláchnutí a vysušení DPS

Tímto postupem jsem vyrobil testovací DPS. V následujících krocích je popsáno nanesení nepájivé masky na vyrobené DPS.

- Nanesení tekuté nepájivé masky přes síto
- Sušení DPS po dobu 20ti minut při 60°C

- Osvit DPS po dobu 80ti vteřin v osvitové jednotce
- Ustálení osvícené DPS (10 minut)
- Odplavení nepájkivé masky nad pájecími ploškami ve vývojce (uhličitan sodný - Na_2CO_3)
- Sušení DPS po dobu 60ti minut při 130°C

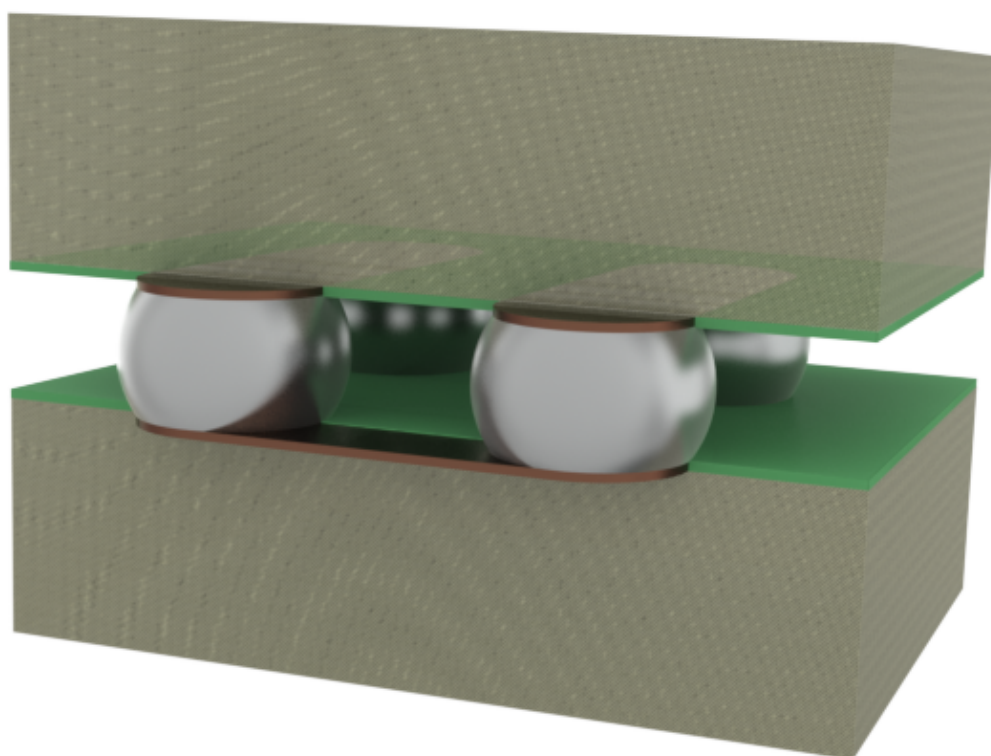
Výsledkem výše zmíněných kroků byly prototypové DPS připravené k osazení kuliček pájky a konektorů a následném zapájení. DPS osazená a zapájená konektory a simulovanými součástkami FC je znázorněna na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: Osazená a zapájená testovací DPS

Na obrázku 2.5 je znázorněn schématický řez modelem zapájené simulované součástky FC. Na tomto modelu je patrné, jak je čtveřice kuliček pájky propojena po zapájení. Spodní část modelu představuje testovací DPS, horní část modelu představuje simulovanou součástku FC.

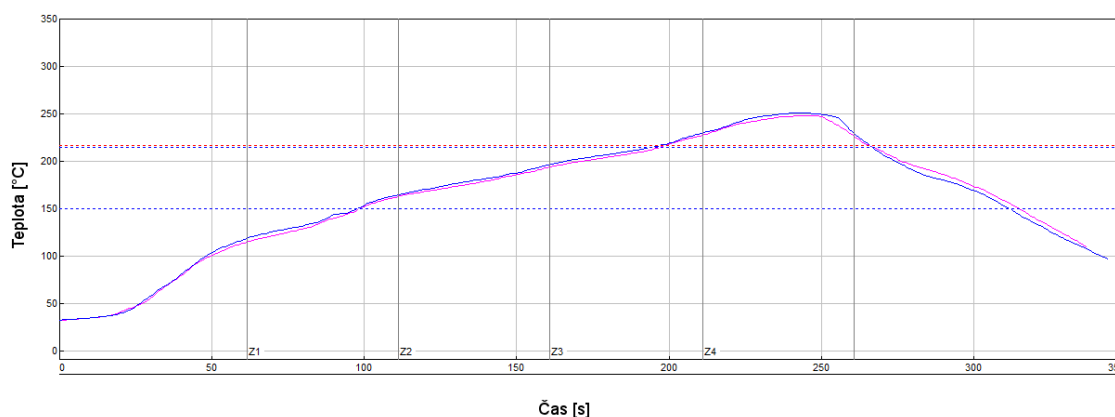
Pro další přesnější měření byla výroba výše zmíněných DPS zadána firmě Gatema s.r.o. v Boskovicích. Důvodem byla možnost aplikace povrchových úprav Ni/Au a OSP na vyrobené DPS.



Obr. 2.5: Schématický řez modelem zapájené simulované součástky FC

2.3 Pájení přetavením

Pro pájení přetavením byla použita přetavovací pec QUAD ZCR 941. Teplotní profil zobrazený na obrázku 2.6 byl nastaven a proměřen na této peci s ohledem na doporučení výrobce bezolovnaté pájecí slitiny SAC 305 firmy Kester ve specifikaci pro jednovrstvé DPS.



Obr. 2.6: Podélný teplotní profil průchozí přetavovací pece QUAD ZCR 941

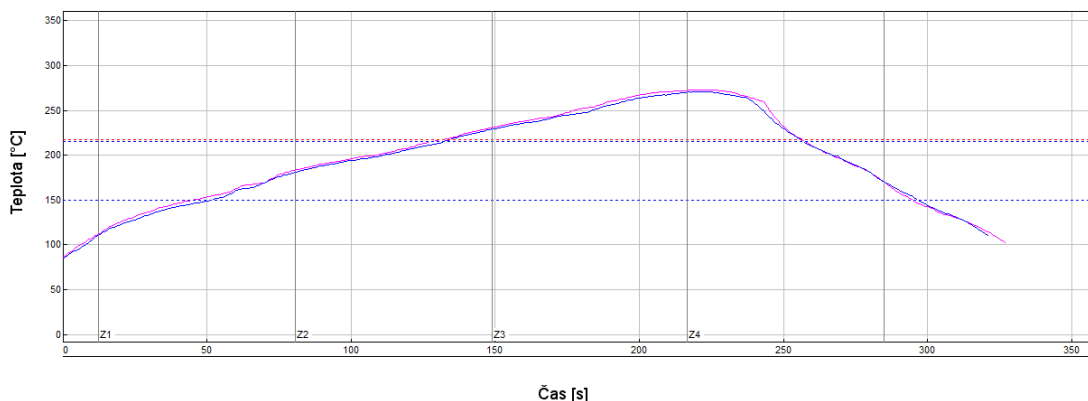
U teplotního profilu na obrázku 2.6 byly dosaženy následující parametry:

- maximální teplota 250 °C
- doba nad likvidem 68 sekund
- doba předehřevu (150 °C - 215 °C) 97 sekund
- maximální teplotní gradient 2,7 °C/s
- PWI = 94 %

Pro možnost porovnání vlivu integrálu energie dodané pájenému spoji během procesu pájení byly další DPS zapájeny v přetavovací peci s teplotním profilem znázorněným na obrázku 2.7. Tento profil je standardní přetavovací profil pro dvouvrstvé DPS při bezolovnatém procesu pájení.

