



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONIC**

VÝZKUM SPOLEHLIVOSTI BEZOLOVNATÝCH PÁJENÝCH SPOJŮ

RESEARCH OF THE RELIABILITY OF LEAD-FREE SOLDER JOINTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

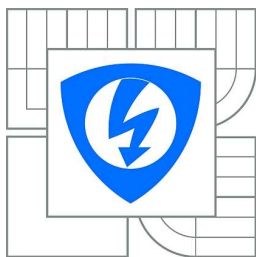
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MIROSLAV PELC

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student: Bc. Miroslav Pelc

ID: 83372

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Výzkum spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte rešerši v oblasti tvorby struktury bezolovnatých pájených spojů u vybraných pájecích slitin (SAC, Sn100C) a porovnejte je s olovnatou slitinou SnPb. Stanovte metodiku pro sledování a vyhodnocování spolehlivosti na základě sledování struktury těchto spojů a navrhnete testovací strukturu, na níž ověříte vlastnosti s pomocí statistického vyhodnocení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Szendiuch, I.: Základy technologie mikroelektronických obvodů, VUTIUM, 2006, ISBN 80-214-3292-6

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

prof. Ing. Vladislav Musil, 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.

Abstrakt:

Předložená práce se zabývá výzkumem spolehlivosti pájených spojů. Shrnuje nejzákladnější poznatky z oblasti bezolovnatých pájecích slitin, procesu pájení a testování pájeného spoje. V práci je proveden výběr nejvýznamnějších faktorů vstupující do procesu pájení. Pomocí techniky DOE je hledána neoptimálnější kombinace faktorů, která by odpovídala co nejvyšší jakosti pájeného spoje.

Abstract:

This work deals research of the reliability of lead-free solder joints. It summarizes the basic knowledge of lead-free solder alloys, soldering and testing process, the soldered joints. The work is done selecting the most important factors entering into the soldering process. The method of the DOE sought the optimal combination of factors, which would correspond to the highest quality solder joints.

Klíčová slova:

Spolehlivost pájeného spoje, bezolovnaté pájky, struktura pájeného spoje, dusíková atmosféra.

Keywords:

Reliability of the solder joint, lead-free solders, structure of solder joint, nitrogen atmosphere.

Bibliografická citace díla:

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

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. 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 24. 5. 2011

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci. Dále děkuji Ing. Martinu Adámkovi Ph.D, za odborné vedení v laboratořích a za cenné rady a náměty, které mi poskytl při zpracování mé diplomové práce.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav mikroelektroniky

POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Autor:	Bc. Miroslav Pelc
Název závěrečné práce:	Výzkum spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů
Název závěrečné práce ENG:	Research of the reliability of lead-free solder joints
Anotace závěrečné práce:	Předložená práce se zabývá výzkumem jakosti pájených spojů. Shrnuje nejzákladnější poznatky z oblasti bezolovnatých pájecích slitin, procesu pájení a testování pájeného spoje. V práci je proveden výběr nejvýznamnějších faktorů vstupujících do procesu pájení. Pomocí techniky DOE je hledána neoptimálnější kombinace faktorů, která by odpovídala co nejvyšší jakosti pájeného spoje.
Anotace závěrečné práce ENG:	This work deals research of the reliability of lead-free solder joints. It summarizes the basic knowledge of lead-free solder alloys, soldering and testing process, the soldered joints. The work is done selecting the most important factors entering into the soldering process. The method of the DOE sought the optimal combination of factors, which would correspond to the highest quality solder joints.
Klíčová slova:	Spolehlivost pájeného spoje, bezolovnaté pájky, struktura pájeného spoje, dusíková atmosféra.
Klíčová slova ENG:	Reliability of the solder joint, lead-free solders, structure of solder joint, nitrogen atmosphere.
Typ závěrečné práce:	diplomová
Datový formát elektronické verze:	formát pdf
Jazyk závěrečné práce:	český
Přidělovaný titul:	Ing.
Vedoucí závěrečné práce:	doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
Škola:	Vysoké učení technické v Brně
Fakulta:	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav:	Ústav mikroelektroniky
Studijní program:	Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika
Studijní obor:	Mikroelektronika a technologie

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	11
ÚVOD	12
1 POPIS PÁJECÍCH SLITIN.....	13
1.1 NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ TYPY PÁJECÍCH SLITIN	16
1.2 SPECIÁLNÍ PÁJECÍ SLITINY OBSAHUJÍCÍ VZÁCNÉ KOVY	17
2 CHOVÁNÍ KOVŮ V PÁJCE	19
2.1 ROZPUSTNOST KOVŮ V PÁJCE	19
2.2 VYLUČOVÁNÍ KOVŮ (LEACHING)	19
2.3 DIFÚZE	20
2.4 DĚJE PROBÍHAJÍCÍ PŘI PÁJENÍ	21
3 PÁJITELNOST A POVRCHOVÉ ÚPRAVY	23
3.1 PÁJITELNOST A SMÁČIVOST	23
3.2 POVRCHOVÉ ÚPRAVY	25
4 PÁJENÉ SPOJE.....	27
4.1 TVARY PÁJENÝCH VÝVODŮ	27
4.2 PŘEHLED PORUCH PÁJENÝCH SPOJŮ	29
4.3 SPOLEHLIVOST A JAKOST PÁJENÝCH SPOJŮ	31
5 VLIV PŘÍDAVNÝCH ATMOSFÉR A JEJICH KONCENTRACE.....	32
5.1 DUSÍKOVÁ ATMOSFÉRA	32
5.2 DEFEKTY PÁJENÍ A DUSÍKOVÁ ATMOSFÉRA	35
5.3 KONTROLA DUSÍKU	36
5.4 JINÉ TYPY ATMOSFÉR.....	37
6 TECHNIKA DESIGN OF EXPERIMENTS	39
6.1 PLÁNOVANÝ EXPERIMENT	39
6.2 FAKTOROVÝ PLÁN	40
7 NÁVRH TESTOVACÍCH DPS A VÝVOJ PROCESU PÁJENÍ PŘETAVENÍM S POUŽITÍM DUSÍKOVÉ ATMOSFÉRY.....	41
7.1 NÁVRH TESTOVACÍCH DPS	41
7.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ NA PÁJENÍ	42
7.3 PÁJENÍ PŘETAVENÍM S POUŽITÍM DUSÍKOVÉ ATMOSFÉRY	44
7.3.1 <i>Pájení přetavením v sázkové peci HR21.....</i>	<i>44</i>
7.3.2 <i>Pájení přetavením v exsikátoru</i>	<i>44</i>
7.3.3 <i>Postup při pájení.....</i>	<i>46</i>
8 HODNOCENÍ SPOLEHLIVOSTI PÁJENÉHO SPOJE	48
8.1 HODNOCENÍ SMÁČECÍHO ÚHLU.....	49
8.1.1 <i>Měření smáčecího úhlu</i>	<i>49</i>
8.1.2 <i>Faktorový plán pro měření smáčecího úhlu</i>	<i>51</i>

8.1.3	Vyhodnocení.....	53
8.2	HODNOCENÍ PEVNOSTI PÁJENÉHO SPOJE	55
8.2.1	Měření pevnosti pájeného spoje.....	55
8.2.2	Faktorový plán pro měření pevnosti pájených spojů.....	56
8.2.3	Vyhodnocení mechanické pevnosti pájeného spoje	57
8.3	HODNOCENÍ VZNIKU TOMBSTONE DEFECTŮ	59
8.4	OPTICKÉ HODNOCENÍ	60
8.5	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A DOPORUČENÍ	62
8.5.1	Doporučení	63
9	ZÁVĚR.....	64
10	POUŽITÁ LITERATURA	65
	PŘÍLOHA A: NAMĚŘENÉ HODNOTY PRŮMĚRŮ PŘETAVENÉ PÁJKY	67
	PŘÍLOHA B: NAMĚŘENÉ HODNOTY PEVNOSTI PÁJENÉHO SPOJE	68
	PŘÍLOHA C: FAKTOROVÁ ANALÝZA PRO URČENÍ MECHANICKÉ PEVNOSTI PÁJENÉHO SPOJE.....	74
	PŘÍLOHA D: GRAFY EFEKTŮ A INTERAKCÍ PRO MECHANICKOU PEVNOST PÁJENÉHO SPOJE.....	77

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Difúze pájky do kovu	21
Obr. 2: Proces pájení (A – výchozí stav, B – predehřev, C – přetavení, D – chlazení)	22
Obr. 3: Interakce sil během smáčení povrchu	24
Obr. 4: Smáčecí úhel A) dobrá smáčivost, B) nesnášivost.....	25
Obr. 5: Rozdělení pájitelných povrchů.....	26
Obr. 6: Klasická vývodová montáž	27
Obr. 7: Pouzdra s páskovými vývody	28
Obr. 8: Vývody typu: A) Gull wing, pouzdro SO; B) J-LEAD, pouzdro PLCC [10]	28
Obr. 9: Vývodové propojení BGA pouzdra	28
Obr. 10: Detail vývodu BGA pouzdra	28
Obr. 11: Kuličky pájky.....	30
Obr. 12: Trhliny v pájce [12]	30
Obr. 13: Ishikawův diagram.....	31
Obr. 14: Molekula dusíku a jeho trojná vazba	32
Obr. 15: Obecné schéma procesu.....	40
Obr. 16: Testovací struktura.....	41
Obr. 17: Přířez.....	42
Obr. 18: Šablona pro tisk past.....	43
Obr. 19: Osazování DPS na SMT manipulátoru.....	43
Obr. 20: Natisknuté a osazené vzorky.....	44
Obr. 21: Detail ventilů pro volbu požadované atmosféry	45
Obr. 22: Detail ventilu pro analyzátor zbytkové koncentrace kyslíku	45
Obr. 23: Metoda pájení přetavením v exsikátoru s použitím dusíkové atmosféry	46
Obr. 24: Teplotní profil.....	47
Obr. 25: Kulový vrchlík	49
Obr. 26: Měření průměru kulového vrchlíku přetavené pájky	51
Obr. 27: Graf hlavních efektů pro úhel smáčení	53
Obr. 28: Graf hlavních efektů pro smáčecí úhel, nezohledněn vliv pájecích past.....	54

Obr. 29: Graf interakcí z hlediska smáčení.....	55
Obr. 30: Princip metody stříhu na zařízení DAGE	56
Obr. 31: Pozice trhaných součástí na testovacích DPS	56
Obr. 32: Graf efektů pro mechanickou pevnost pájených spojů	57
Obr. 33: Graf efektů pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 0201)	58
Obr. 34: Graf interakcí pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 0201)...	59
Obr. 35: SAC pájka, dusíková atmosféra,	60
Obr. 36: SnPb pájka, dusíková atmosféra,	60
Obr. 37: SN100C pájka, dusíková atmosféra, 300 ppm O ₂	60
Obr. 38: SAC pájka, vzduchová atmosféra	61
Obr. 39: SnPb pájka, vzduchová atmosféra	61
Obr. 40: SN100C pájka, vzduchová atmosféra	61
Obr. 41: Graf efektů pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 0201)	77
Obr. 42: Graf interakcí pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 0201)...	77
Obr. 43: Graf efektů pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 0402)	78
Obr. 44: Graf interakcí pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 0402)	78
Obr. 45: Graf efektů pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 0603).....	79
Obr. 46: Graf interakcí pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 0603)...	79
Obr. 47: Graf efektů pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 2512).....	80
Obr. 48: Graf interakcí pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 2512)	80

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Vliv vzácných kovů na vlastnosti pájecích slitin.....	14
Tab. 2: Nejnovější členění tavidel dle ANSI J – STD – 004 [5].....	15
Tab. 3: Členění tavidel dle ČSN EN ISO 29454-1 [5]	15
Tab. 4: Inovované typy pájecích slitin.....	17
Tab. 5: Zbytková koncentrace kyslíku a požadovaný stupeň přehřátí [14]	34
Tab. 6: Smáčecí čas na Ni -substrátu [14]	34
Tab. 7: Cena dusíku v závislosti na spotřebě [14]	37
Tab. 8: Vybrané parametry testovacích DPS	42
Tab. 9: Pájecí pasty a jejich vlastnosti.....	43
Tab. 10: Faktory a jejich úrovně	48
Tab. 11: Faktory a úrovně pro testování smáčecího úhlu.....	51
Tab. 12: Faktorový plán pro testování smáčecího úhlu	52
Tab. 13: Tabulka faktorů a úrovní pro měření pevnosti pájeného spoje	57

ÚVOD

Od 1.7. 2006 vstoupila v platnost nová směrnice EU, RoHS (Restriction of the use of Hazardous Substances). Cílem toho nařízení je omezení některých nebezpečných látek při výrobě elektrických a elektronických zařízení nad limit stanovený direktivou RoHS a tím snížit negativní dopady na životní prostředí a člověka.

Do výčtu nebezpečných látek stanovených směrnicí RoHS patří Kadmium (Cd), Rtuť (Hg), Olovo (Pb), šestimocný Chrom (Cr VI), Polybromované bifenyly (PBB) a Polybromované difenylethery (PBDE) [1].

V souvislosti se změnami, vyvolanými normou RoHS, se v elektrotechnickém průmyslu začaly nahrazovat olovnaté pájky pájkami bezolovnatými. Bezolovnaté pájky nedisponují tak dobrými mechanickými, chemickými a elektrickými vlastnostmi jako olovnaté slitiny což vyvolává potřebu vyvíjet stále nové materiály, technologie a postupy, které by se výslednou kvalitou vyrovnaly olovnatému pájení [3].

Předložená diplomová práce se zabývá výzkumem spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů. Spolehlivost pájeného spoje závisí na celé řadě faktorů, které je možné sledovat a kontrolovat v procesu pájení jen omezeně. Definování a stanovení optimální kombinace faktorů vyskytujících se v předvýrobní fázi, v procesu pájení i faktorů působících během doby života pájeného spoje je předmětem řešení v průběhu zpracování této diplomové práce. Na základě experimentálního přístupu byly vybrány některé kritické faktory, které významně ovlivňují spolehlivost pájeného spoje a je posuzován jejich vliv a míra účinků na některé vybrané výstupní charakteristiky. Ukázalo se, že mezi významné základní faktory patří typ použité bezolovnaté slitiny, povrchová úprava pájecích ploch a atmosféra působící v procesu pájení. Cíl diplomové práce je zaměřen na optimalizaci procesu pájení přetavením, a směřuje k nalezení takové kombinace faktorů vstupujících do procesu pájení, které by odpovídaly co nejvyšší jakosti a spolehlivosti pájeného spoje.

K hledání optimálních parametrů je použita technika DOE (Design of Experiments), která pomocí jednoduchých statistických metod vyhodnocuje vliv jednotlivých parametrů a jejich úrovně na zvolené výstupní proměnné.

1 POPIS PÁJECÍCH SLITIN

Pájky jsou kovy nebo slitiny kovů, s nízkou teplotou tavení, jejichž cílem je zajistit pevné spojení mezi dvěma kovy. Lze je rozdělit do dvou hlavních oblastí. Pájky tvrdé - s teplotou tavení nad 500 °C, nejčastěji se používají k mechanickému spojování trubek, plechů apod.

Druhá oblast zahrnuje pájky měkké, s teplotou tavení pod 325°C. Jejich hlavní použití je v elektrotechnickém průmyslu. Cílem pájek je zajistit mechanické upevnění pájené součástky, její vodivé propojení s okolím a dobrý odvod ztrátového tepla. Pájecí slitiny se vyrábějí v mnoha provedeních v závislosti na technice a výběru pájecí metody. Nejčastěji ve formě past, tyčových pájek a ingotů, trubičkových pájek nebo pájecích kuliček.