U tohoto teplotního profilu na obrázku 2.7 bylo cílem dodat pájenému spoji podstatně vyšší energii než vyžaduje standardní pájecí profil pro jednovrstvé DPS. Specifikace důležitých údajů tohoto profilu je následující:

- maximální teplota 270 °C
- doba nad likvidem 122 sekund



Obr. 2.7: Podélný teplotní profil průchozí přetavovací pece QUAD ZCR 941 s vyšším integrálem energie

- doba přehřevu (150 °C - 215 °C) 81 sekund
- maximální teplotní gradient 1,88 °C/s
- PWI = 450 %

U podélného teplotního profilu na obrázku 2.7 je vysoký PWI = 450 % zapříčiněn především vysokou dobou pájky nad čarou likvidu (122 sekund) a vysokou maximální teplotou (270°C).

2.3.1 Výpočet integrálu energie dodané pájenému spoji

V odborné literatuře viz. [10] je integrál energie dodané pájenému spoji v procesu pájení nazýván "Heating Factor" s označením Q_h . Rozměrem této veličiny je Kelvin \times sekunda.

Pro určení Q_h byly z tabulkového procesoru MS Excel získány pomocí spojnice trendu rovnice regrese popisující křivky nad čarou likvidu (217°C) pro oba přetavovací teplotní profily. Polynom čtvrtého stupně v rovnici 2.1 popisuje křivku na profilu pro jednovrstvé DPS a polynom v rovnici 2.2 křivku na teplotním profilu pro dvouvrstvé DPS. Rovnice křivek se shodovaly s naměřenými průběhy s přesností 99,3%.

$$y = -\frac{1}{125000}x^4 + 0,0006x^3 - 0,0161x^2 + 1,1551x - 1,0461a \quad (2.1)$$

$$y = -\frac{1}{500000}x^4 + 0,0004x^3 - 0,0176x^2 + 0,9412x - 0,4433, \quad (2.2)$$

kde

- y označuje proměnnou teploty,
- x označuje proměnnou času.

Výpočtem určitých integrálů těchto rovnic 2.1 a 2.2 podle času nad čarou likvidu byly stanoveny číselné hodnoty odpovídající energiím dodaným pájeným spojům během procesu pájení. Určité integrály dodané energie pro teplotní profily jednovrstvých/dvouvrtvých DPS jsou uvedeny v rovnicích 2.3, respektive 2.4. Výsledné hodnoty jsou pak vypsány v tabulce 2.1.

$$\int_0^{69} \left[-\frac{1}{125000}x^4 + 0,0006x^3 - 0,0161x^2 + 1,1551x - 1,0461 \right] \quad (2.3)$$

$$\int_0^{122,25} \left[-\frac{1}{500000}x^4 + 0,0004x^3 - 0,0176x^2 + 0,9412x - 0,4433 \right] \quad (2.4)$$

Číselné hodnoty určitých integrálů těchto polynomů byly vypočteny programem Maple 12. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Tab. 2.1: Integrály energie dodané pájeným spojům při pájení

Teplotní profil	Integrál energie Q_h	Rozměr
Jednovrstvé DPS viz. obr. 2.6	1812	(K.s)
Dvouvrtvé DPS viz. obr. 2.7	7782	(K.s)

Podle tabulky 2.1 byla tedy pájeným spojům přetaveným teplotním profilem pro dvouvrtvé DPS dodána energie odpovídající 430% energie v porovnání s teplotním profilem pro jednovrtvé DPS.

2.3.2 Postup při procesu pájení

- nanesení tavidla Kester 6592 na pájecí plošky simulovaných součástek FC,
- osazení kuliček pájky SAC (Sn-3Ag-0,5Cu) o průměru $0,76\text{mm} \pm 0,02\text{mm}$ výrobce SENJU Metal Industry Co., Ltd s označením #7097 na pájecí plošky simulovaných součástek FC,
- zapájení přetavením v peci QUAD ZCR 941 s předem definovaným podélným teplotním profilem,
- nanesení tavidla Kester 6592 na pájecí plošky základních testovacích DPS,
- osazení simulovaných součástek FC na základní testovací DPS,
- nanesení pájecí pasty dispensorem na pájecí plošky pro měřicí konektory,

- osazení SMD konektorů,
- zapájení přetavením v peci QUAD ZCR 941 s předem definovaným podélným teplotním profilem,
- ruční připájení vodičů k základní testovací desce pro účely měření a proudové zátěže.

2.4 Metodika sledování elektrické vodivosti pájeného spoje

Pro měření vodivosti jednotlivých pájených spojů jsem zvolil čtyřbodovou metodu. Tato metoda měření eliminuje vliv elektrického odporu přívodních měřících vodičů, a proto je vhodná pro měření malých odporů, respektive vodivostí. Všemi spoji na testované desce jsem nechal protékat definovaný proud a měřil úbytky napětí vznikající na jednotlivých pájených spojích. Následně jsem z naměřených hodnot proudů a úbytků napětí vypočítával elektrické vodivosti jednotlivých pájených propojů podle vzorce 2.5.

$$G = \frac{I}{U}, \quad (2.5)$$

kde

- G značí elektrickou vodivost,
- I značí elektrický proud,
- U značí elektrické napětí.

Při měření jsem zvolil měřící proud 0,5 A z toho důvodu, aby přesnost odečtu hodnot na voltmetru a ampérmetru byla co možná nejvyšší, ale zároveň aby se nezvyšovala teplota měřeného pájeného spoje. Experimentálně jsem určil tuto hodnotu proudu za přijatelnou, jelikož oteplení spoje při měřícím proudu 0,5 A bylo přibližně 0,1 °C.

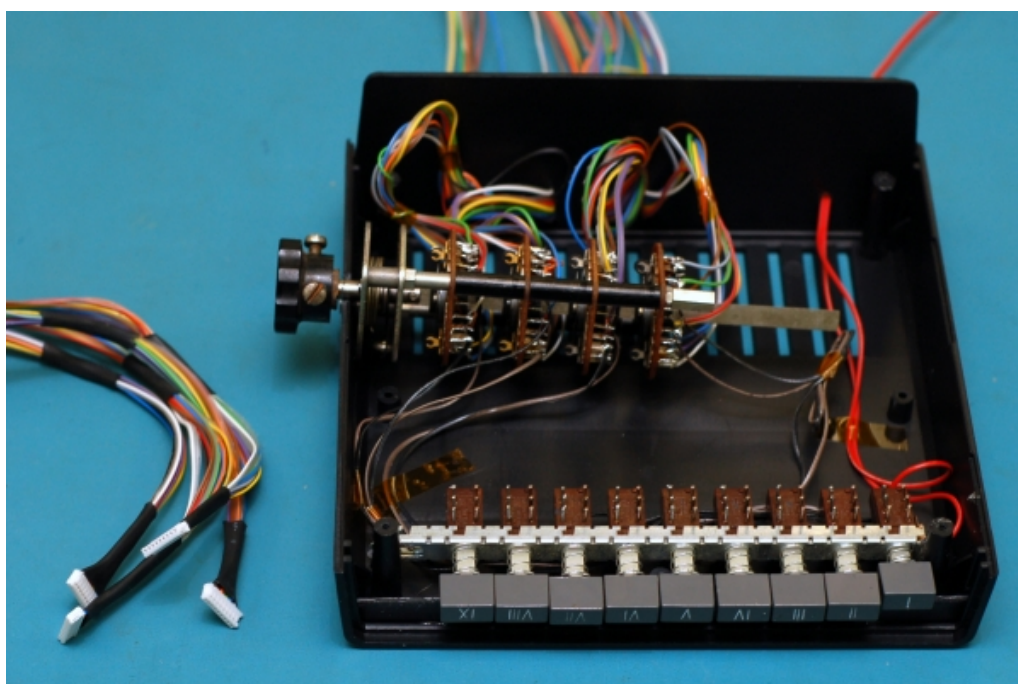
Jelikož je pájený spoj sloučeninou několika kovů s rozdílnou elektrickou vodivostí, projeví se v něm také termoelektrické napětí, které se přičítalo nebo odečítalo k úbytku napětí na spoji při měření v závislosti na směru měřícího proudu. Před vlastním měřením elektrické vodivosti bylo toto napětí experimentálně změřeno a jeho hodnota činila 1,8 μV při teplotě pájeného spoje 40°C. Při zachování polarity měřícího proudu a konstantní teploty vzorků při měření však toto napětí nemělo vliv na sledování změn elektrické vodivosti, protože je jeho hodnota přibližně konstantní. Nepatrně ovlivnilo pouze absolutní hodnoty vodivosti pájených spojů přibližně o 0,2%, což je v dalším vyhodnocení zanedbáno.

2.4.1 Použité přístroje

Jako zdroj proudu při měření vodivosti byl použit regulovatelný symetrický proudový zdroj Tesla BK 127. Jako voltmetr byl zapojen multimetr M1T 291 výrobce Metra Blansko, jako ampérmetr jsem použil multimetr Agilent 34410A. Jelikož je

elektrickou vodivost ovlivňuje teplota měřeného spoje, byly zkušební desky během měření uloženy v přesném teplotním stabilizátoru Friocell s přesností nastavení teploty $0,1^{\circ}\text{C}$ v rozsahu $0-100^{\circ}\text{C}$. Výška spojů byla změřena mikrometrem a pro stanovení vhodných podélných teplotních profilů přetavovací pece byl použit profiloměr SlimKic2000.

Pro přepínání jednotlivých pájených spojů pro měření jsem sestrojil přepínací ústrojí zobrazené na obrázku 2.8. Jedná se o kombinaci 6-ti polohového otočného přepínače s 4 polohovým sériovým přepínačem, což odpovídá počtu měřených spojů. Délka měřících vodičů je 1,5 m, aby měřené DPS mohly být během měření umístěny v teplotním stabilizátoru.



Obr. 2.8: Přepínač pro měření vodivosti jednotlivých pájených spojů

Na vstup přepínače jsou přivedeny vodiče připojené přes SMD konektory z testovaných DPS (barevné ploché kabely). Výstupem přepínače je červená dvojlinka připojená při měření na milivoltmetr měřící úbytek napětí na jednotlivých pájených spojích viz. 2.8.

2.4.2 Průběh vlastního měření vodivosti

Před vlastním měřením vodivosti byly jednotlivé vzorky vloženy do stabilizační komory a po dobu jedné hodiny byly temperovány na teplotu 40°C . Teplotu pro měření jsem stanovil na 40°C aby se případné další měření mohlo provést i v teplotně

stabilizované komoře s chlazením pouze okolním prostředím. Poté byly změřeny vodivosti jednotlivých pájených spojů na zkušební desce. Následovalo připojení další desky na měřicí zařízení. Teplotní stabilizace každé následující desky trvala 15 minut, jelikož desky již byly 1 hodinu temperovány.

2.4.3 Povrchové úpravy DPS

Jako materiálové kombinace povrchových úprav DPS byly zvoleny povrchové úpravy OSP a Ni/Au. Schématické řezy jednotlivých materiálových kombinací pájených spojů jsou znázorněny na obrázcích 1.6 a 1.5 v kapitole 1.1.4.

2.5 Izotermální stárnutí a proudová zátěž

Po zapájení DPS a proměření vstupních vodivostí jednotlivých pájených spojů byly vybrané DPS podrobeny izotermálnímu stárnutí a proudové zátěži po dobu 72 hodin. V čase 24 hodin od počátku stárnutí bylo namáhání přerušeno a proměřena vodivost jednotlivých spojů. Izotermální stárnutí probíhalo při 150°C, proudová zátěž pak při proudu 4,5 A. Proudová hustota, vypočtena ze vztahu 2.6 v zatěžovaných spojích pak při tomto proudu odpovídala hodnotě 10^3 Acm^{-2} . Tato proudová hustota byla zvolena tak, aby teplota pájených spojů při proudové zátěži a v pokojové teplotě nepřesahovala 80°C. Teplota pájených spojů se při tomto proudovém stárnutí pohybovala v rozmezí 76°C - 78°C při teplotě okolního prostředí 23°C±2°C. Tímto bylo možné odlišit vliv tepelného namáhání a proudové zátěže na pájené spoje.

$$J = \frac{I}{S}, \quad (2.6)$$

kde

- J značí proudovou hustotu,
- I značí elektrický proud při proudové zátěži,
- S plocha pájecí plošky na DPS.

2.6 Výsledky a zhodnocení sledování elektrické vodivosti

Pro účely sledování změn elektrické vodivosti bylo celkem zapájeno 12 testovacích DPS ve čtyřech různých materiálových a procesních kombinacích. Každá tato deska obsahovala 12 simulovaných FC součástek. Pro každou materiálovou a procesní kombinaci DPS bylo tedy zapájeno 144 kuliček pájky, čímž se dosáhlo 72 měřitelných propojení. Jednotlivé materiálové a procesní kombinace DPS byly následující.

- Ni/Au - značí povrchovou úpravu Ni/Au na DPS, standardní teplotní profil pro jednovrstvé DPS při přetavení s $PWI = 94\%$, výšku spoje 0,3mm danou povrchovým napětím roztavené pájky,
- OSP - značí povrchovou úpravu OSP na DPS, standardní teplotní profil pro jednovrstvé DPS při přetavení s $PWI = 94\%$, výšku spoje 0,3mm danou povrchovým napětím roztavené pájky,
- Ni/Au (Def.) - značí povrchovou úpravu Ni/Au na DPS, standardní teplotní profil při přetavení s $PWI = 94\%$, sníženou výšku spoje 0,225mm danou přídatným závažím při procesu pájení,
- Ni/Au (P2V) - - značí povrchovou úpravu Ni/Au na DPS, vyšší teplotní profil pro dvouvrstvé DPS při přetavení s $PWI = 450\%$, výšku spoje 0,3mm danou povrchovým napětím roztavené pájky.

Procentuální vyjádření změn elektrické vodivosti je vždy vztaženo k hodnotě naměřené po zapájení DPS a popisuje průměrné změny na jednotlivých testovacích DPS (průměr ze 24 pájených propojů). Procentuální změny elektrické vodivosti jednotlivých pájených propojů pro konkrétní testovací DPS jsou uvedeny v grafech v příloze A.1.

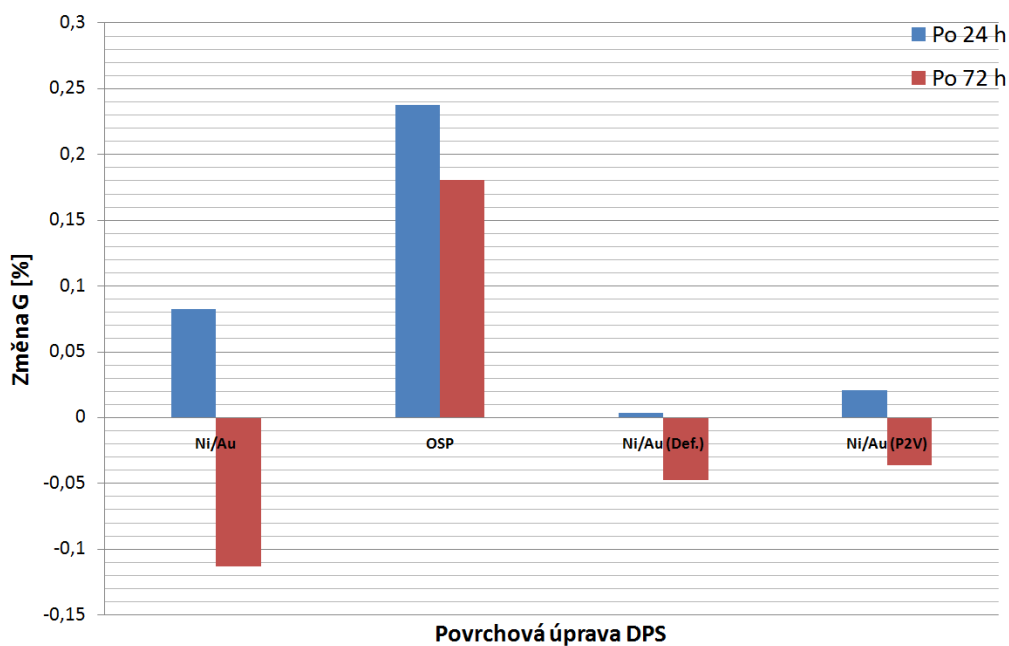
2.6.1 Vliv proudové zátěže

V tabulce 2.2 a v grafu na obrázku 2.9 jsou znázorněny změny elektrické vodivosti po proudové zátěži.