Z hlediska obsahu olova v pájce lze měkké pájky rozdělit na olovnaté a bezolovnaté. Olovnaté pájky - většinou se jedná o binární sloučeniny cínu a olova. Někdy jsou přidávány i jiné kovy, které mění vlastnosti původní pájky (např. Ag). Nejčastěji je používán hmotnostní poměr 63% cínu a 37% olova. Jedná se o pájku eutektickou, tzn. pájka má stanovený pevný bod přechodu z pevného do tekutého stavu. V posledních letech se od aplikace olovnatých pájek opouští z důvodu prokazatelného škodlivého účinku olova na lidský organizmus.

Bezolovnaté pájky jsou slitiny dvou, tří a někdy i čtyř prvků, jejichž poměr ve slitině ovlivňuje různé vlastnosti pájky. Tyto vlastnosti jsou často protichůdné, např. nikl zabraňuje přimíchávání starších pájek do nové a zabraňuje korozi, na druhou stranu vytváří intermetalické sloučeniny s cínem, což je nežádoucí. Každá pájecí technika už ze své podstaty vyžaduje jiný typ pájecí slitiny, resp. slitinu s parametry určenými právě pro danou metodu. Proto je obtížné „vyrobit“ univerzální pájku, o níž by se dalo konstatovat, že ji lze použít na většinu pájených spojů. Podle dostupných zdrojů [3] je pájecí slitina SnCuNi velmi dobrá pro metodu pájení vlnou, ale její použití v technologii povrchové montáže nevykazuje až tak dobré vlastnosti v porovnání s jinými pájkami. Ve většině slitin se nejčastěji vyskytuje cín (Sn), jeho obsah bývá více než 60%. Často se také používá stříbro (Ag), měď (Cu), nikl (Ni) a jiné vzácné kovy. Vliv jednotlivých prvků na vlastnosti slitiny [2], [4] je uveden v tab. 1.

Tab. 1: Vliv vzácných kovů na vlastnosti pájecích slitin

Prvek	Chem. značka	Vlastnosti
Hliník	Al	- malé množství hliníku se rozpouští v cínu - dochází ke zhoršování adheze (přilnavosti) - roste zrnitost struktury - roste viskozita, horší smáčivost - znásobuje křehkost spoje za tepla - podporuje oxidaci pájky
Antimon	Sb	- při 0,3% výrazně zlepšuje smáčivost - omezení růstu whiskerů - dochází k eliminaci cínového moru - zvyšuje pevnost - zvyšuje bod tání slitiny - poměrně vzácný prvek - drahý
Bismut	Bi	- zlepšuje smáčecí charakteristiky - těžký kov, vhodná náhrada za olovo - mnohem méně toxický než olovo
Měď	Cu	- tvoří intermetalické sloučeniny - způsobuje křehkost - kontaminace vede k větší zrnitosti a viskozitě
Zlato	Au	- tvoří intermetalické sloučeniny - vzniká mnoho strusky - způsobuje křehkost
Nikl	Ni	- žádná rozpustnost v tuhé fázi - tvoří intermetalické sloučeniny - předchází cínovým whiskerům - zabraňuje přímíchávání starších částí pájek - redukuje Cu leaching (vyučování mědi do pájky)
Stříbro	Ag	- žádná rozpustnost v tuhé fázi - tvoří intermetalické sloučeniny - výskyt zrnitosti a důlků na povrchu pájky
Zinek	Zn	- zanedbatelná rozpustnost v tuhé fázi - zrnitost povrchu - výrazně zhoršuje smáčecí charakteristiky - podporuje oxidaci pájky
Germanium	Ge	- snižuje povrchové napětí roztavené pájky - snižuje tvorbu odpadní strusky - vykazuje méně povrchové oxidace - zvyšuje pevnost v tahu - podporuje formování metalické struktury - snižuje vývoj mikrotrhlin

Nepostradatelnou složkou při vytváření pájeného spoje jsou tavidla. Podporují smáčení materiálů pájkou. Při působení tepla pomáhají odstranit oxidy z pájeného povrchu a zároveň chrání pájený spoj před vznikem dalších oxidů při procesu pájení. Zlepšují přenos tepla od tepelného zdroje k pájenému místu. Výše uvedenými vlastnostmi se tak podílí na zvýšení spolehlivosti pájeného spoje. Tavidla se skládají ze čtyř hlavních složek:

- **Tavidlový nosič** – většinou se jedná o přírodní nebo syntetické pryskyřice nebo organické kyseliny.
- **Aktivátor** – při nižší teplotách relativně nečinný, při zvýšení teplot začíná být aktivní a odstraňuje oxidy kovu, oleje a jiné nečistoty z pájeného povrchu. Tyto vlastnosti zajišťují různé kyseliny buď na organické nebo anorganické bázi, případně halogenidy.
- **Aditiva** – jedná se o látky, které upravují fyzikální vlastnosti tavidla (rheologické modifikátory, stabilizátory pěny, antishlukovací činidla).
- **Rozpouštědla** – chemikálie, které udržují tavidlo v potřebném skupenství, rozpouští pevná tavidla (kalafunu) na pastu, při kontaktu se vzduchem se vypařují a zhoršují tak vlastnosti pájené slitiny (v případě pasty). Rozpouštědla mohou být na organické bázi (alkoholy) nebo anorganické bázi (demineralizovaná voda).

Výběr vhodného druhu tavidla závisí především na způsobu nanášení, možnostech vybrané technologie i pájecí slitině. Také je třeba zohlednit případné čištění po procesu pájení, obsah tavidlových zbytků a v neposlední řadě i vliv tavidla na životní prostředí. Některá rozdělení tavidel jsou uvedena v tab. 2 a tab. 3.

Tab. 2: Nejnovější členění tavidel dle ANSI J – STD – 004 [5]

Základ tavidla	Zkratka
Přírodní pryskyřice	Rosin RO
Syntetické pryskyřice	Resin RE
Organické kyseliny	Organic OR
Anorganické kyseliny	Inorganic IN

Tab. 3: Členění tavidel dle ČSN EN ISO 29454-1 [5]

Typ tavidla	Základní složka tavidla	Aktivátor tavidla	Skupenství tavidla
1. pryskyřice	1. přírodní pryskyřice (kalafuna) 2. syntetické pryskyřice	1. bez aktivátorů 2. aktivováno halogenidy 3. aktivováno bez halogenidů	A kapalné
2. organické	1. vodou rozpustné 2. vodou nerozpustné		B pevné
3. anorganické	1. soli	1. chlorid amonný 2. bez chloridu amonného	C pasta
	2. kyseliny	1. fosforečná 2. ostatní	
	3. zásady	1. aminy a/nebo amoniak	

Další členění tavidel je podle původní americké normy MIL – F – 14256 [5]:

- R (rosin) - neaktivované (bezhalogenové) kalafunové tavidlo,
- RMA (rosin middle activated) – aktivace převážně bez halogenů,
- RA (rosin activated) – plně aktivované tavidlo (obsah halogenů do 4 %).

V současné době se ve vývoji tavidel uplatňuje trend bezoplachových tavidel s minimálním obsahem halogenidů, především z ekonomických důvodů, kdy odpadá operace čištění a také z hlediska životního prostředí, některé látky používané v tavidlech poškozují ozonovou vrstvu.

1.1 Nejpoužívanější typy pájecích slitin

- SAC

Pájecí slitiny složené z cínu, stříbra a mědi. S ohledem na požadované vlastnosti pájky se procentuální zastoupení jednotlivých složek mírně liší. Nejčastěji se používá složení pájky z 95,5 % cínu, 4 % stříbra a 0,5 % mědi. Teplota tání (solidus – liquidus) je 217 – 217 °C. Jedná se o eutektickou slitinu. Mezi přednosti této pájky patří dlouhá otevřená doba na šabloně, je vhodná pro pájení i bez ochranné dusíkové atmosféry, obsahuje čiré zbytky tavidla a tím snižuje kontaminaci přetavovacích pecí. Je vhodná spíše pro pájení přetavením. SAC pájka vykazuje nejvyrovnanější souhrn vlastností ze všech bezolovnatých slitin a nejvíce se blíží svými parametry pájce olovnaté [6].

- SC(N)

Pájecí slitiny složené z cínu a mědi. Složení pájky je 99,3% cínu, 0,7 % mědi. Teplota tání (solidus – liquidus) je 227 - 227°C. Jedná se o eutektickou slitinu. Relativně levná pájka[5], která neobsahuje žádné drahé kovy. Vhodná pro pájení vlnou.

Z této konvenční slitiny byla inovována skupina pájek tab. 4, vyvinutá firmou FELDER Lottechnik. Tato společnost vyrábí kompletní řadu bezolovnatých pájek s obsahem čistého stříbra v rozsahu 0 až 4 % podle patentu DE 198 16 671 [2]. Jedná se o pájky obohacené o stopové množství niklu a germania. Přidáním těchto prvků se dosáhne zlepšení vlastností pájecích slitin a tím i nepřímo zvýšení spolehlivosti pájeného spoje. Nikl a germanium pozitivně působí na homogenitu a formování metalické struktury pájeného spoje. Tím je dosaženo optimální tuhnutí a omezen vznik mikrotrhlin.

Tab. 4: Inovované typy pájecích slitin

Produkt	Sn100Ni+ inovovaná slitina	Sn99Ag+ inovovaná slitina	Sn98Ag+ inovovaná slitina
Složení	Sn99,3Cu0,7AgNiGe	Sn99Ag0,3Cu0,7NiGe	Sn98,1Ag1,2Cu0,7NiGe
Teplota tavení [°C]	227 eutektikum	217-227	217-222
Teplota při pájení vlnou [°C]	≥ 265	≥ 260	≥ 255
Hustota [g/cm ³]	7,31	7,34	7,37
Pevnost v tahu [N/mm ²]	40	44	48
Protažení [%]	70	66	64
Tvrdość Hv (podle Vickerse)	11,5	14	15
TCE [ppm]	23,6	23	23,7
Produkt	Sn96Ag+ inovovaná slitina	Sn95Ag+ inovovaná slitina	Sn99,3Cu0,7 konveční slitina
Složení	Sn96,5Ag3,0Cu0,5NiGe	Sn95,5Ag3,8Cu0,7NiGe	Sn99,3Cu0,7
Teplota tavení [°C]	217-219	217 eutektikum	227 eutektikum
Teplota při pájení vlnou [°C]	≥ 255	≥ 255	≥ 270
Hustota [g/cm ³]	7,38	7,38	7,31
Pevnost v tahu [N/mm ²]	56	59,4	37,4
Protažení [%]	68	68	66
Tvrdość Hv (podle Vickerse)	18	18	11
TCE [ppm]	23,3	23,3	21,5

- **SA**

Složení pájky je 96 % cínu, 4 % stříbra. Teplota tání (solidus – liquidus) je 221 – 221 °C. Není vhodná pro pájení na pozlacené povrchy.

- **SANi**

Pájecí slitina je složená z cínu, mědi a malého přídatku niklu. Typickým představitelem je pájecí slitina s označením SN100C vyvinuta firmou Nihon v Japonsku. Vhodná pro pájení i bez dusíkové atmosféry, vytváří méně strusky než SnPb pájka [6]. Pomalý růst intermetalické fáze na rozhraní pájka – substrát. Jeví se jako velmi perspektivní.

1.2 Speciální pájecí slitiny obsahující vzácné kovy

Speciální pájecí slitiny, obsahující určité množství vzácných kovů, výrazně mění své vlastnosti, může se např. jednat o nízký bod tavení, velkou mechanickou pevnost aj. Výrazné zlepšení jednoho parametru se však většinou projevuje zhoršením ostatních vlastností pájky. Většinou se jedná o slitiny, kde není dominantním prvkem cín, ale jiný prvek. Obecně lze říci,

že pokud je pájka složena ze dvou kovů, lze ji označit jako binární slitinu, pokud je složena ze tří kovů, pak ternární atd.

- ***Binární slitiny***

Pájecí slitina složena z 52 % india a 48 % cínu. Teplota tání (solidus – liquidus) je 118 - 118 °C. Jedná se o eutektickou pájku. Vykazuje nízký bod tavení. Není vhodná pro automobilový průmysl.

Pájecí slitina složena z 58 % bismutu a 42 % cínu. Teplota tání (solidus – liquidus) je 138 – 138 °C. Odolná proti tepelnému namáhání [11]. Jedná se o eutektickou pájku.

- ***Ternární slitiny***

Slitina je složena z 57 % bismutu, 42 % cínu a 1 % stříbra. Teplota tání (solidus – liquidus) je 139 – 140 °C. Malá příměs stříbra zvyšuje mechanickou pevnost pájky [11].

Slitina je složena z 91,8 % cínu, 3,4 % stříbra a 4,8 % bismutu. Teplota tání (solidus – liquidus) je 211 – 213 °C. Deska plošného spoje i použité součástky musí být Pb-free, kontaminace olovem výrazně snižuje pevnost pájeného spoje.

2 CHOVÁNÍ KOVŮ V PÁJCE

2.1 Rozpustnost kovů v pájce

Jedná se o chemickou reakci kdy částice přechází z pevného do tekutého skupenství. Tuto chemickou reakci nelze chápat jako tavení kovů, ale spíše rozpouštění jednoho typu materiálu v jiném. Např. pevné částičky zlata se rozpustí v tekuté pájce a to i přesto že teplota tání zlata je 1064 °C. Už ze samotného principu pájení vyplývá, že roztavená pájka bude z hlediska rozpustnosti kovů působit na vývody součástky a pájecí plošky. Do pájky se tedy bude nejvíce rozpouštět kov, z něhož jsou vyrobeny vývody komponent a pájené povrchy. Pájené povrchy lze rozdělit na pokovené a nepokovené. U nepokovených povrchů se většinou jedná o pájecí plošky základního materiálu (nejčastěji měď), ale lze se setkat i s pájením na hliník nebo jiné základní materiály. Pokovené povrchy – jedná se o povrchovou úpravu pájecích plošek za cílem dosažení lepších ochranných a pájecích vlastností. Pokovené povrchy lze ještě rozdělit na povrchy pokovené tavitelně (HASL) a na povrchy pokovené rozpustně (OSP, ENIG, imersní Sn a Ag) [7].

Rozpustnost kovů v pájce také velmi záleží na použité technologii pájení. Při pájení přetavením nemá rozpustnost téměř žádný vliv, protože kovy se v podstatě nemají ani v čem rozpouštět, množství roztavené pájky je malé. Při ručním pájení nebo při pájení vlnou záleží jak dlouho bude roztavená pájka v kontaktu s pájenými materiály.

2.2 Vylučování kovů (Leaching)

Leaching (vylučování) je proces, kdy se anorganické i organické nečistoty nebo radionuklidy vylučují z pevné fáze do fáze tekuté. Je to způsobeno vlivem minerálního rozpouštění, desorpce, komplexačních procesů v závislosti na PH, rozpouštěním organických látek a (mikro)biologickou aktivitou. Proces sám o sobě je univerzální, protože každý materiál vystavený kontaktu s vodou začne vylučovat částice z povrchu nebo objemu materiálu v závislosti na pórovitosti uvažovaného materiálu [9].

Vylučování látek je v mnoha ohledech závislé na hodnotě PH. S tím souvisí i charakterizace vylučovacích testů, poskytující lepší hodnocení dopadů na životní prostředí. PH vylučovací test může být použit jako základní srovnávací prostředek. Test změnou PH v podstatě indikuje jak velké množství materiálu se vyloučilo.