Jak je patrné z grafu 2.9, všechny materiálové a procesní kombinace DPS vykazovaly po 24 hodinách proudové zátěže vzestup elektrické vodivosti. Nejvyšší nárůst elektrické vodivosti byl zaznamenán u DPS s povrchovou úpravou OSP, který činil přibližně 0,24%. Po 72 hodinách proudové zátěže vykazovaly naopak všechny kombinace DPS pokles vodivosti, kde nejvyšší propad vodivosti byl zaznamenán u DPS s povrchovou úpravou Ni/Au a činil -0,11%. I když jsou u DPS s povrchovou úpravou

Tab. 2.2: Změny elektrické vodivosti po proudové zátěži

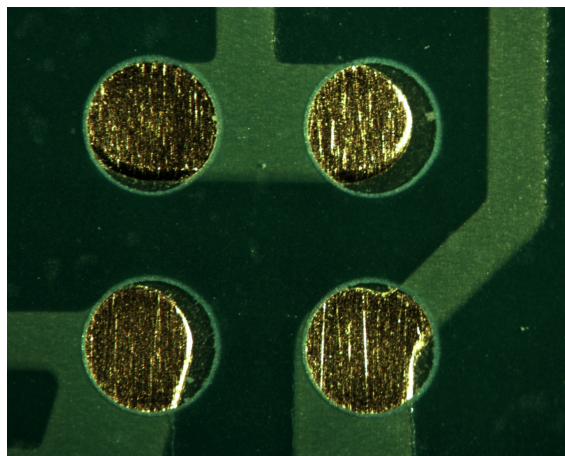
Popis DPS	Změna G po 24 h (%)	Změna G po 72 h (%)
Ni/Au	0,083	-0,113
OSP	0,238	0,18
Ni/Au (Def.)	0,004	-0,047
Ni/Au (P2V)	0,021	-0,036



Obr. 2.9: Změny elektrické vodivosti po proudové zátěži

OSP obě hodnoty změn vodivosti kladné, byl zaznamenán pokles mezi vodivostí v čase 24 hodin od začátku proudové zátěže a v čase 72 hodin. Je to způsobeno vztažením naměřených změn k původní elektrické vodivosti změřené po zapájení DPS.

U desek s povrchovou úpravou Ni/Au ve všech kombinacích byly pozorovány nestejnorodé výsledky změn vodivostí viz. grafy v příloze A.1. Tato skutečnost byla pravděpodobně zapříčiněna odlišnou geometrií a plochou pájecích plošek testovacích DPS viz. fotografie pájecích plošek na obrázku 2.10. Důvodem nestejnorodých pájecích plošek viz. obrázek 2.10 byla chybná předloha nepájivé masky a také její nedokonalé sesouhlasení s vyrobenou DPS.



Obr. 2.10: Rozdílná geometrie a plocha pájecích plošek s povrchovou úpravou Ni/Au

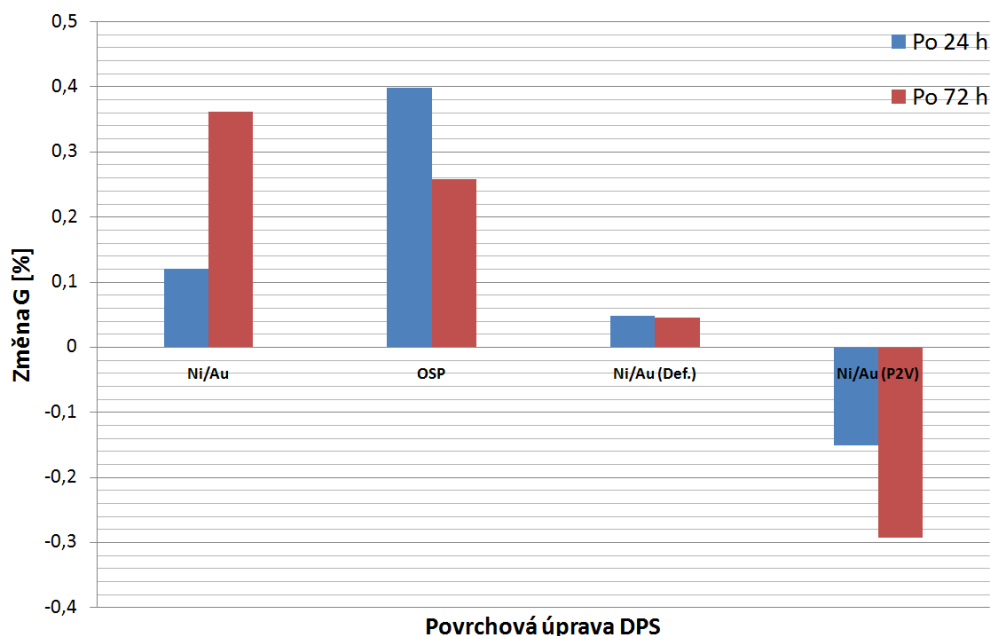
2.6.2 Vliv izotermálního stárnutí

Další čtveřice testovacích DPS byla podrobena izotermálnímu stárnutí při 150°C. Naměřené změny vodivosti pro různé materiálové a procesní kombinace jsou uvedeny v tabulce 2.3 a v grafu na obrázku 2.11.

Tab. 2.3: Změny elektrické vodivosti po izotermálním stárnutí

Popis DPS	Změna G po 24 h (%)	Změna G po 72 h (%)
Ni/Au	0,121	0,362
OSP	0,398	0,258
Ni/Au (Def.)	0,048	0,045
Ni/Au (P2V)	-0,15	-0,293

U tohoto typu namáhání se změny elektrické vodivosti projevily výrazněji, nežli u proudové zátěže. Vodivosti spojů s povrchovou úpravou OSP na DPS vykazovaly průměrně 0,4% nárůst po 24 hodinách a mírný pokles v době 72 hodin od začátku tepelného stárnutí. Spoje s povrchovou úpravou Ni/Au pájené při použití teplotního profilu pro dvouvrstvé DPS vykazovaly po 24 hodinách pokles vodivosti o 0,15% a po 72 hodinách už o 0,3%. Tato tendence poklesu vodivosti byla zapříčiněná degradací pájecí slitiny už v průběhu přetavení, kdy byla přibližně o 100% delší dobu v roztaveném stavu v porovnání s optimální dobou nad čarou likvidu a také čelila maximální teplotě 270°C, což je o 20°C nad optimální maximální teplotou. Rozdíly vodivosti u desky Ni/Au (Def.), kdy byla snížena výška spojů z 0,3mm na 0,225mm byly nepatrné a nevykazovaly žádnou tendenci růstu či poklesu. U desky Ni/Au byl zaznamenán nárůst vodivosti o 0,12% po 24 hodinách a o 0,36% po 72 hodinách.



Obr. 2.11: Změny elektrické vodivosti po izotermálním stárnutí při 150°C

2.6.3 Porovnání vstupních vodivostí po zapájení

V tabulce 2.4 jsou vypsané průměrné vodivosti spojů v závislosti na procesních a materiálových kombinacích změřené po zapájení DPS společně se směrodatnými odchylkami hodnot. Hodnoty v tabulce jsou průměrem z 24 měřených pájených propojení na každé DPS.