2.3 Difúze

Difúze je řídicí mechanismus pájecího procesu, umožňující vzájemné spojení mezi pevnými materiály bez potřeby tavení. Souvisí s pohybem atomů. S rostoucí teplotou materiálů vzrůstá i kinetická energie atomů. Při teplotě absolutní nuly (0 Kelvinů) je pohyb atomu zastaven. S narůstající teplotou začnou atomy kmitat kolem svých rovnovážných poloh v krystalové mřížce. Pokud teplota neustále roste, kinetická energie atomů dospěje k bodu, kdy jsou vazební síly mezi atomy překonány, atomy se budou pohybovat po náhodných drahách, omezených hranicemi systému. Nastane podobný stav, k jakému dochází při pohybu atomů v kapalině nebo plynu. Materiál změní skupenství [10].

Bude-li pozorovaný materiál uzavřen v nádobě s víkem s otvory, vlivem difúze by některé atomy procházely ven a zase dovnitř. Po určitém čase by se počet atomů na jednotku objemu uvnitř i vně nádoby ustálil na stejné průměrné hodnotě. Propustnost víka lze tedy charakterizovat počtem atomů, které projdou určitým průřezem za jednotku času. Takto lze popisovat propustnost clonky nebo difúzní koeficient D uvnitř pevných látek.

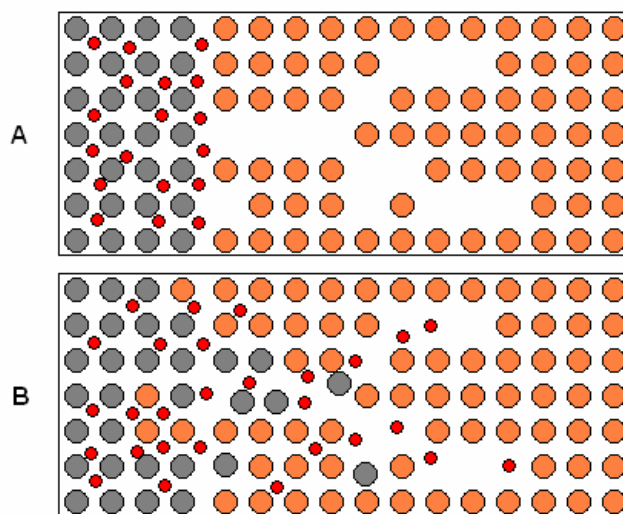
Se zvyšující se teplotou roste i pravděpodobnost, že atomy uniknou skrz otvory ve víku. Difúzní koeficient je tedy závislý na teplotě. Z fyzikálních zákonů lze potom odvodit vztah pro difúzní koeficient závislý na teplotě [10]

$$D(J) = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (1)$$

kde $D(J)$ reprezentuje difúzní koeficient jako funkci teploty, D_0 představuje difúzní koeficient konkrétního materiálu, R je universální plynová konstanta [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}$], T je teplota [K] a Q je aktivační energie [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$].

Propustnost víka lze zevšeobecnit do oblasti pevných látek. Pevné látky jsou na atomové úrovni tvořeny krystalickou mřížkou, která prochází neustálými změnami, atomy se mohou volně pohybovat z místa na místo [10].

Jakmile se pájka dostane do kapalně fáze, prvky obsažené v ní, se vlivem difúze začnou šířit do struktury základního substrátu a některé atomy základního substrátu se rozpustí v pájce (obr. 1). Pájka se skládá z atomů o různých velikostech, v důsledku toho mohou některé atomy pronikat hlouběji a ve větším množství do základního materiálu (pájené plochy), než atomy jiné.



**A) Pájka při pokojové teplotě
(pevná fáze)**

**B) Pájka při teplotě nad bodem liquidu
(kapalná fáze)**

Obr. 1: Difúze pájky do kovu

2.4 Děje probíhající při pájení

Výše popsané zákonitosti budou objasněny na skutečném pájení (pájení přetavením, pájení vlnou). V první řadě je třeba předpokládat, že kovový povrch základního materiálu více či méně oxiduje (obr. 2-A). Této oxidaci nelze zabránit, vzniká ve zlomku sekundy za přítomnosti kyslíku. Vzhledem k tomu, že povrch základního materiálu je zoxidovaný, pájecí slitina se špatně smáčí a nemůže vytvořit dostatečně kvalitní spojení. Proto se do procesu pájení, respektive přímo do pájky, přidávají další materiály, které napomáhají odstraňovat některé negativní vlivy.

U pájení přetavením je pájecí pasta nanесena na zoxidovaný povrch. Pasta je tvořena z tavidla, aktivátorů, pájky v podobě zrn a několika dalších technologicky nezbytných látek.

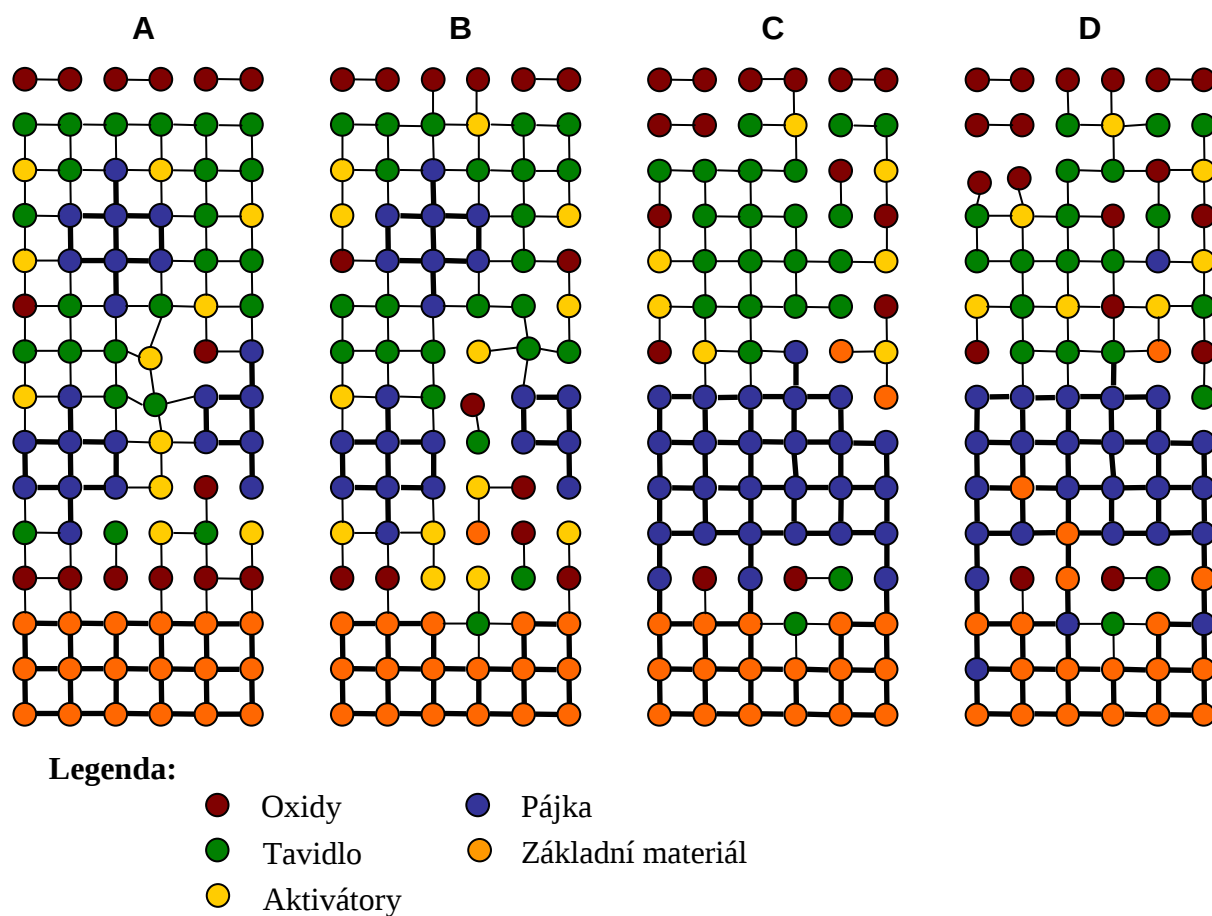
V případě pájení vlnou je tavidlo na kovový povrch nastříknuto nebo nanесeno ve formě pěny. Tavidlo obsahuje složky, které při určité teplotě začínají být chemicky aktivní. Přírodní formy tavidla (např. kalafuna) jsou chemicky aktivní stále. Činnost syntetických tavidel je závislá na charakteru přídatných látek. Konkrétní složení přídatných látek si každý výrobce pečlivě chrání. Jsou používány např. kyselina fosforečná nebo jantarová. Tavidlo chrání pájecí pastu před oxidací. Po osazení je DPS (deska plošných spojů) předeheřtá na stanovenou teplotu (obr. 2-B). Výsledkem je aktivace tavidla, které začne reagovat s oxidy na povrchu materiálu a také zahřátí celého systému na teplotu blízkou přetavení. Molekuly tavidla tvoří

vazby, na které se začne vázat kyslík, obsažený v základním materiálu. Kromě toho, tavidlo chrání pájený povrch před opětovnou oxidací.

V závislosti na agresivitě aktivačních příměsí mohou na povrchu základního materiálu vznikat oxidy mědi a niklu. Vytvářejí se tak intermetalické fáze, které se dají jen velice těžko odstranit. Proto některá tavidla obsahují halogeny [10].

V roztaveném stavu je pájka vysoce reaktivní, velmi snadno oxiduje, pokud není chráněna tavidlem. Vlivem difúze atomů pájky do základního materiálu a stejně tak i atomů základního materiálu do pájky, se vytvoří pevná slitina (obr. 2-C). Během tohoto procesu vzniká intermetalická fáze. Čím vyšší je teplota, tím kratší je doba potřebná pro tuto reakci.

Během procesu pájení se pájka roztéká po základním materiálu. Intermetalické fáze se formují se zpožděním oproti smáčivosti pájky. Avšak je-li čas pájení příliš dlouhý, intermetalické fáze začnou „prorůstat“ do pájky a budou růst tak dlouho, dokud se povrchové napětí pájky nedostane do rovnovážného stavu nebo neskončí pájecí proces [10].



Obr. 2: Proces pájení (A – výchozí stav, B – předehřev, C – přetavení, D – chlazení)

3 PÁJITELNOST A POVRCHOVÉ ÚPRAVY

3.1 Pájitelnost a smáčivost

„Pájitelností se rozumí schopnost materiálů být smáčen při určité teplotě a za určitou dobu roztavenou pájkou” [8]. Pájitelnost také popisuje některé jiné a neméně důležité požadavky a potřeby, důležité při formování pájeného spoje. Na pájitelnost lze nahlížet ze tří hledisek:

- **Smáčivost** – povrch materiálu musí být dobře smáčitelný roztavenou pájkou po dobu, která je potřebná k vytvoření pájeného spoje.
- **Teplotní hledisko** – součástky a konstrukční prvky musí umožnit zahřátí pájecích plošek na požadovanou teplotu.
- **Odolnost vůči vznikajícímu teple při procesu pájení** – součástky, mechanické a konstrukční části musí odolat teplotnímu namáhání, aniž by se změnily požadované vlastnosti a funkce jednotlivých komponentů.

Smáčivost je obecně charakterizována jako schopnost tekutiny přilnout k povrchu pevných látek. Kapka roztavené pájky na povrchu smáčeného materiálu má tvar kulovitého vrchlíku. Aby bylo možné vytvoření objemu s klenutým povrchem na substrátu, musí existovat rozdíl v tlaku mezi vnitřním objemem kapaliny a vnějším prostředím. Tlak vnitřního objemu kapaliny musí být větší než tlak prostředí, jinak by se kapka rozpadla. Na povrchu pájky tak vzniká jakási elastická folie, způsobena energetickým stavem atomů na rozhraní prostředí. Tomuto jevu se říká povrchové napětí, je způsobeno skutečností, že daný atom v objemu materiálu je obklopen ve všech směrech jinými atomy převážně téhož prvku v krystalické mřížce kovu, zatím co atomy na povrchu materiálů mají některé vazby nahrazeny vazbami s atomy vnějšího prostředí. Vazby mezi atomy v objemu a na povrchu materiálu jsou odlišné a to je také důvod proč atomy na povrchu vykazují jiný energetický stav než v objemu materiálu.

Energetický stav na rozhraní dvou prostředí lze popsat následující rovnicí [10]

$$E = \gamma \cdot A \Rightarrow \gamma = \frac{E}{A}, \quad (2)$$

kde E je reprezentováno jako povrchová energie [J], γ představuje povrchové napětí [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$], A vyjadřuje plochu povrchu mezi dvěma prostředími [m^2]. Každé rozhraní dvou prostředí má své vlastní povrchové napětí:

- γ_{SP} (substrát - prostředí) pokovená DPS – tavidlo
- γ_{SK} (substrát - kapalina) pokovená DPS – pájka
- γ_{KP} (kapalina - prostředí) pájka – tavidlo

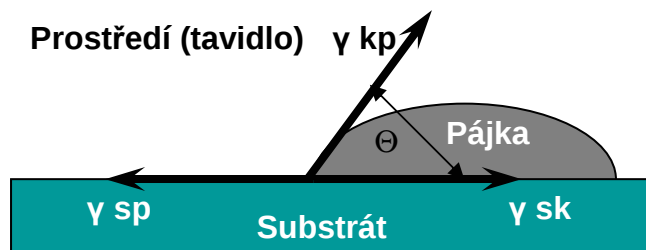
Podle přírodních zákonů platí, že každý systém se snaží dostat do polohy s minimální volnou energií. Proto se snaží systém substrát – pájka – prostředí snížit povrchovou energii, což představuje interakce na rozhraní prostředí všech zúčastněných materiálů. Minimum energie v systému lze vyjádřit následující rovnicí [10]

$$\gamma_{SP} \cdot A_{SP} + \gamma_{SK} \cdot A_{SK} + \gamma_{KP} \cdot A_{KP} = E_{MIN}, \quad (3)$$

kde γ představuje povrchové napětí mezi různými prostředími [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$], A vyjadřuje plochu povrchu mezi dvěma prostředími [m^2], E_{MIN} reprezentuje stav systému s nejmenší energií [J]. Smáčecí charakteristiky jsou výslednicí jednotlivých vektorových sil působícího mezifázového povrchového napětí (Obr. 3). Smáčivost je definována pomocí faktoru roztékavosti - tzv. smáčecím úhlem [4]. Velikost smáčecího úhlu lze odvodit z Youngovy rovnice [10]

$$\gamma_{SP} = \gamma_{SK} + \gamma_{KP} \cdot \cos \Theta, \quad (4)$$

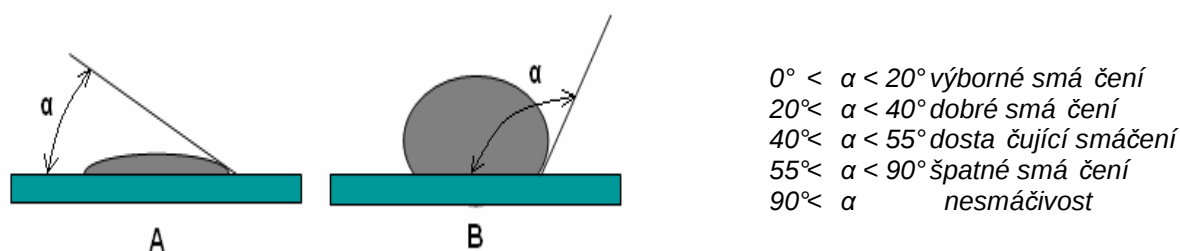
kde γ reprezentuje povrchové napětí mezi jednotlivými prostředími [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$] a Θ představuje velikost smáčecího úhlu [$^\circ$].



Obr. 3: Interakce sil během smáčení povrchu

Youngova rovnice nezohledňuje vliv drsnosti substrátu, deformaci roztavené kapky pájky vlivem gravitační síly a reakci pájky se substrátem. Rovnice pouze zahrnuje smočení tuhé fáze pájkou [4]. Z rovnice je zřejmé, že čím menší bude povrchové napětí na rozhraní pájka/prostředí/substrát a zároveň čím větší bude povrchové napětí na rozhraní substrát/prostředí, tím lepší smáčivost lze dosáhnout.

Kvalitu smáčivosti povrchu vyjadřuje tzv. kontaktní úhel. Čím menší, tím kvalitněji je povrch smáčen (Obr. 4). Špatná smáčivost může být způsobena nečistotami, oxidací pájeného povrchu i vývodů součástek, nevhodně zvoleným procesem, starou nebo kontaminovanou pájkou a mnoha dalšími aspekty.



Obr. 4: Smáčecí úhel A) dobrá smáčivost, B) nesnášivost

3.2 Povrchové úpravy

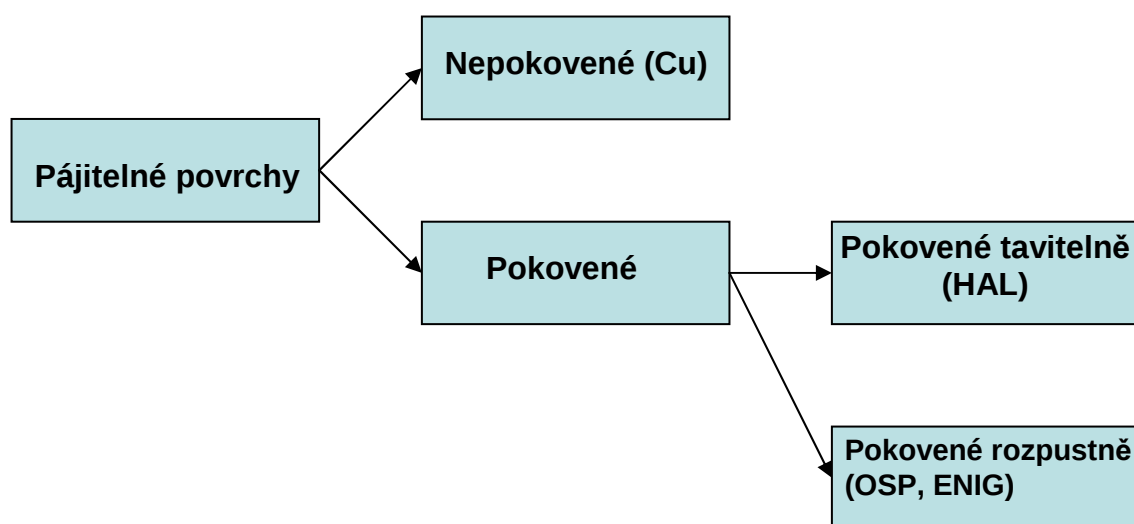
Pro zlepšení pájitelnosti materiálů (kontaktních plošek a vývodů) se používají technologie povrchových úprav. Základní materiál bez jakékoliv povrchové úpravy reaguje s vnějším prostředím, vytvářejí se různé oxidy, usazují se na něj nečistoty a tím se zhoršuje smáčivost a pájitelnost daného povrchu. Nejčastěji používané povrchové úpravy jsou popsány níže.

HASL (Hot Air Solder Leveling) - jedná se o technologii, kdy se DPS ponoří do roztavené pájky, poté se vytáhne a horkovzdušné nože odfouknou přebytečné množství pájky. Jelikož smáčivost pájky není ideální (smáčecí úhel je větší než 0°), není povrch pájecích plošek dokonale rovný, což působí jisté potíže při osazování součástek s malými roztečemi mezi vývody. Hrozí, že vyklenutí pájecí plošky posune vývod do jiné polohy.

OSP (Organic Surface Protectives) - působením ultrazvuku se měděný povrch zbaví prachových nečistot, poté dojde k mikrozaleptání, kde se měděné povrchy dočistí a následně se ponoří do lázně organických inhibitorů na bázi benzoimidazolu [4]. Takto vytvořená povrchová úprava disponuje lepší rovností a DPS nejsou vystaveny tepelnému namáhání jako u HASL. Povrchová úprava vydrží několik měsíců, v závislosti na skladovacích podmínkách. Pak ji lze stejným procesem obnovit.

ENIG (Electroless Nikle Immersion Gold) - chemické nanášení zlata přes vrstvu niklu. Vyznačuje dobrou pájitelností i pro bezolovnaté slitiny. *ENIG* je svou povahou sofistikovanější metoda, která vyžaduje pečlivou údržbu, jinak dojde k vytváření vadných pájených spojů prostřednictvím nedokonalé povrchové úpravy.

Imersní stříbro a cín - jedná se o metodu pocínování nebo postříbření. Upravené povrchy jsou perspektivní především pro bezolovnaté pájky. Postupem času však vytvářejí intermetalické vrstvy.



Obr. 5: Rozdělení pájitelných povrchů

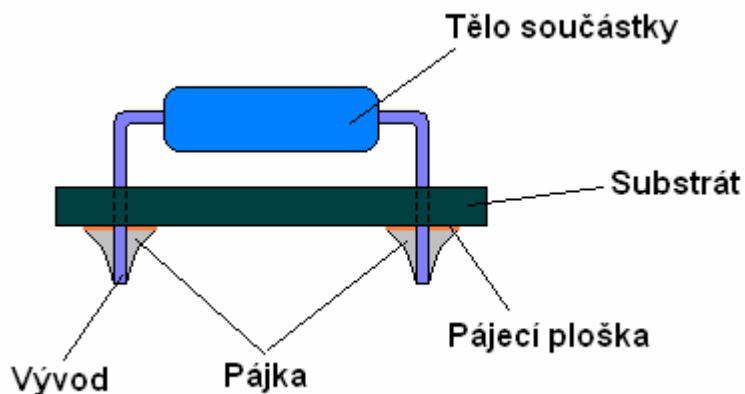
4 PÁJENÉ SPOJE

Pájený spoj je mechanické a vodivé spojení součástky se základním nosným materiálem pomocí pájky. Na kvalitě a tedy i spolehlivosti pájeného spoje se největší měrou podílí pájka (asi 75 %), zbylé procenta připadají na součástku (asi 5 %) a povrch nosného substrátu (asi 10 %), proto **je nutné věnovat nevíce času vhodnému výběru pájky**. Je třeba zdůraznit, že kvalita pájených spojů výraznou měrou ovlivňuje výslednou spolehlivost finálního produktu.

4.1 Tvary pájených vývodů

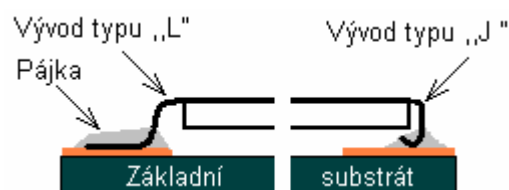
Stejně tak, jak se vyvíjel elektrotechnický průmysl, se s příchodem nových materiálů a technologií, vyvíjely i nové druhy součástek. Pouzdra komponent se stále miniaturizovala, zároveň však rostl počet jejich vývodů. To se projevilo zmenšováním roztečí mezi vývody a také změnou jejich velikostí a tvarů.

Jedna z nejstarších technologií osazování součástek byla klasická vývodová montáž. Kdy se součástky prostrčily skrz desku plošného spoje a jejich vývody se připájely na kontaktní plošky vodivé sítě (Obr. 6).



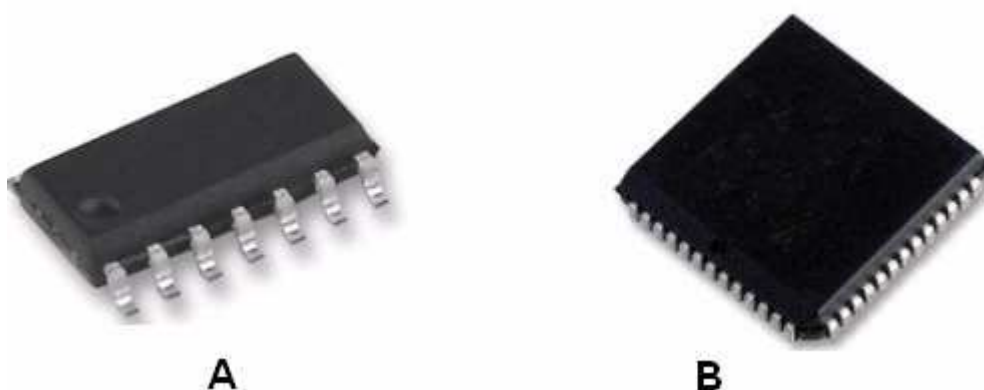
Obr. 6: Klasická vývodová montáž

S příchodem *Surface Mount Technology* (technologie povrchové montáže) se změnily i typy součástek, typy pouzder a uspořádání jejich vývodů. Byl kladen důraz na miniaturizaci, pouzdra se musela přizpůsobovat větším počtům vývodů, větší pracovní rychlosti, zároveň však musela dostatečně odvádět teplo. Všechny tyto požadavky se promítly na tvaru vývodů a tím i na tvaru pájených spojů. Začaly se vyrábět pouzdra s páskovými vývody (Obr. 7).



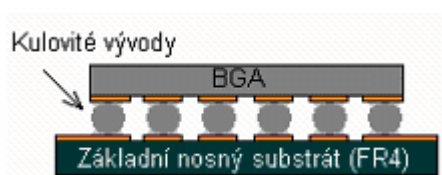
Obr. 7: Pouzdra s páskovými vývody

Mezi nejrozšířenější patří vývody typu **Gull wing** (Obr. 8-A), podobající se křídlu racka v letu a vývody typu **J Lead** (Obr. 8-B), z důvodu úspory místa jsou vývody zahnuty dopředu pod součástku.

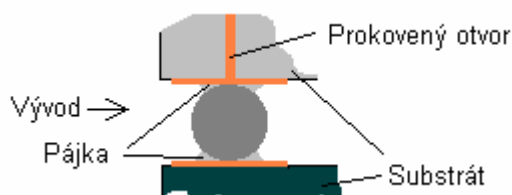


Obr. 8: Vývody typu: A) Gull wing, pouzdro SO; B) J-LEAD, pouzdro PLCC [10]

Se stále se zvětšující integrací součástek už nepostačovalo místo na bocích komponent a vývody se začaly umisťovat na spodní stranu těla součástky. Vyvinuly se tak pouzdra BGA (Ball Grid Array). Jejich spojení se základním substrátem je realizováno pomocí kuličkovitých nebo bradavkovitých vývodů, často ve formě pájky (Obr. 9), (Obr. 10).



Obr. 9: Vývodové propojení BGA pouzdra



Obr. 10: Detail vývodu BGA pouzdra

4.2 Přehled poruch pájených spojů

Vznik poruch a defektů v pájecím procesu může mít mnoho příčin. Většinou se jedná o špatně nastavený technologický proces. Celá řada parametrů (teplota, čas) přímo či nepřímo souvisí s konečnou kvalitou pájeného spoje. Poruchy pájeného spoje lze rozdělit na:

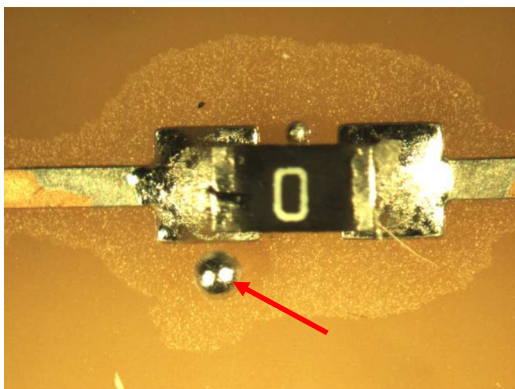
- poruchy související s činnostmi před započatím pájecího procesu,
- poruchy vznikající během procesu pájení,
- poruchy vznikající v průběhu životnosti pájeného spoje.

Aby bylo možné předcházet poruchám, je důležité rizikové parametry sledovat a udržovat je v určitých, předem daných mezích. Při překročení těchto mezí hrozí zvýšené riziko tvorby poruch, proto je potřeba kritický faktor v procesu najít a provést určitá opatření vedoucí k nápravě (změna teplotního profilu, jiný výběr materiálů apod.).

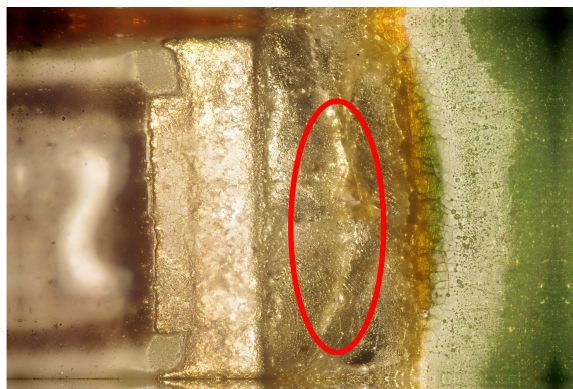
Některé typy poruch a jejich příčiny jsou uvedeny níže:

- **Zkratky** – jedná se o nechtěné vodivé propojení v obvodu nebo v systému. Zkratky jsou většinou způsobeny nadbytkem pájky ve spoji, nebo je tvoří vodivé nečistoty, zbytky tavidla apod.
- **Nezapájené spoje** – jedná se o poruchu kdy nedojde k propojení dvou částí systému, které být propojeny měly. Příčin může být několik – nedostatečný kontakt vývodu pouzdra a pájecí plošky, nedostatek pájky, špatná geometrie součástky (součástka není rovnoběžně se substrátem, je pootočená, ohnuté vývody apod.).
- **Kuličky pájky (Beadings)** – vznikají nadměrným množstvím pájky ve spoji. Vlivem povrchového napětí a sil působících při formování spoje se část pájecí slitiny oddělí a vytvoří samostatnou kuličku pájky (Obr. 11).
- **Efekt náhrobního kamene (Tombstone efekt)** – jedná se o jev, který obvykle nastává u dvoupólových SMD součástek. Vlivem většího povrchového napětí na prvním kontaktu součástky dojde ke „zvednutí“ druhého kontaktu z pájecí plošky a tím dojde k nezapájení druhého kontaktu. Nerovnoměrné povrchové napětí je většinou způsobeno nerovnoměrným ohřevem DPS a spojů, kdy na prvním spoji součástky je již pájka roztavena, na druhém nikoliv.

- **Whiskery** – jedná se o krystaly jehlicového nebo nitkového typu, prorůstající kovem nebo samovolně vyrůstající z povrchů kovů. Možnou příčinou vzniků whiskerů je atomová difúze, rekrystalizace, nebo napětí v povrchových vrstvách pájky.
- **Dutiny (Voids)** – jedná se o poruchu, která se začala ve větší míře vyskytovat až s příchodem bezolovnatých pájecích slitin. Na vznik voidů má vliv používání agresivnějších tavidel v souvislosti s používáním bezolovnatých pájek, vyšší teplota liquidu a vyšší povrchové napětí bezolovnatých slitin.
- **Studený spoj** – jde o spoj kdy se pájka nedostatečně spojí - neprodifunduje do pájecí plošky a vývodu součástky. Příčinou vzniku studeného spoje je nedostatečné prohřátí celého systému, zoxidovaný povrch vývodů a pájecích plošek.
- **Trhliny, hrboly a důlky v pájeném spoji** – v menší míře se nejedná o poruchu. Výskyt ve větší míře může snižovat spolehlivost pájeného spoje. Tento jev nastává především u bezolovnatých slitin, je způsoben vlastním složením pájky, především stříbro inklinuje k tvorbě nepravidelné povrchové struktury pájeného spoje (Obr. 12).