Tab. 2.4: Průměrná vstupní vodivost spojů po zapájení

Popis DPS	Průměrná vodivost spojů (S)	Směrodatná odchylka (S)
Ni/Au č.1	735,63	21,7
Ni/Au č.2	737,89	23,77
OSP č.1	774,41	25,25
OSP č.2	773,32	21,47
Ni/Au (Def.) č.1	741,37	25,01
Ni/Au (Def.) č.2	732,44	25,98
Ni/Au (P2V) č.1	724,69	29,47
Ni/Au (P2V) č.2	734,23	26,59

Nejnižší průměrnou vodivost měly desky Ni/Au (P2V) pájené teplotním profilem pro dvouvrstvé DPS. Spoje na deskách Ni/Au a Ni/Au (Def.) vykazovaly přibližně shodné vodivosti po zapájení. Výrazně vyšší vodivosti spojů byly naměřeny u desek s povrchovou úpravou OSP. Důvodem mohla být větší plocha pájecích plošek

na těchto DPS v porovnání s DPS s povrchovou úpravou Ni/Au, ale také odlišné mechanismy tvorby IMC vrstev uvnitř pájeného spoje. Dalším důvodem mohla být také skutečnost, že DPS s jednotlivými povrchovými úpravami byly dodány různými výrobci.

3 ZÁVĚR

Úkolem této diplomové práce bylo sledování změn elektrické vodivosti bezolovnatých pájených spojů způsobených proudovou zátěží a izotermálním stárnutím.

V teoretickém úvodu byly popsány faktory ovlivňující jakost a spolehlivost pájených spojů, dále také vybrané povrchové úpravy DPS použité v praktické části a činitelé mající vliv na elektrickou vodivost těchto spojů.

Úvodem praktické části byl popsán návrh a jednotlivé kroky při výrobě testovacích DPS pro sledování elektrické vodivosti pájených spojů. V kapitole 2.4 byla rozebrána metodika sledování elektrické vodivosti a také použité přístroje.

Při sledování vlivu proudové zátěže vykazovaly všechny spoje po 24 hodinách nárůst elektrické vodivosti, kdežto po 72 hodinách namáhání už byla zaznamenána tendence poklesu. Nejvíce se při tomto typu zátěže projevil nárůst vodivosti u DPS s povrchovou úpravou OSP a také DPS ve verzi Ni/Au. Desky plošných spojů v kombinacích Ni/Au (Def.), kde byla snížena výška spojů a desky Ni/Au (P2V), které byly zapájeny teplotním profilem pro dvouvrstvé desky se projeví jen minimálními změnami na hranici měřitelnosti. Výsledky všech typů desek s povrchovou úpravou Ni/Au mohly být ovlivněny nestejnou geometrií a rozdílnou plochou pájecích plošek DPS viz. kapitola 2.6.1. Při sledování vlivu izotermálního stárnutí desky v kombinaci Ni/Au projeví nárůstem elektrické vodivosti při obou měřeních na hodnotu 0,36%. Desky s povrchovou úpravou OSP vykazovaly podobnou tendenci jako u proudové zátěže s nárůstem vodivosti 0,4% po 24 hodinách. Desky Ni/Au (Def.) se sníženou výškou spoje opět nevykazovaly rozpoznatelné tendence a změny jejich vodivosti byly na hranici měřitelnosti. Podle teoretických předpokladů se projeví spoje na deskách Ni/Au (P2V) pájené teplotním profilem pro dvouvrstvé DPS s tendencí poklesu elektrické vodivosti o 0,3% oproti původní vodivosti.

V kapitole 2.6.3 byly srovnány hodnoty vstupních vodivostí po zapájení DPS. Spoje na DPS Ni/Au a Ni/Au (Def.) měly přibližně shodnou průměrnou elektrickou vodivost 736,8 S. O něco menších hodnot vodivosti dosáhly spoje na deskách Ni/Au (P2V) pájené vyšším teplotním profilem s průměrnou elektrickou vodivostí 729,5 S. Naopak spoje na DPS s povrchovou úpravou měly výrazně vyšší průměrnou elektrickou vodivost, která u nich činila 773,9 S. Tato skutečnost mohla být důsledkem korektně vyrobených DPS s většími pájecími ploškami na DPS v porovnání se všemi variantami DPS a povrchovou úpravou Ni/Au.

Ze sledování změn elektrické vodivosti pájených spojů tedy vyplývá, že vlastnosti spojů po zapájení včetně elektrické vodivosti nejsou konstantní, ale že v pájených spojích dochází vlivem vnitřních i vnějších jevů stále k tvorbě mechanismů, které ovlivňují jak samotné vlastnosti spoje, tak i sledovanou elektrickou vodivost. Procentuální grafické vyjádření změn elektrické vodivosti jednotlivých pájených spojů

je znázorněno na obrázcích v příloze A.1.

Obecně poklesy elektrické vodivosti po izotermálním a proudovém namáhání lze vysvětlit nárůstem intermetalických fází, defektů a prasklin během stárnutí. Příčina nárůstu elektrické vodivosti pájených spojů při zátěži zatím nebyla objasněna do té míry, aby se dala jednoduše popsat, jelikož děje probíhající na rozhraní intermetalické sloučeniny ale také v samotné pájecí slitině jsou velmi komplexní a obtížně pozorovatelné. V odborné literatuře jako je například [7] jsou tyto tendence nárůstu elektrické vodivosti, respektive poklesy elektrického odporu zaznamenány, ale bohužel už nejsou objasněny, jelikož většinou je sledování elektrické vodivosti jen okrajovým zájmem při daném zkoumání pájených spojů.

Z důvodu otázky bezpečnosti při stárnutí pájených spojů (zejména teploty 150°C) byly vzorky zatěžovány pouze po dobu 72 hodin. Pro přesnější sledování změn a tendencí elektrické vodivosti pájených spojů by bylo zapotřebí nechat proudové a termální namáhání působit alespoň 1000 hodin a také měření elektrické vodivosti provádět častěji, nejlépe kontinuálně s pomocí automatizovaných měřících zařízení. Dobrým ilustrativním zdrojem informací by také byly snímky mikrovýbrusu pájených spojů z elektronového mikroskopu.

Tato práce může posloužit jako úvod k širšímu sledování materiálových a procesních vlivů na elektrickou vodivost pájených spojů v dlouhodobém horizontu.

LITERATURA

- [1] SZENDIUCH I. *Pájení bezolovnaté pájky*. [online]. Nedatováno. Dostupné z URL: <<http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>>.
- [2] STARÝ J., KAHLE P. *Plošné spoje a povrchová montáž*. [skripta]. Nedatováno. VUT FEKT Brno
- [3] SUGANUMA K. *Lead-free soldering in electronics*. 1th printing, 2004. ISBN 0-8247-4102-1.
- [4] MIKULČÁK J. a kolektiv. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 3. vydání, 1988. ISBN 80-85849-84-4.
- [5] FREAR D.R., JANG J.W., LIN J.K., ZHANG C. *Pb-Free Solders for Flip-Chip Interconnects*. [online]. 2001. Dostupné z URL: <<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0106/Frear-0106.html>>.
- [6] BASARAN C., YE H., HOPKINS D.C., FREAR D., LIN J.K. *Flip Chip Solder Joint Failure Modes*. [online]. Nedatováno. Dostupné z URL: <<http://www.electroiq.com/index/display/packaging-article-display/238913/articles/advanced-packaging/volume-14/issue-10/features/flip-chip-solder-joint-failure-modes.html>>.
- [7] CATALANI M., SCARANO V.L., BERTOCCI F., SINGUAROLI R. *Comparison between Thermal Performance of Silver Conductive Adhesive and Sn-Ag-Cu Solder Joints in a Medical Ultrasound Array Transducer*. [online]. 2009. Dostupné z URL: <http://www.imeko2009.it.pt/Papers/FP_445.pdf>.
- [8] LIN Y.L., LAI Y.S., TSAI C.M., KAO C.R. *Effect of Surface Finish on the Failure Mechanisms of Flip-Chip Solder Joints Under Electromigration*. [online]. 2006. Dostupné z URL: <<http://ntur.lib.ntu.edu.tw/bitstream/246246/95481/1/04.pdf>>.
- [9] *Solder Alloys Specification*. [online]. Nedatováno. Dostupné z URL: <<http://www.williams-adv.com/packagingMaterials/lead-free-solder.php>>.
- [10] GAO J.G., WU Y.P., DING H., WAN N.H. *Thermal profiling: a re-flow process based on the heating factor*. [online]. 2008. Dostupné z URL: <<http://www.emeraldinsight.com/Insight/viewContentItem.do;jsessionid=9D8ACACACE05DE135A3E6AE2E9701CEB?contentType=Article&hdAction=lnkpdf&contentId=1742108>>.