Obr. 11: Kuličky pájky



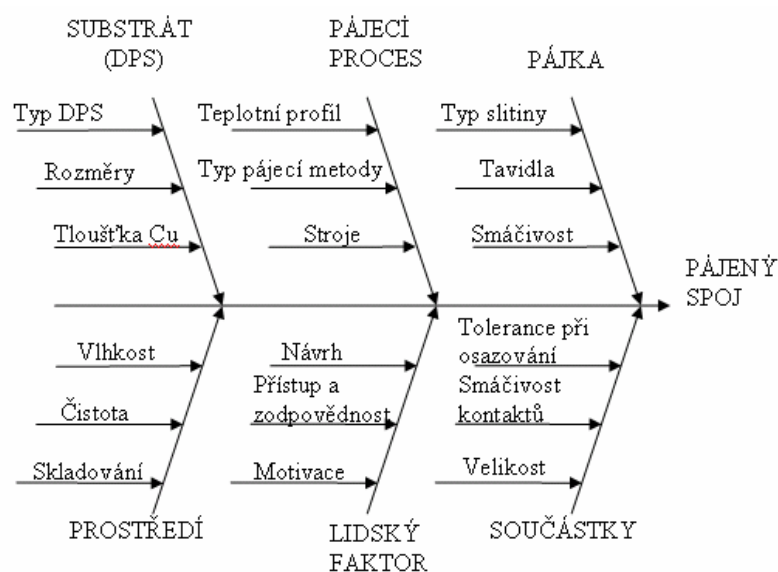
Obr. 12: Trhliny v pájce [12]

4.3 Spolehlivost a jakost pájených spojů

Podle ČSN 010102 je spolehlivost definována jako „Obecná vlastnost objektu spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce při zachování hodnot stanovených provozních ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených technických podmínek“ [4]. Se spolehlivostí pájeného spoje úzce souvisí i pojem jakost, ta je obecně definována jako „Stupeň splnění požadavků souborem inherentních znaků“ [13].

Z výše uvedených definic vyplývá, že spolehlivost a jakost pájeného spoje závisí především na stálosti jeho vlastností jak v čase, tak i v požadovaných mezích. Pájený spoj je velice komplexní systém, při jehož vzniku i během jeho životního cyklu působí mnoho faktorů, které se více či méně podílejí na jeho konečné spolehlivosti.

Kvalitní pájený spoj je charakterizován dokonalou smáčivostí vývodů i pájecích plošek, lesklým a hladkým povrchem pájky bez jakýchkoliv viditelných poruch a defektů. Musí být přesně definováno, který pájený spoj je přípustný a který ne [8], má-li být zachován určitý standard jakosti finálního výrobku. Pokud pájený spoj neodpovídá technickým požadavkům, je třeba hledat příčiny vzniku daného problému. Vzhledem k tomu, že vznik pájeného spoje souvisí s obrovským množstvím faktorů ovlivňujících jeho výslednou jakost, není vždy možné nalézt příčinu a provést taková opatření, která by vedla k její nápravě. Hledáním nejpravděpodobnějších příčin vzniklého problému se zabývá Ishikawův diagram (Obr. 13).



Obr. 13: Ishikawův diagram

5 VLIV PŘÍDAVNÝCH ATMOSFÉR A JEJICH KONCENTRACE

5.1 Dusíková atmosféra

Konvenční pájení v dusíkové atmosféře se v celosvětovém měřítku začalo rozšiřovat na počátku devadesátých let. Výhody pájení v dusíku jsou zřejmé:

- větší procesní okno,
- omezení vzniku defektů,
- možnost použití pájecích slitin při nižších teplotách,
- ochrana před povrchovou oxidací,
- snížení povrchového napětí pájky a tím zlepšení smáčivosti.

Dusík (N_2), je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu, nacházející se v páté skupině periodické soustavy prvků. Dusík zahrnuje největší část zemské atmosféry – 75,5 % z celkového objemu. V procesech pájení se využívají jeho netečné chemické vlastnosti.

Fakt, že dusík je netečný, znamená, že neochotně reaguje s jinými chemickými sloučeninami a tudíž je neschopný chemicky pozměnit materiály zapojené do procesu pájení. Jeho molekula je tvořena dvěma atomy vzájemně propojenými velmi silnou trojnou vazbou (Obr. 14).



Obr. 14: Molekula dusíku a jeho trojná vazba

Dusíkem nelze odstranit oxidy nebo organické kontaminace z pájených povrchů, ale je možné jeho přítomnosti vytěsnit nežádoucí látky v pájecím procesu. To je primární důvod proč se také dusík do procesu pájení zavádí.

Spotřeba dusíku v moderních systémech pájení přetavením je 15 až 25 m³ za hodinu při zbytkové koncentraci kyslíku okolo 25 ppm. Vyšší cena dusíku je obvykle kompenzována snížením ceny oprav, menší mírou defektů a zvýšením spolehlivosti, jež se tak nepřímo promítne na ceně výsledného produktu.

Množství oxidů vznikajících na kovových površích vyjadřuje následující rovnice [14]

$$\frac{m}{A} = k \cdot \sqrt{t}, \quad (5)$$

kde m představuje hmotnost oxidů [kg], A reprezentuje plochu oxidů [m²], t je doba, po kterou oxidy rostou [s] a k je růstový koeficient vycházející z Arrheniovy rovnice, která popisuje vliv teploty na rychlost chemické reakce [14]

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{B}{T}\right), \quad (6)$$

kde k představuje růstový koeficient, k₀ reprezentuje koeficient rozšiřování (1,6 · 10² kg·m⁻²), B je aktivační energie [J·mol⁻¹] a T představuje teplotu [K].

Z výše popsaných rovnic je tedy jasné, že se zvyšující se teplotou se bude urychlovat formování oxidové vrstvy na kovových površích. Z předešlého rovněž vyplývá, že růst oxidových vrstev je také závislý na typu povrchové úpravy. Je zřejmé, že rychlost růstu oxidových vrstev na čisté mědi bude probíhat mnohem rychleji než na mědi chráněné povrchovou úpravou.

Cín reaguje mnohem snadněji s atmosférickým kyslíkem (vytváří oxidy), než např. s nějakou povrchovou úpravou, to je také jeden z důvodů proč bezolovnaté materiály bohaté na cín vykazují horší smáčecí charakteristiky ve vzduchové atmosféře. Podle [14] pájecí pasty, které mají menší poloměr zrnitosti a tudíž i větší aktivní povrch pro tvorbu oxidů, mohou vykazovat spolehlivější chování v bezkyslíkatých atmosférách. Lepší smáčecí charakteristiky v dusíkové atmosféře lze pozorovat u většiny pájitelných povrchů. Inertní atmosféra zabraňuje oxidaci, která by jinak kontinuálně probíhala během teplotního zahřívání a zároveň zabraňuje světle hnědému zabarvení DPS, které lze v některých případech pozorovat.

Smáčecí charakteristiky jsou navíc podporovány snižujícím se povrchovým napětím v dusíkové atmosféře. Bell ve své publikaci [14] s odkazem na jiné autory tvrdí, že povrchové napětí je redukováno v závislosti na zbytkové koncentraci kyslíku stejně dobře jak pro olovnaté pájky, tak i pro bezolovnaté pájky. S klesajícím povrchovým napětím tekuté pájky roste její smáčivost po vývodech součástek, resp. po pájených ploškách.

Jaká zbytková hodnota kyslíku, resp. jaká koncentrace dusíkové atmosféry je nejideálnější pro pájení přetavením?

Tento problém je diskutován již řadu let v technické literatuře i v aktuální průmyslové praxi. V [14] je opět odkazováno na řadu autorů, z nichž každý považuje jinou hodnotu za adekvátní. Vesměs se dá říci, že zbytková koncentrace kyslíku pro pájení přetavením by se měla pohybovat v rozmezí od < 100 ppm do 1000 ppm. Ideální hodnotu zbytkové koncentrace kyslíku stanovit nelze, vždy závisí na ostatních faktorech vstupujících do procesu pájení a měla by se přizpůsobovat povaze a potřebám konečného produktu. Vliv zbytkové koncentrace kyslíku na teplotu pájky, při níž se začne roztékat, a na požadovaný stupeň přehřátí je uveden v tab. 5.

Tab. 5: Zbytková koncentrace kyslíku a požadovaný stupeň přehřátí [14]

Pájka	Bod přetavení [C]	Koncentrace zbytkového kyslíku			Průměrná míra přehřátí [C]
		10	100	1000	
		Teplota při které se pájka začne roztékat [C]			
Sn63Pb37	183	205	207	270	22 až 87
Sn96,5Ag3,5	221	230	238	240	9 až 19
Sn99,3Cu0,7	227	230	234	245	3 až 18
Sn95Sb5	240	246	255	258	6 až 18

Jestliže je koncentrace zbytkového kyslíku udržována na malé úrovni (< 100 ppm), je redukována i míra přehřátí nad příslušný bod přetavení vybrané slitiny a pájka snižuje svoji schopnost smáčet se po povrchu. V tab. 6 jsou uvedeny závislosti smáčecích časů na teplotě, a použité atmosféře.

Tab. 6: Smáčecí čas na Ni -substrátu [14]

Čas smáčení $t_{2/3}$ [s]				
Pájka	Stejná teplota, rozdílný stupeň přehřátí		Rozdílná teplota, stejný stupeň přehřátí	
	250°C, vzduch	250°C, dusík 20 ppm O ₂	$T_M + 50$ K, vzduch	$T_M + 50$ K, dusík 20 ppm O ₂
Sn63Pb37	1,4	0,8	1,5	1,0
Sn96,5Ag3,5	1,7	1,4	1,1	1,0

Pájky uvedeny v tab. 6 byly roztaveny bez tavidla, v příslušné dusíkové atmosféře. Vzhledem k tomu, že tvorba oxidu je redukována zbytkovou hodnotou kyslíku v prostředí,

teplota přetavení může být snížena s přiměřenou koncentrací dusíkové atmosféry. Smáčecí doba se zkracuje, podle tab. 6 se smáčecí časy pro pájku Sn96,5Ag3,5 sníží na hodnoty získané pro pájku SnPb, při zbytkové koncentraci kyslíku okolo 20 ppm. To je významná výhoda, která je v některých případech naprosto nezbytná pro procesy s bezolovnatými materiály.

Zlepšení smáčivosti, vyplývající z použití dusíkové atmosféry má také pozitivní vliv na teplotní profil. Na jednu stranu může být čas přetavení zkrácen o čas, který byl ušetřen rychlejším smáčením, na druhou stranu maximální teplotní vrchol může být snížen na takovou teplotu, která je potřebná - teplota přetavení + určitá míra přehřátí.

Podle [14] mohou být dobré výsledky v pájení přetavením dosaženy při vrcholové teplotě 193 °C s použitím SnPb pájecí pasty v dusíkové atmosféře. Dobré výsledky pro bezolovnatou pájku SAC jsou také prokázány s mírou přehřátí o 10 K (217 + 10 °C) v dusíkové atmosféře.

5.2 Defekty pájení a dusíková atmosféra

Podle [14] způsobuje dusíková atmosféra snížení míry tvorby defektu, v některých případech až o 75 % a tudíž snížení ceny oprav. V následující kapitole bude prozkoumán vliv dusíku na některé základní defekty, vznikající při pájení přetavením.

Tvorba samostatných kuliček pájky (Beadings) je způsobena jednotlivými (oddělenými) zrny pájecí pasty, které se dostanou pod součástku a během procesu přetavení se vytlačí na stranu ve formě přetavených kuliček pájky. Dusíková atmosféra snižuje tento typ poruch. Důvodem je pravděpodobně lepší a rychlejší přetavení jednotlivých zrn pájky v rámci pasty v jednotném objemu pájky. Díky absenci kyslíku nevznikají na povrchu zrn pájky oxidové vrstvy, které by mohly ohrozit přetavení do jednotné masy. To snižuje pravděpodobnost, že jednotlivá zrnka pájecí pasty vniknou do mezery pod součástku a vytvoří samostatnou přetavenou kuličku.

Redukci voidů (dutin v objemu pájky) lze taky vysledovat z lepšího smáčení. Pájka, která se smáčí rychleji, je lépe schopna rozptýlit plyny vznikající při procesu přetavení. Výsledky však neplatí obecně pro všechny pájené spoje. V publikaci [14] je uvedeno, že v některých případech horší smáčení přispělo ke snížení voidů u BGA pájených spojů.

Tvorba monokrystalických vláken, známých jako whiskery, je speciální typ defektů, které vznikají na povrchu kovů. Mohou narůst do velmi dlouhých rozměrů a proto představují riziko vzniku zkratu pro elektronické součástky. Jednou z příčin růstu whiskerů je mechanické pnutí ve vrstvách blízko povrchu. Oxidové fáze, vzniklé v pájeném spoji, vyvíjejí tlak na

sousední fáze cínu, čímž se podporuje růst whiskerů. V dusíkové atmosféře je ovšem růst oxidových fází do značné míry omezen.

Dobré smáčecí podmínky, které převládají v dusíkové atmosféře, nemusí vždy vést k očekávanému zlepšení výsledků pájení. Pájené spoje součástek jsou mimo jiné charakterizovány i tím, jak dobře je vytvořen meniskus. V tomto ohledu je důležitá výška navzlínané pájky. V některých případech může být v dusíkové atmosféře výška navzlínané pájky menší než ve vzduchu. Je to způsobeno tím, že pájka v dusíkové atmosféře má větší smáčivost. Tento jev se samozřejmě projeví na tvaru menisku a tudíž i na kvalitě pájeného spoje.

Tombstones (defekty, kdy se součástka „postaví“ na hranu) vznikají když je smáčecí doba obou stran dvojpólové součástky rozdílná. Jestliže se jeden z pájených spojů začne tavit dříve než ostatní, smáčecí síly a povrchové napětí roztavené pájky vzepře součástku nahoru. V tomto případě neexistuje žádná šance, že by se zapájel druhý kontakt součástky. Více tombstones efektů je častěji pozorováno v souvislosti s dusíkovou atmosférou v pájení přetavením. Je to způsobeno lepší smáčivostí a větším rozdílem smáčecích časů mezi dvěma kontakty součástky.

5.3 Kontrola dusíku

Přestože se vyskytují výše uvedené výhrady, výhody pájení v dusíku jsou nesporné. Hodnoty zbytkového kyslíku menší než 100 ppm, se používají ve skutečné výrobní praxi, kde adekvátně brání oxidaci pájených povrchů [14].

Jeden z nástrojů použitých k zabránění tombstones efektů je cílené zvedání zbytkové hladiny kyslíku v procesní atmosféře např. od 500 ppm do 1000 ppm O₂. Proměnná hladina zbytkové koncentrace kyslíku může být implementována v pájení přetavením pomocí dvou různých technických řešení:

- dopování kyslíkem,
- kontrolou koncentrace dusíku.

V případě dopování kyslíku je atmosféra v komoře cíleně kontrolována, zatím co se kontinuálně dodává dusík do procesu. Definované množství kyslíku do procesní komory je dodáváno přes servo-ventil, který je otevřen jen tolik, kolik je potřeba. Tolerance $\pm 10 \%$ může být snadno udržována následně popsanou metodou.

Jsou-li do systému vkládány DPS, hladina zbytkového kyslíku trochu vzroste, tento nárůst je potřeba sledovat a podle něj zkalibrovat servo-ventil. Po kalibraci již není nutné kontinuální měření hladiny zbytkového kyslíku během dopování. Spotřeba dusíku v pájení přetavením není ovlivněna dopováním kyslíku zůstává konstantní, samozřejmě z toho plyne také to, že dusík v tomto případě nelze ušetřit.

Jiný přístup se používá k ovládání koncentrace dusíku. V tomto případě je požadovaná hladina ppm držena nepřetržitým měřením zbytkové koncentrace kyslíku. Toho je dosaženo tak, že se do procesní komory vytvoří přívod dusíku a proměnně se přidává nebo ubírá, v závislosti na zbytkovém množství kyslíku. To má za následek různou míru spotřeby dusíku v závislosti na tom, jak moc je vytížen proces pájení, jak velký je vstupní a výstupní otvor (v závislosti na velikosti DPS) apod. Ovládání koncentrace dusíku je vhodné pro flexibilní výrobní linky, kde se mění zatížení linky v závislosti na počtu kusů DPS a šířce pro vstup a výstup dopravníkového pásu.

Použití dusíkové atmosféry v systémech pájení přetavením zvyšuje provozní náklady. Je však třeba brát v úvahu, že poklesne míra různých defektů a náklady na opravu se sníží. V závislosti na velikosti vstupního a výstupního průřezu, je spotřeba dusíku 15 až 25 m³ za hodinu pro průběžné systémy. V tab. 7 je příklad výpočtu spotřebovaného dusíku za metr krychlový.

Tab. 7: Cena dusíku v závislosti na spotřebě [14]

	Minimum	Maximum
Cena dusíku	0,10 Euro/m ³ ; 2,50 Kč/m ³	0,26 Euro/m ³ ; 6,50 Kč/m ³
Spotřeba 15 m ³ /h	1,5 Euro/m ³ ; 37,50 Kč/m ³	3,9 Euro/m ³ ; 97,50 Kč/m ³
Spotřeba 25 m ³ /h	2,5 Euro/m ³ ; 62,50 Kč/m ³	6,5 Euro/m ³ ; 162,50 Kč/m ³

5.4 Jiné typy atmosfér

Ochranou atmosféru lze vytvořit i pomocí inertních plynů, mezi něž patří Argon, Xenon, Krypton, Neon a Radon. Tyto prvky patří do skupiny vzácných plynů. Důvodem jejich nízké reaktivity je plně obsazena poslední hladina valenčními elektrony. Jejich výskyt na zemi je však poměrně vzácný a jejich použití v elektrotechnickém průmyslu a především v pájení by bylo zřejmě ekonomicky neúnosné.

Jistou alternativu skýtá pájení v parách. Oxidaci pájených povrchů zabraňují páry inertního media. Princip metody pájení v parách spočívá v tom, že inertní medium předává

teplo pájenému výrobku změnou svého skupenství. V uzavřené soustavě se zahřívá medium až k bodu varu, vznikající páry stoupají vzhůru a ohřívají pájený objekt. Teplo z par se předává pájenému výrobku procesem kondenzace, teplota media přitom zůstává stejná (latentní teplo). Vhodným výběrem přenosového media se určuje maximální teplota v pájeném systému [15].

6 TECHNIKA DESIGN OF EXPERIMENTS

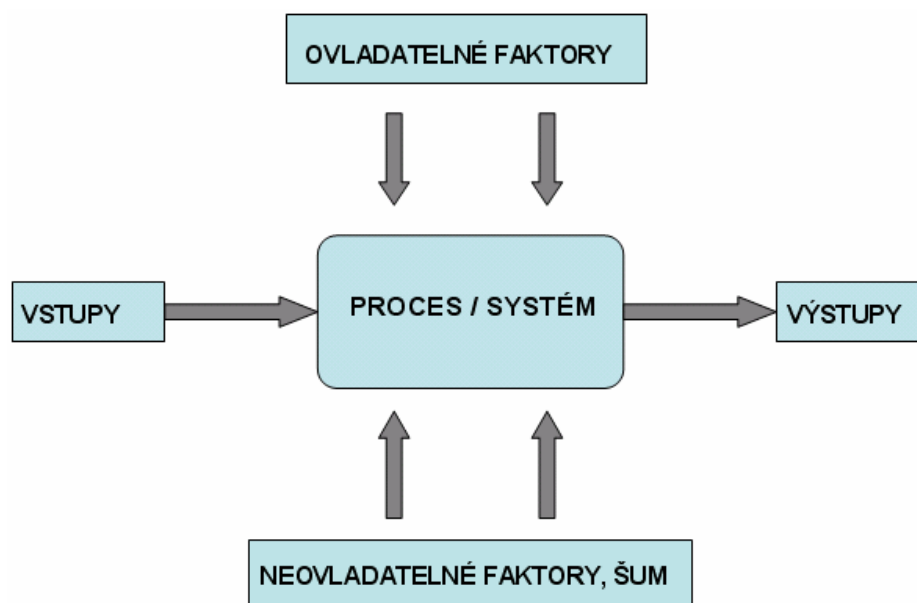
Technika DOE (Design of Experiments) nebo také metoda plánovaných experimentů, je analytická metoda, která umožňuje řešení složitých a komplexních úloh, kdy je konečný výsledek ovlivňován velkým počtem faktorů. Využívá kombinaci analytických a statistických metod k řešení daných problémů. Metoda DOE je založená na testování různých kombinací (úrovní) faktorů, které více či méně ovlivňují daný proces. Obrovská výhoda metody DOE oproti klasickým experimentům spočívá v tom, že je schopná identifikovat případné interakce mezi faktory.

„Cílem DOE je nalézt kritické faktory a jejich optimalizaci, minimalizaci variability a v závěru vytvoření tzv. robustního modelu, kde jsou charakteristiky odolné vůči působení vnějších přirozených vlivů. Pochopení kritických faktorů, jejich interakcí a vlivu na způsobilost procesu umožňuje definovat požadavky a tolerance pro daný proces. U faktorů, které kritické nejsou, je možné stanovit tolerance volnější. Tím samozřejmě dochází ke snižování a optimalizaci nákladů spojených s daným procesem“ [18].

Metoda DOE vyžaduje precizní přípravu před realizací experimentu. Je nutné nejprve zvážit problém a uvědomit si jakého cíle má být dosaženo. Poté je třeba naplánovat samostatný experiment, zvolit kritické faktory a jejich úrovně a nakonec interpretovat výsledky.

6.1 Plánovaný experiment

Plánovaný experiment je prováděn za účelem dosažení nových poznatků, týkajících se zkoumaného procesu nebo systému. Procesem se zde rozumí souhrn metod, zařízení, lidí a dalších prostředků, které transformují vstupy většinou ve formě materiálů nebo polotovaru na výstupy ve formě dalších polotovarů nebo konečných výrobků, které mají nějaké měřitelné vlastnosti nebo parametry. Do procesu také vstupují ovladatelné faktory, které lze v nějakém rozsahu nastavit a zároveň i faktory neovladatelné, někdy ve formě šumu, které řídit nelze. Obecné schéma procesu je zobrazeno na obr. 15 [19].



Obr. 15: Obecné schéma procesu

Při plánování experimentu je potřeba stanovit, které výstupní charakteristiky budou sledovány. Dále je potřeba určit významné faktory, vstupující do procesu a jejich úrovně. Z faktorů a jejich úrovní pak sestavit faktorový plán.

6.2 Faktorový plán

Faktorový plán stanovuje počet pokusů experimentu, podmínky a pořadí měření. Dle typu zkoumaného problému je možné volit mezi následujícími typy experimentů:

- experiment s jedním faktorem,
- úplný faktorový experiment,
- částečný faktorový experiment.

Kombinací faktorů a úrovní vzniká matice popisující všechny možné případy, které mohou nastat. Před provedením plánovaného experimentu se uskuteční zkušební pokus pro ověření bezproblémového průběhu experimentu s parametry vybraných faktorů v daných experimentálních mezích.

Z experimentu jsou vyvozeny závěry a ty pak dále presentovány a diskutovány. Po ukončení každého experimentu (i neúspěšného) je potřeba stanovit další postup. Úspěšný experiment je ověřen opakovanými zkouškami a teprve z těchto zkoušek kvalifikovat nové poznatky a postupy.

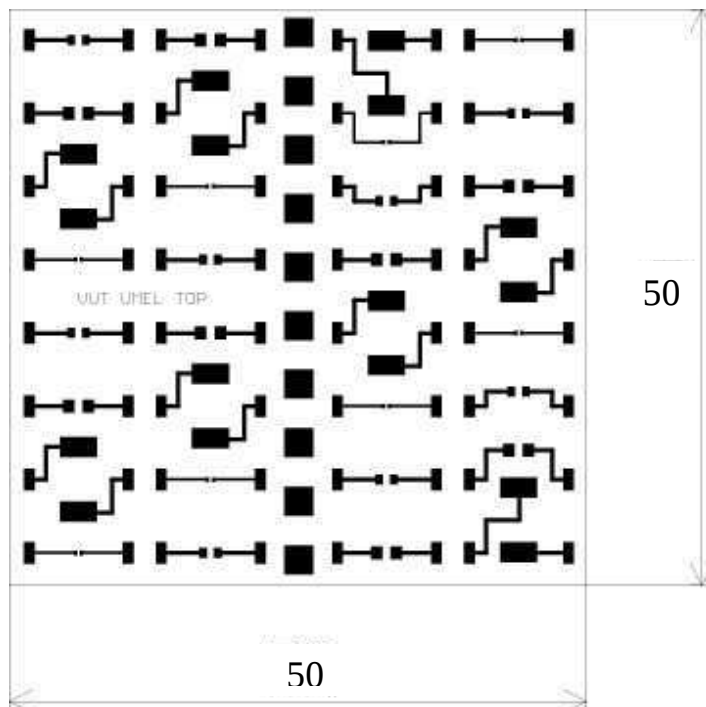
7 NÁVRH TESTOVACÍCH DPS A VÝVOJ PROCESU PÁJENÍ PŘETAVENÍM S POUŽITÍM DUSÍKOVÉ ATMOSFÉRY

7.1 Návrh testovacích DPS

Pro posouzení vlivu dusíkové atmosféry a jiných faktorů, působících na spolehlivost pájeného spoje, byla navržena testovací struktura (obr. 16).

Pro testování smáčivosti je na testovací struktuře navržena sada deseti čtvercových pájecích plošek o rozměrech 2,54 x 2,54 mm. Na tyto plošky se při tisku nanese určitý objem pájecí pasty, který je definován výškou a velikostí otvorů v šabloně.

Struktura byla vytvořena v návrhovém prostředí EAGLE 5.2.0, pájecí plošky byly definovány knihovnou rlc.lbr, která odpovídá všem specifikacím IPC normy. Rozložení a orientace součástek na DPS je navrženo tak, aby nastal rovnoměrný přenos tepla při pájení a s ohledem na plánovaný test stříhem na zařízení DAGE.



Obr. 16: Testovací struktura

Jelikož **povrchové úpravy patří mezi faktory významně ovlivňující spolehlivost** pájeného spoje a jsou velmi perspektivní pro bezolovnaté slitiny, testovací struktury byly navrženy s následujícím typem povrchových úprav:

- povrchová úprava imersním cínem,
- povrchová úprava zlatem nanášeným přes vrstvu niklu.

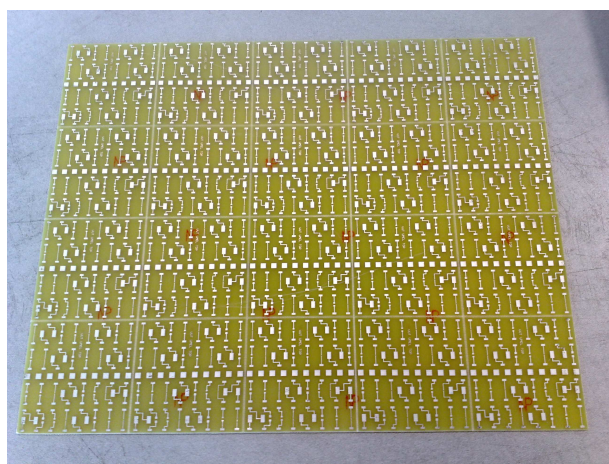
Vzhledem k velkému počtu testovacích DPS a také z technologických důvodů souvisejících s výrobou, byly testovací struktury vyrobeny firmou PRAGOBOARD. Vybrané parametry testovacích struktur jsou uvedeny v tab. 8 [16].

Tab. 8: Vybrané parametry testovacích DPS

Parametry	Hodnota
Typ základního materiálu	FR4
Tloušťka základního materiálu	1,5 mm
Tloušťka naplátované mědi	35 μm
Povrchová úprava	Imersní Sn / ENIG
Tloušťka povrchových úpravy (Imersní Sn)	1 – 1,2 μm
Tloušťka povrchových úpravy (ENIG)	4 μm Ni; 0,09 μm Au

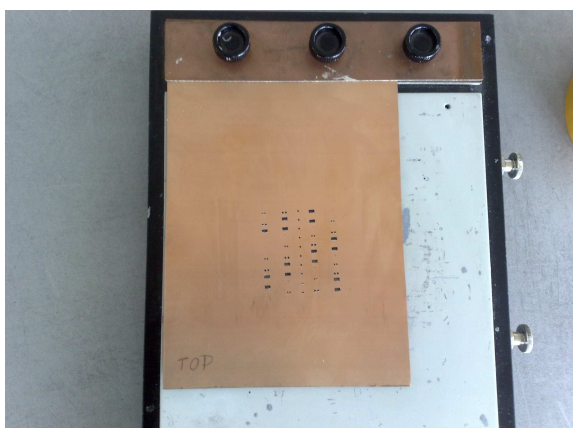
7.2 Příprava vzorků na pájení

Testovací DPS byly dodány přířezech o rozměrech 200 x 250 mm (obr. 17). Před nanesením pájecí pasty je nutné přířezy rozdělit na jednotlivé DPS a provést očištění lihem, aby se pájené povrchy zbavily zbytků mastnoty a prachu.

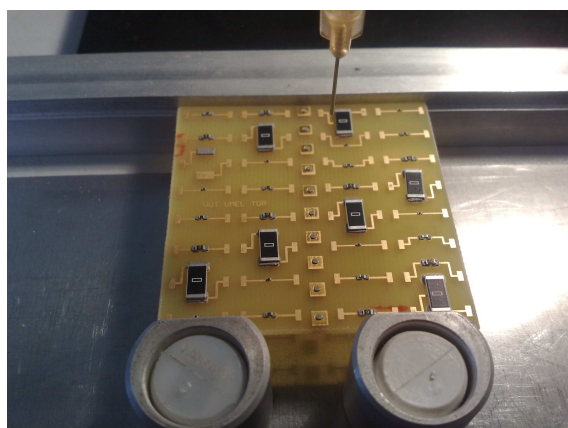


Obr. 17: Přířez

Tisk past byl proveden přes kovovou šablonu (obr. 18) o tloušťce 150 μm . Dostatečně promíchaná a vytemperovaná pájecí pasta v kombinaci s jednotnou výškou šablony zaručuje relativně velkou přesnost naneseného objemu pasty na pájecí plošky. Osazení DPS proběhlo na SMT manipulátoru (obr. 19).



Obr. 18: Šablona pro tisk past



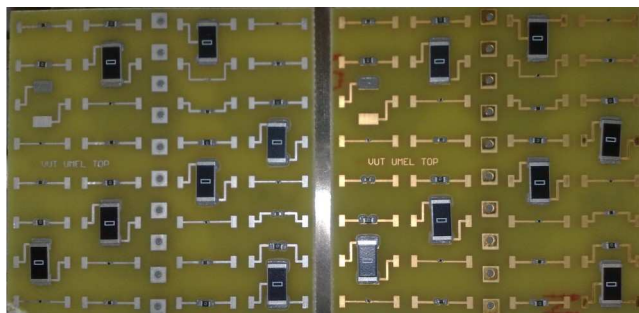
Obr. 19: Osazování DPS na SMT manipulátoru

Použité bezolovnaté pájecí pasty byly vybrány s ohledem na jejich vlastnosti diskutované v kapitole (1). Pro objektivní určení míry vlivu pájecích slitin na spolehlivost pájeného spoje byla také testována referenční olovnatá pájecí slitina. Vybrané pájecí pasty a jejich vlastnosti jsou uvedeny v tab. 9. Další vlastnosti past jsou uvedeny v literatuře [6] a [17].