- [11] LEE N.C. *Reflow Soldering Processes and Troubleshooting*. [online]. 2001. ISBN 0-7506-4749-3. Dostupné z URL: <http://books.google.com/books?id=Tv_AuIPrZmEC&pg=PA215&dq=solder+flip+chip&hl=en&ei=3BXzS42pDpWKmwPmmJCxDQ&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=3&ved=0CDkQ6AEwAg#v=onepage&q=solder%20flip%20chip&f=false>.
- [12] YOO S., SA Y.K., KIM Y.K., KWON S., LEE C.W. *Effect of Vibration on Lead-free Solder Joint Reliability under Temperature Changes for Automotive Electronics*. [článek]. 2009.
- [13] MANKO H.H. *Solders and Soldering*. 4th edition. [online]. ISBN 0-07-134417-9. Dostupné z URL: <http://books.google.com/books?id=MvSMg5HC1YcC&pg=PA170&dq=electrical+conductivity+solder&hl=en&ei=GhbzS5jzKp7YmwOA9cStDQ&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=6&ved=0CEUQ6AEwBQ#v=onepage&q=electrical%20conductivity%20solder&f=false>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

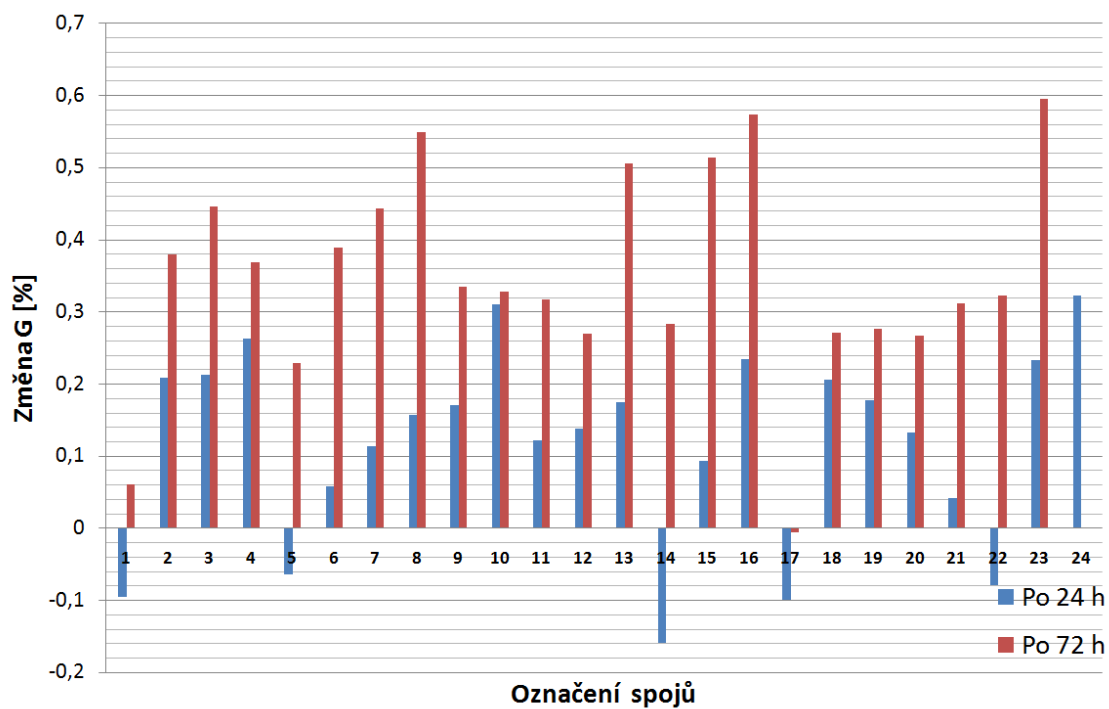
α	Teplotní součinitel elektrického odporu (K^{-1})
γ	Měrná elektrická vodivost látky ($S m^{-1}$)
G	Elektrická vodivost (S)
G_0	Počáteční elektrická vodivost (S)
l	Délka (m)
S	Obsah (m^2)
R	Elektrický odpor (Ω)
ΔT	Rozdíl teplot (K)
BGA	Ball Grid Array - typ pouzdra součástky
DPS	Deska plošného spoje
FC	Flip Chip - typ pouzdra součástky
IACS	Konstanta elektrické vodivosti (International Annealed Copper Standard)
IMC	Intermetalická sloučenina (Intermetallic Compound)
PWI	Process Window Index
SAC	Pájecí slitina na bázi cínu (Sn) s obsahem stříbra (Ag) a mědi (Cu)
SMD	Bezvývodová součástka určená pro povrchovou montáž
SMT	Technologie povrchové montáže

SEZNAM PŘÍLOH

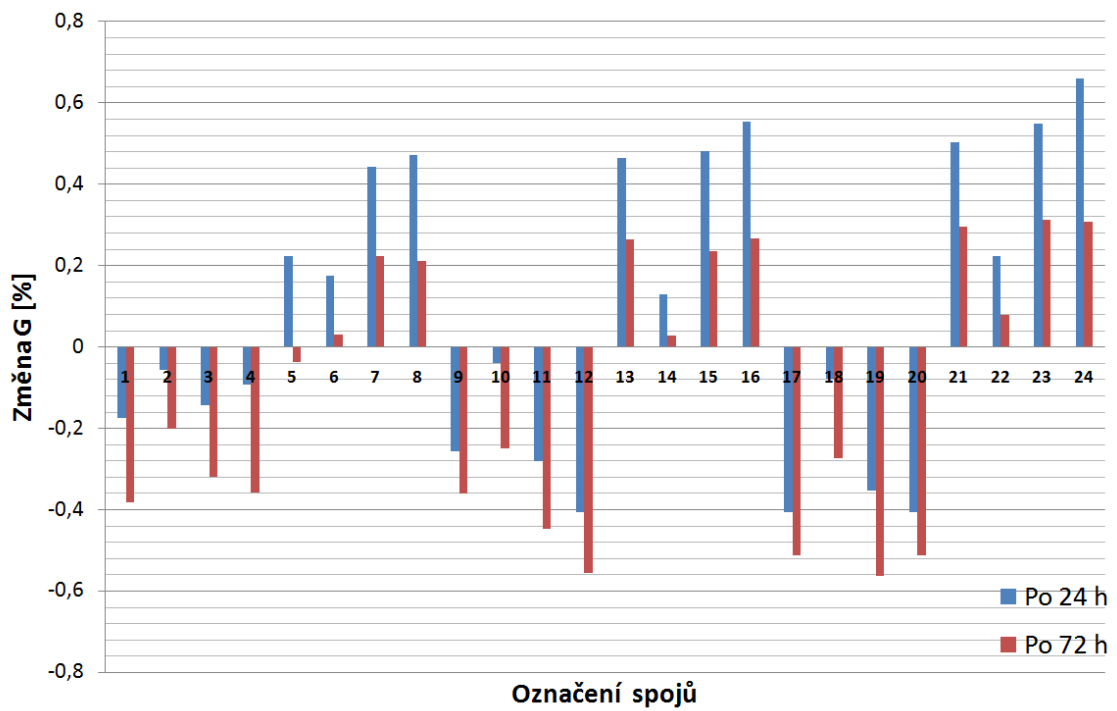
A Příloha č.1	59
A.1 Grafy změn vodivostí po proudové zátěži a izotermálním stárnutí . .	59