Tab. 9: Pájecí pasty a jejich vlastnosti

Typ pájecí pasty	SAC3-XF3+	SN100C-XF3+	S6M-XM3S
Složení	Sn96,5/Ag3/Cu0,5	Sn99,25/Cu0,7/Ni0,05	Sn62,5/Pb36,5/Ag1
Výrobce	COBAR	COBAR	COBAR
Kód Tavidla	F3+	F3+	M3S
Solidus [°C]	217	227	179
Liquidus [°C]	219	227	183
Velikost částic [μm]	25 – 45	25 – 45	24 – 45
Obsah tavidla [% w/w]	12	12,07	9,71
Obsah kovů [% w/w]	88	87,93	90,29
Hustota [kg/m^3]	7500	7400	8400
Míra zatížení živ. prostředí	1	1	4,88

Natisknuté a osazené vzorky (obr. 20) byly zapájeny metodou přetavením v exsikátoru s použitím dusíkové atmosféry. O vývoji použité metody bude pojednáno v další kapitole.



Obr. 20: Natisknuté a osazené vzorky

7.3 Pájení přetavením s použitím dusíkové atmosféry

7.3.1 Pájení přetavením v sázkové peci HR21

Cílem bylo upravit vsázkovou pec HR21 pro pájení přetavením tak, aby bylo možné použít dusíkovou atmosféru. Úprava spočívala v instalaci přívodního vedení pro dusíkovou atmosféru a odvodního vedení pro analyzátor zbytkové koncentrace kyslíku. Dalším cílem bylo utěsnit pec tak, aby byly ztráty dusíku co nejmenší a bylo dosaženo požadované koncentrace.

Přes veškerou vyvíjenou snahu se nepodařilo pec utěsnit v takové míře, aby ztráty dusíkové atmosféry byly přijatelné. Příčinnou bylo samotné konstrukční řešení pece. Pokračování v dalších experimentech by bylo velmi náročné a proto bylo rozhodnuto o vývoji jiné metody, zaměřené na minimální ztráty dusíkové atmosféry.

7.3.2 Pájení přetavením v exsikátoru

Exsikátor je dvoudílná nádoba, která se v laboratořích nejčastěji používá k sušení vzorků, je vyrobená ze skla nebo plastu. Ve víku exsikátoru se nachází otvor pro čerpání vakua, který zároveň slouží pro dodávání dusíkové nebo vzduchové atmosféry. Volba atmosféry se provádí sérií jehlových ventilů, které vpouštějí požadovanou atmosféru do hlavního vedení (obr. 21).



Obr. 21: Detail ventilů pro volbu požadované atmosféry

Aby bylo možné pájet metodou přetavením, bylo nutné provést určité úpravy konstrukce exsikátoru, především se jednalo o:

- Instalaci zařízení, které by zajistilo dostatečné množství tepla, potřebné pro přetavení pájky. Kvůli limitujícím rozměrům exsikátoru byla zvolena ohřevná deska s odporovou spirálou zahřívanou elektrickým proudem.
- Instalaci vzduchotěsných přechodů z exsikátoru do volného prostoru pro termočlánky, napájení ohřevné desky a větrák. Tyto instalace byly řešeny pomocí konektorů upevněných skrz stěnu exsikátoru. Konektory byly utěsněny silikonovým tmelem.
- Instalaci ventilu pro analyzátor zbytkové koncentrace kyslíku. Ve stěně exsikátoru byl vyvrtán otvor, kterým byl prostrčen ventil s tenkou mosaznou trubičkou (obr. 22). Utěsnění bylo opět provedeno silikonovým tmelem.

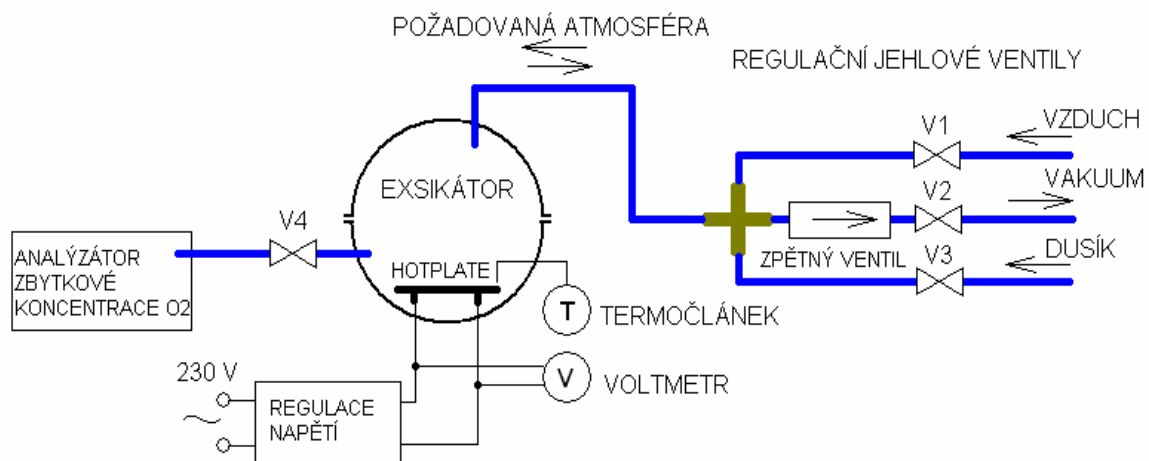


Obr. 22: Detail ventilu pro analyzátor zbytkové koncentrace kyslíku

7.3.3 Postup při pájení

Na horní stranu DPS se připevní kaptonovou páskou termočlánek. Poté se vzorek vloží na ohřevnou desku (hotplate) umístěnou v exsikátoru a přiklopí se víkem. Otevřením jehlového ventilu V2 (ventily V1, V3 a V4 jsou uzavřeny dle obr. 23) se z prostoru pájení začne odčerpávat vzduch až na hodnotu vakua limitovanou možnostmi vakuové aparatury (20 % atmosférického tlaku). Poté se ventil V2 uzavře. Otevřením ventilu V3 začne do prostoru pájení proudit dusík. Ventil V4 vedoucí k analyzátoru zbytkové koncentrace kyslíku je možné otevřít až po vyrovnání tlaku uvnitř exsikátoru s vnějším prostředím, jinak hrozí poškození senzoru analyzátoru. Úroveň zbytkové hladiny kyslíku je možné regulovat ventilem V3. Po dosažení požadované koncentrace se na regulačním transformátoru nastaví napětí, kterým je napájena ohřevná deska (hotplate na obr. 23). Velikost napětí závisí na požadovaném profilu pájení a velikosti DPS. Pro DPS, pájené v rámci diplomové práce, byla hodnota stanovena experimentálně na 100 V. Vzrůstající teplota snímána termočlánekem je sledována a při dosažení hodnoty 200 °C je napájení ohřevné desky vypnuto, jeho tepelná kapacita způsobí další nárůst teploty o 40 °C. Maximální teplota v procesu pájení je tedy 240 °C, což v kombinaci s dusíkovou atmosférou stačí i pro přetavení bezolovnatých pájek.

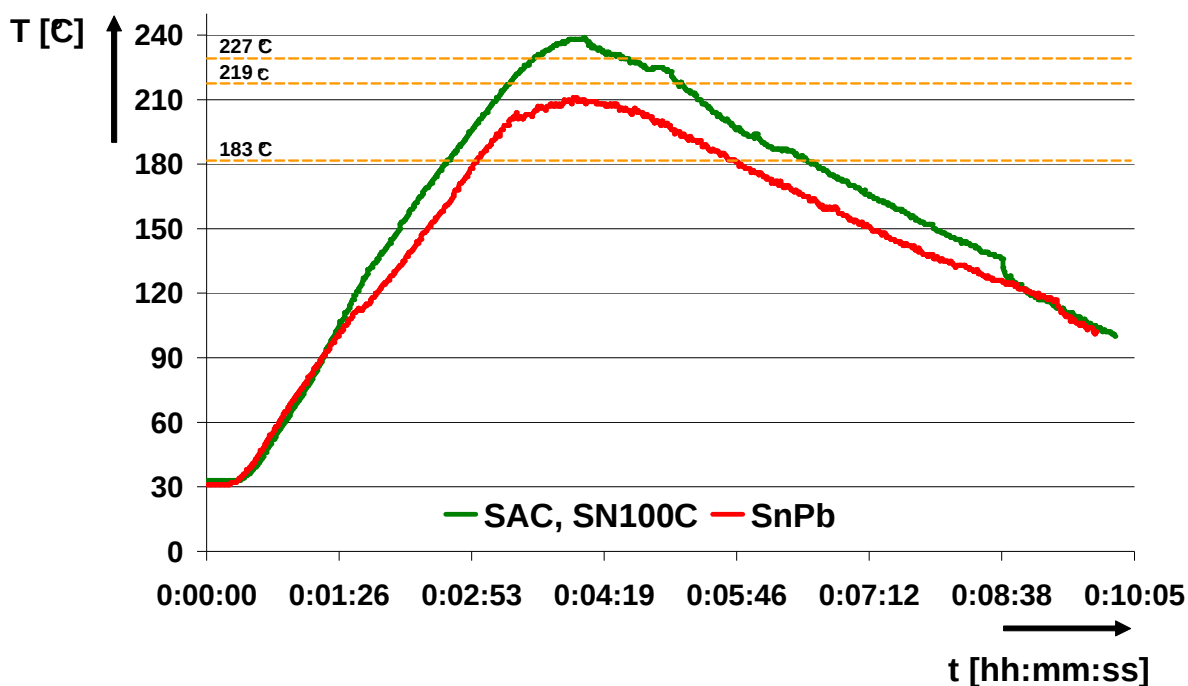
Po přetavení je zapnut větrák, který slouží k ochlazování DPS. Při poklesu teploty na hodnotu 130 °C je možné zastavit přívod dusíku, otevřít víko exsikátoru a nechat desky dále chladnout na vzduchu. Působení dusíku na kvalitu pájeného spoje je v této fázi již zanedbatelné. Pro lepší pochopení je metoda pájení přetavením v exsikátoru s použitím dusíkové atmosféry zobrazena na obr. 23.



Obr. 23: Metoda pájení přetavením v exsikátoru s použitím dusíkové atmosféry

Teplotní profil pájení přetavením je zobrazen na obr. 24, jedná se o profil typu RTS (Ramp To Spike), je charakterizován lineárním nárůstem teploty do vrcholové teploty. Na rozdíl od klasického sedlového teplotního profilu RSS (Ramp Soak Spike), který je charakterizován dvojitým nárůstem teplot (v oblasti předehřevu a v oblasti přetavení), poskytuje lineární teplotní profil několik výhod [20]:

- nosič tavidla vydrží déle v předehřívacím cyklu,
- minimalizuje se teplotní šok,
- vyskytuje se méně problémů s pájitelností,
- zlepšuje se smáčivost,
- redukuje se míra defektů,
- snižují se energetické náklady a zvyšuje účinnost.



Obr. 24: Teplotní profil

8 HODNOCENÍ SPOLEHLIVOSTI PÁJENÉHO SPOJE

Vzhledem k tomu, že bezolovnaté pájení dosud nesplňuje takovou úroveň spolehlivosti a jakosti pájeného spoje, jako pájení olovnatými slitinami, je potřeba stále vyvíjet aktivity zaměřené na zvyšování spolehlivosti bezolovnatého pájení.

Cílem prováděných experimentů je nalézt takovou kombinaci vstupních faktorů, jejichž působení by bylo srovnatelné, nebo aby se alespoň přiblížilo jakosti a spolehlivosti klasického olovnatého pájeného spoje. Na hodnocení spolehlivosti pájeného spoje je aplikována technika DOE. Sledováním několika výstupních proměnných a jejich reakcí na vybrané vstupní faktory lze vysledovat takový souhrn faktorů, které budou mít na výslednou spolehlivost pájeného spoje největší vliv. Mezi vybrané faktory patří:

- typ vybrané pájecí pasty,
- typ povrchové úpravy,
- použitá atmosféra v procesu pájení a její koncentrace.

V případě hodnocení tombstone efektů, kdy je prokázáno zvýšené množství poruch u malých součástek vlivem dusíkové atmosféry [14], lze za kritický faktor považovat i velikost součástky. Přehled vstupních faktorů a jejich úrovní je uveden v tab. 10.

Tab. 10: Faktory a jejich úrovně

Faktor	Úroveň				
	100 ppm	300 ppm	500 ppm	1000 ppm	vzduch
Koncentrace O ₂	100 ppm	300 ppm	500 ppm	1000 ppm	vzduch
Velikost součástek	0201	0402	0603	2512	-
Typ pájecí pasty	SAC	SN100C	SnPb	-	-
Povrchová úprava	Imersní Sn	ENIG	-	-	-

Výstupními proměnnými je vždy sledována nějaká vlastnost pájeného spoje nebo procesu, která se mění v závislosti na velikosti jednotlivých vstupních faktorů i v závislosti na interakci jednotlivých faktorů mezi sebou. Mezi sledované výstupní veličiny patří:

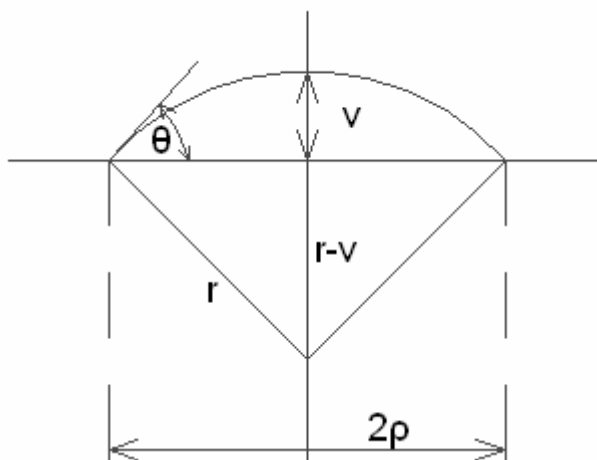
- velikost smáčecího úhlu,
- pevnost pájeného spoje,
- počet tombstone defektů,
- optické hodnocení.

8.1 Hodnocení smáčecího úhlu

Čím je smáčecí úhel menší, tím lépe pájka smáčí povrch pájecích plošek a vývody součástek. Lze tedy konstatovat, že spolehlivost pájeného spoje z hlediska smáčení roste se zmenšujícím se úhlem smáčení.

8.1.1 Měření smáčecího úhlu

Pájecí pasta byla natištěna přes šablonu na testovací plošky. Je-li určitý objem pájky nanesen na smáčitelný materiál, přetaví se do podoby kulového vrchlíku (Obr. 25).



Obr. 25: Kulový vrchlík

Smáčecí úhel lze vypočítat podle vzorce uvedeného v [21]

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{2 \cdot \rho \cdot v}{\rho^2 - v^2}, \quad (7)$$

kde $\operatorname{tg} \theta$ reprezentuje tangentu smáčecího úhlu, ρ představuje poloměr základny kulového vrchlíku [m], a v představuje výšku kulového vrchlíku [m].

Výšku kulového vrchlíku lze odvodit ze vzorce pro jeho objem

$$V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot v \cdot (3 \cdot \rho^2 + v^2) \quad (8)$$

Po matematických úpravách lze tedy psát

$$v = \left(\frac{3 \cdot V}{\pi} + \sqrt{\left(\frac{3 \cdot V}{\pi} \right)^2 + \rho^6} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(\frac{3 \cdot V}{\pi} - \sqrt{\left(\frac{3 \cdot V}{\pi} \right)^2 + \rho^6} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (9)$$

kde V reprezentuje objem kulového vrchlíku [m^3] a ρ představuje poloměr kulového vrchlíku.