A PŘÍLOHA Č.1

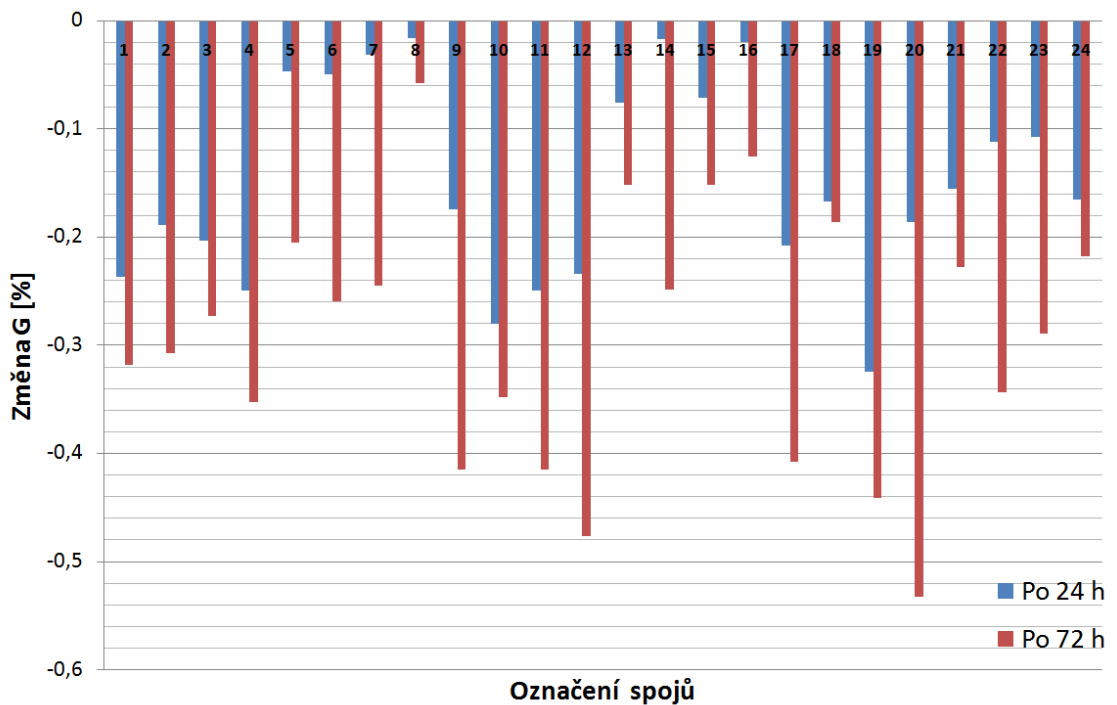
A.1 Grafy změn vodivosti po proudové zátěži a izotermálním stárnutí



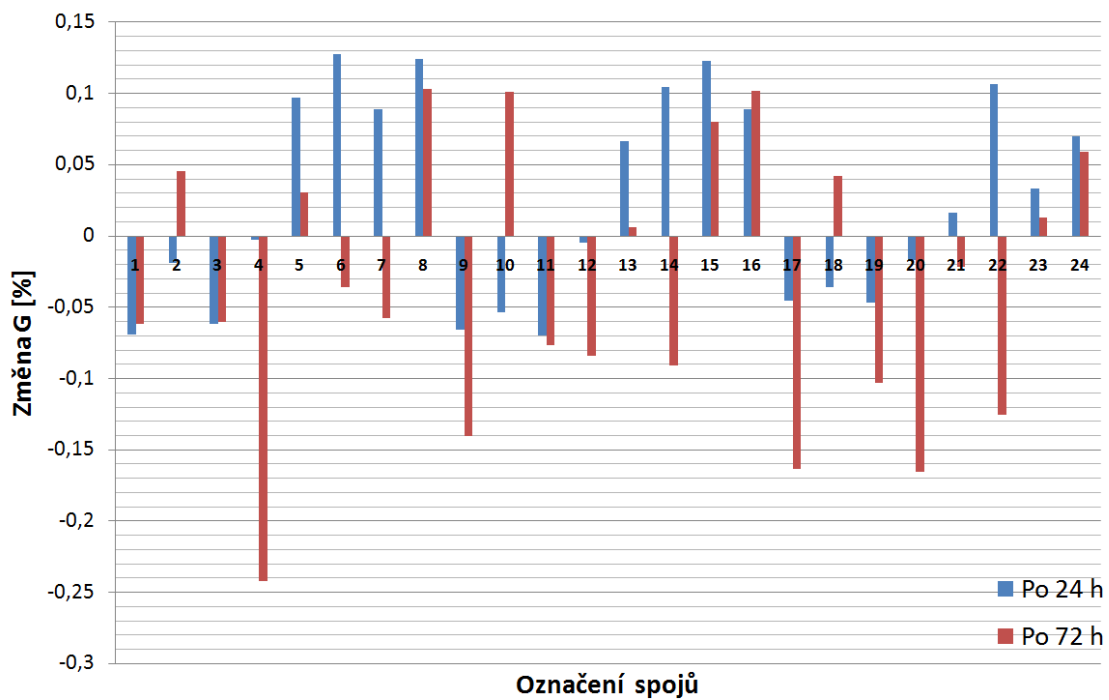
Obr. A.1: Změny elektrické vodivosti po 24h a 72h izotermálního stárnutí na DPS v kombinaci Ni/Au viz. 2.6.



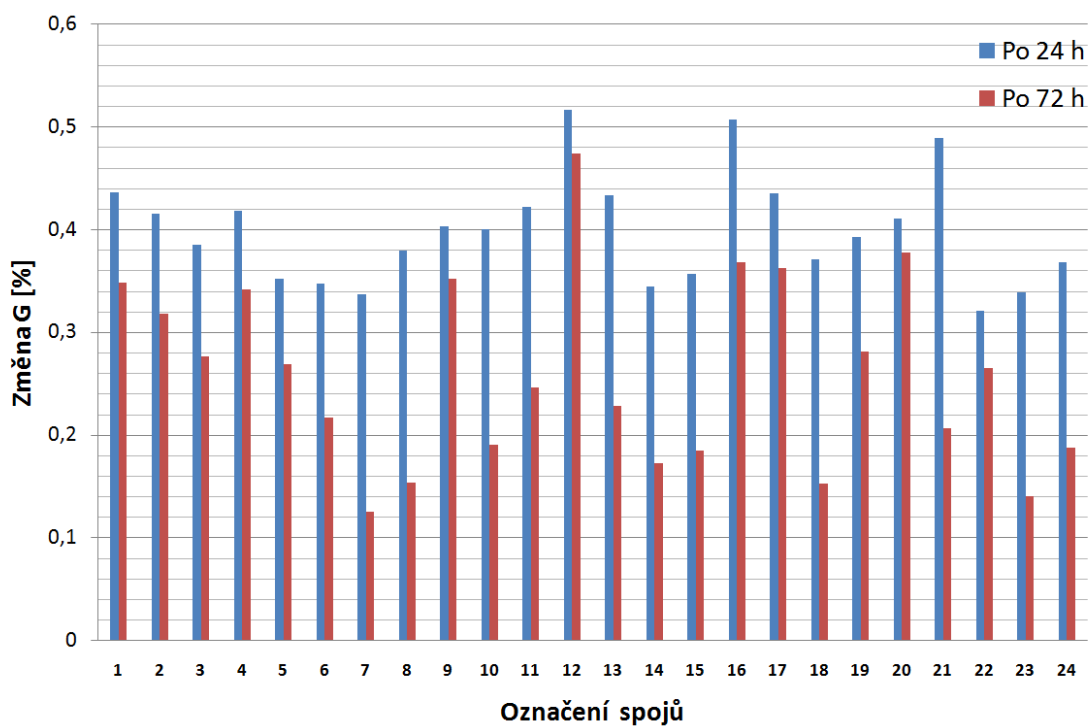
Obr. A.2: Změny elektrické vodivosti po 24h a 72h proudové zátěže na DPS v kombinaci Ni/Au viz. 2.6.



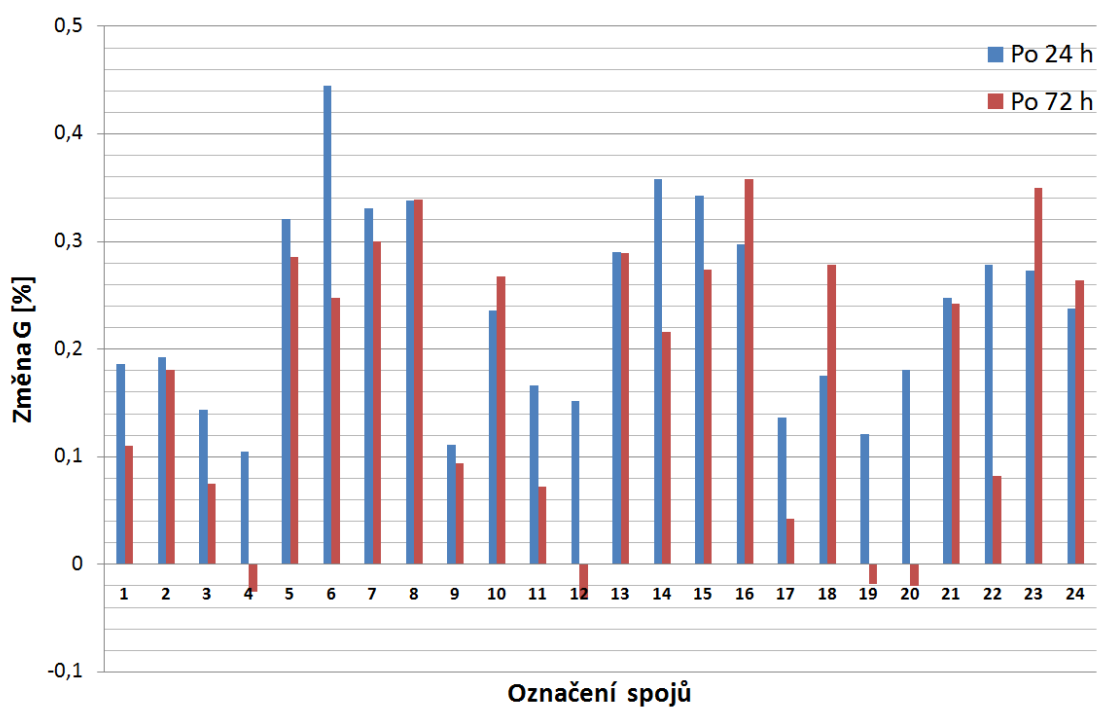
Obr. A.3: Změny elektrické vodivosti po 24h a 72h izotermálního stárnutí na DPS v kombinaci Ni/Au (P2V) viz. 2.6.



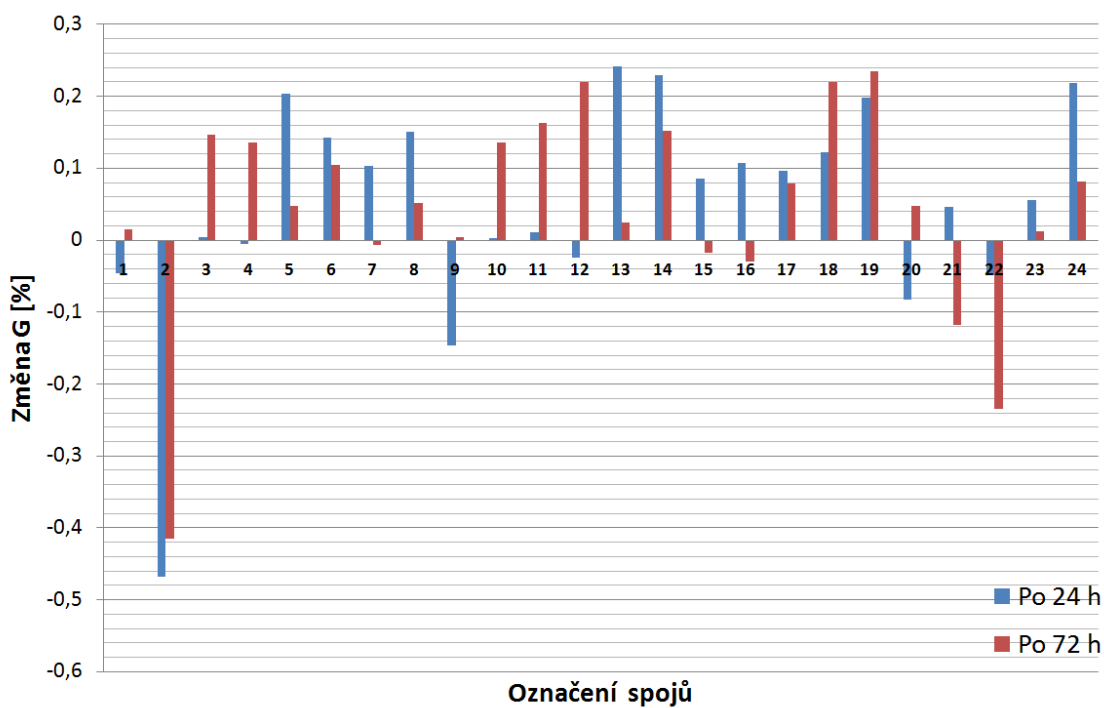
Obr. A.4: Změny elektrické vodivosti po 24h a 72h proudové zátěže na DPS v kombinaci Ni/Au (P2V) viz. 2.6.



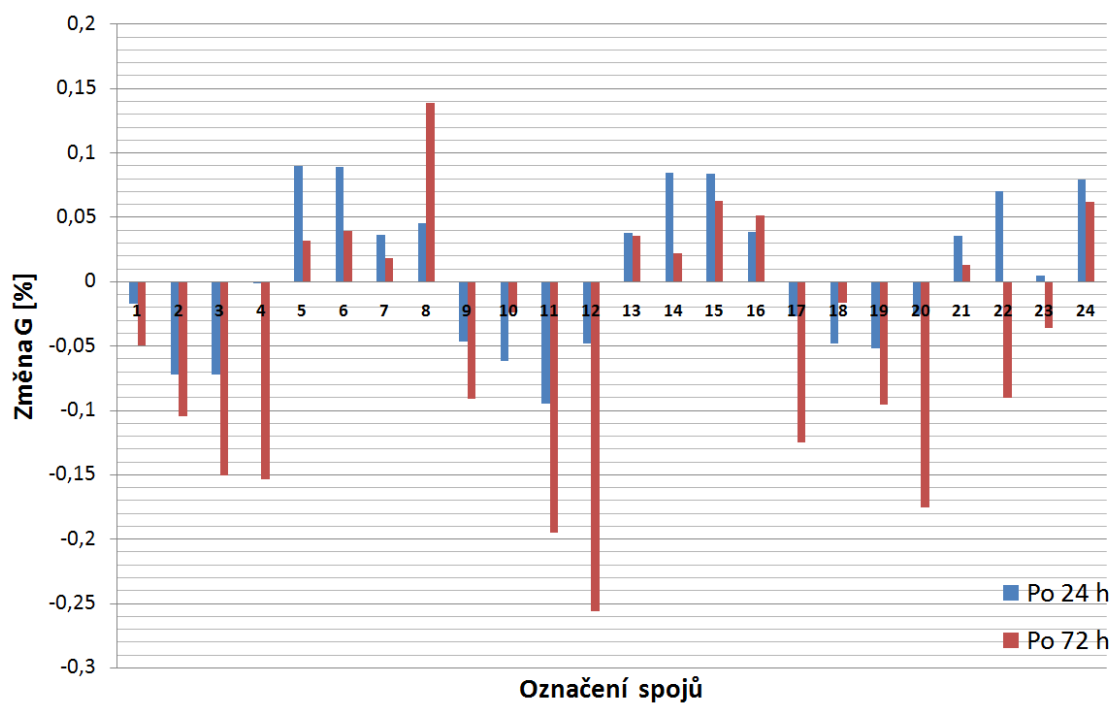
Obr. A.5: Změny elektrické vodivosti po 24h a 72h izotermálního stárnutí na DPS v kombinaci OSP viz. 2.6.



Obr. A.6: Změny elektrické vodivosti po 24h a 72h proudové zátěže na DPS v kombinaci OSP viz. 2.6.



Obr. A.7: Změny elektrické vodivosti po 24h a 72h izotermálního stárnutí na DPS v kombinaci Ni/Au (Def.) viz. 2.6.



Obr. A.8: Změny elektrické vodivosti po 24h a 72h proudové zátěže na DPS v kombinaci Ni/Au (Def.) viz. 2.6.