Pro výpočet objemu kulového vrchlíku lze vycházet z předpokladu, že objem natisknuté a přetavené pájky se nemění. Objem natisknuté pájecí pasty lze vypočítat z velikosti otvorů v šabloně a její tloušťky. Otvory jsou kruhového tvaru o průměru 1mm a tloušťka šablony 150 μm . Objem natisknuté pájecí pasty lze tedy určit podle vzorce

$$V_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h, \quad (10)$$

kde V_p představuje objem natisknuté pájecí pasty [m^3], d reprezentuje průměr otvorů v šabloně [m] a h výšku šablony [m].

Je nutné si uvědomit, že objem natisknuté pasty se skládá z objemu pájky a objemu tavidla. Je tedy potřeba celkový objem natisknuté pasty V_p vynásobit objemovými procenty pájky. Lze tedy napsat

$$V_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \cdot V_{\text{Sobj}}, \quad (11)$$

kde V_p představuje objem natisknuté pájecí pasty [m^3] a V_{Sobj} představuje objemová procenta pájky v pájecí pastě [%].

Objemová procenta pájky v pájecí pastě lze spočítat jako podíl objemu pájky a celkového objemu pájecí pasty a vynásobit stem. Objem pájky je možné spočítat ze známého vztahu

$$V_s = \frac{m}{\rho_s}, \quad (12)$$

kde V_s představuje objem pájky v pájecí pastě [m^3], m představuje hmotnost pájky [kg] a ρ_s představuje hustotu pájky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]. Ekvivalentně lze napsat vztah i pro objemové množství tavidla. Pokud jsou známy hmotnostní procenta pájky a tavidla v pájecí pastě a jejich hustoty není potřeba znát ani hmotnost. Do vztahu (12) se dosadí hmotnostní procenta pájky respektive tavidla, vypočte se velikost objemů jednotlivých složek pájecí pasty a

stanoví se objemová procenta pájky. Hmotnostní procenta a hustota bývá udávána výrobcem v katalogovém listu produktu, viz. tab. 9.

Průměr zapájených oblastí (obr. 26) byl změřen pomocí mikroskopu Olympus SZ61 s dvacetinásobným zvětšením a software Olympus industriál v. 2.2. Vzorky obsahují deset testovacích plošek s přetavenou pájkou, z nichž bylo vybráno šest pro měření průměru. U každého vzorku byla pomocí Microsoft Excel vypočtena průměrná hodnota úhlu smáčení a jeho směrodatná odchylka. Změřené hodnoty, vypočtena průměrná hodnota a směrodatná odchylka jsou uvedeny v příloze A.



Obr. 26: Měření průměru kulového vrchlíku přetavené pájky

8.1.2 Faktorový plán pro měření smáčecího úhlu

Prováděný experiment má tři vstupní faktory. První faktor má pět úrovní, druhý faktor tři úrovně a třetí faktor dvě úrovně. Byl zvolen úplný faktorový experiment. Je tedy potřeba provést třicet běhů. V tab. 11 je zobrazen přehled faktorů a jejich úrovní.

Tab. 11: Faktory a úrovně pro testování smáčecího úhlu

Faktor	Úroveň				
Koncentrace O ₂	100 ppm	300 ppm	500 ppm	1000 ppm	20 %
Pájecí slitina	SAC	Sn100C	SnPb	-	-
Povrchová úprava	Imersní Sn	ENIG	-	-	-

Z předchozí tabulky je sestaven faktorový plán (tab. 12), který postihuje všechny možné kombinace. Pro přehlednost bude raději zachován stávající popis faktorů i jejich úrovní. Při následném vyhodnocování a tvorbě grafů je poté přímo vidět, o který faktor se jedná.

Tab. 12: Faktorový plán pro testování smáčecího úhlu

Pořadí	VSTUPNÍ PROMĚNNÉ			VÝSTUPNÍ PROMĚNNÉ		
	Pájka	Koncentrace O ₂	Povrchová úprava	Průměrná hodnota 2p [mm]	Směrodatná odchylka [mm]	Smáčecí Úhel [°]
1	SAC	100 ppm	Imersní Sn	1,760	0,039	8,177
2	SAC	100 ppm	ENIG	1,367	0,029	17,237
3	SAC	300 ppm	Imersní Sn	1,770	0,049	8,037
4	SAC	300 ppm	ENIG	1,414	0,168	15,612
5	SAC	500 ppm	Imersní Sn	1,367	0,071	8,069
6	SAC	500 ppm	ENIG	1,354	0,062	17,717
7	SAC	1000 ppm	Imersní Sn	1,786	0,032	7,816
8	SAC	1000 ppm	ENIG	1,381	0,075	16,745
9	SAC	20 %	Imersní Sn	1,603	0,128	10,792
10	SAC	20 %	ENIG	1,302	0,064	19,865
11	SN100C	100 ppm	Imersní Sn	1,099	0,018	31,896
12	SN100C	100 ppm	ENIG	1,596	0,058	10,926
13	SN100C	300 ppm	Imersní Sn	1,101	0,026	31,779
14	SN100C	300 ppm	ENIG	1,713	0,069	8,861
15	SN100C	500 ppm	Imersní Sn	1,150	0,024	28,231
16	SN100C	500 ppm	ENIG	1,675	0,089	9,464
17	SN100C	1000 ppm	Imersní Sn	1,127	0,028	29,797
18	SN100C	1000 ppm	ENIG	1,455	0,104	14,357
19	SN100C	20 %	Imersní Sn	1,137	0,032	29,072
20	SN100C	20 %	ENIG	1,289	0,103	20,425
21	SnPb	100 ppm	Imersní Sn	2,103	0,066	4,798
22	SnPb	100 ppm	ENIG	2,443	0,206	3,064
23	SnPb	300 ppm	Imersní Sn	2,527	0,207	2,768
24	SnPb	300 ppm	ENIG	2,733	0,105	2,188
25	SnPb	500 ppm	Imersní Sn	2,377	0,125	3,325
26	SnPb	500 ppm	ENIG	3,174	0,233	1,398
27	SnPb	1000 ppm	Imersní Sn	2,833	0,070	1,965
28	SnPb	1000 ppm	ENIG	3,135	0,042	1,450
29	SnPb	20 %	Imersní Sn	2,239	0,063	3,981
30	SnPb	20 %	ENIG	2,087	0,103	4,914

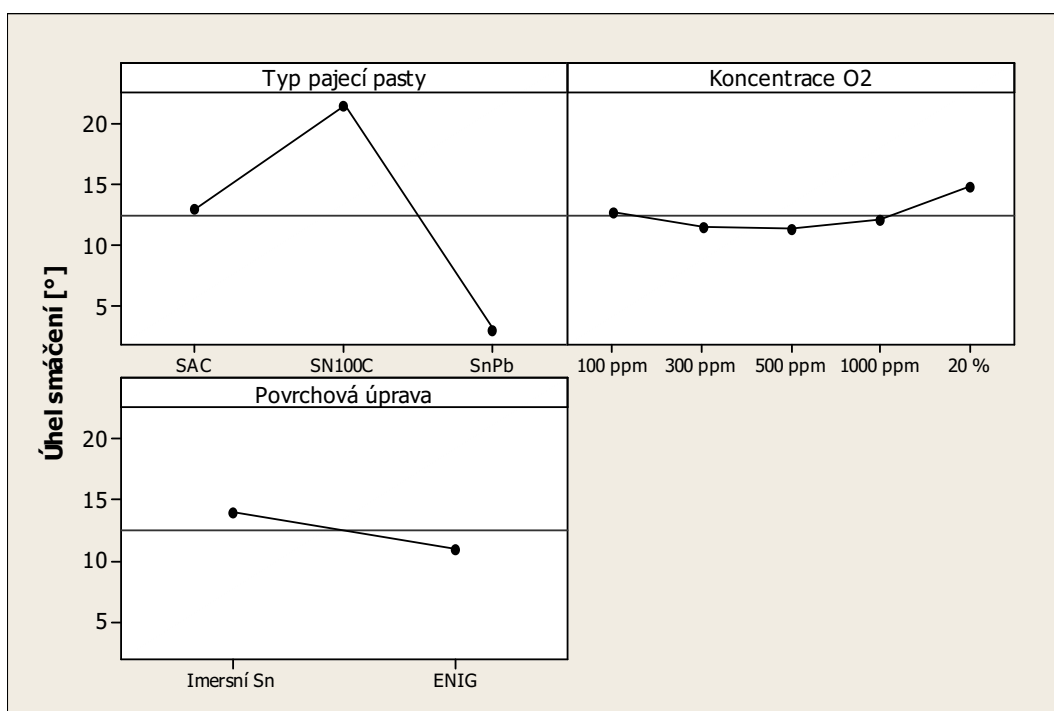
8.1.3 Vyhodnocení

Z tab. 12 jsou pomocí software Minitab vypočteny hodnoty efektů pro všechny tři faktory a vyneseny do grafu (Obr. 27). Významnost jednotlivých faktorů je dána sklonem křivky. Na svislé ose jsou znázorněny průměry hodnot efektů faktorů, v tomto případě průměrný smáčecí úhel pro každý vzorek. Na vodorovné ose jsou znázorněny úrovně faktorů.

Z grafu na obr. 27 je patrné, že největší vliv na velikost smáčecího úhlu má volba pájecí slitiny. V závislosti na smáčecím úhlu nejhůře dopadla bezolovnatá pájecí pasta SN100C. Naopak olovnatá pájecí pasta vykazuje velmi dobré výsledky týkající se úhlu smáčení. Bezolovnatá pájecí pasta SAC se z hlediska smáčivosti nachází někde uprostřed mezi olovnatou pastou a pastou SN100C.

Z grafu na obr. 27 lze ještě vyčíst, že velký vliv na smáčecí úhel má typ použité atmosféry. Klasická vzduchová atmosféra relativně hodně zhoršuje smáčení oproti dusíkové atmosféře. Vliv jednotlivých koncentrací na smáčecí úhle se nijak výrazně neprojevil.

Z hlediska povrchových uprav se jako lepší projevila povrchová úprava nanášení zlata přes vrstvu niklu.

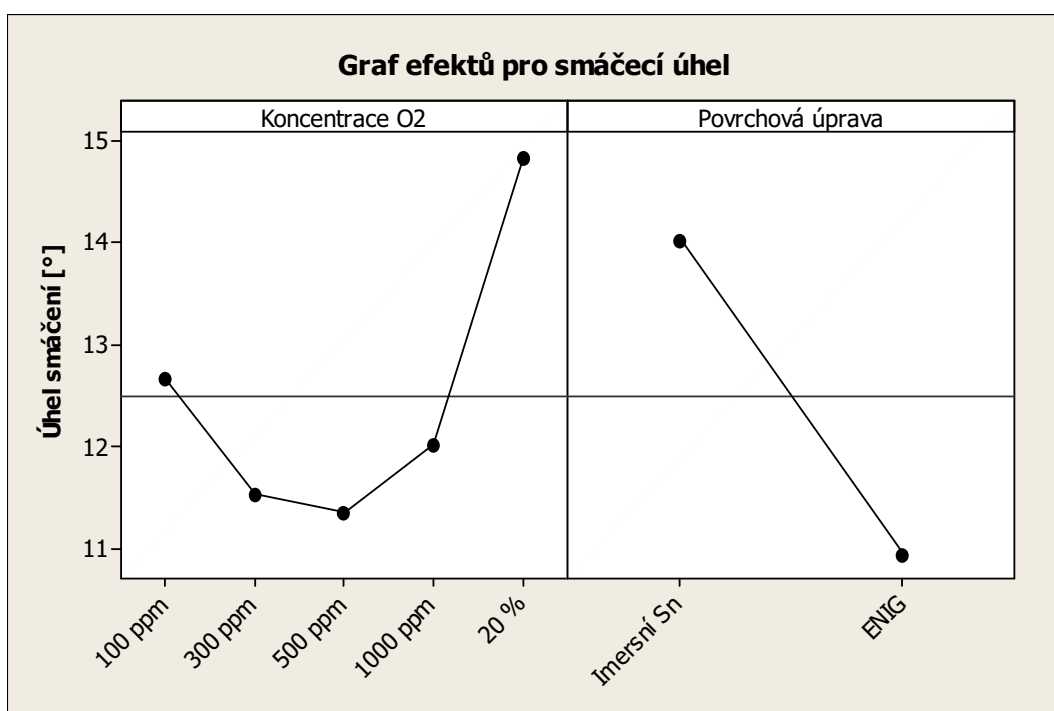


Obr. 27: Graf hlavních efektů pro úhel smáčení

V grafu na obr. 28 není uvažován vliv výběru pájecí pasty. Efekty, které negativně ovlivňují smáčení jsou tak ještě lépe viditelné.

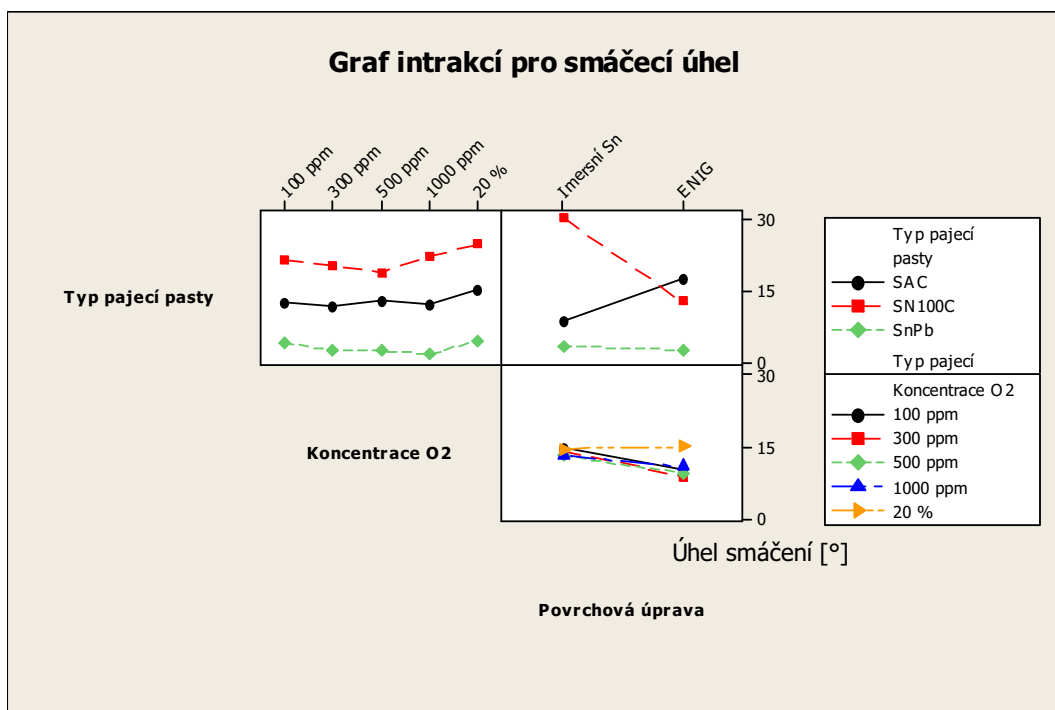
Z hlediska vlivu smáčení na kvalitu a spolehlivost pájeného spoje se jako nejlepší kombinace faktorů jeví použití bezolovnaté pájecí pasty SAC s dusíkovou atmosférou se zbytkovou hladinou kyslíku < 1000 ppm s povrchovou úpravou chemického nanášení zlata přes vrstvu niklu na DPS.

Nebude-li brán v úvahu výběr pájecí pasty, pak z grafu na obr. 28 je patrné, že největší vliv na smáčecí úhel má volba atmosféry, použité v procesu pájení.



Obr. 28: Graf hlavních efektů pro smáčecí úhel, nezohledněn vliv pájecích past

Na obr. 29 je zobrazen graf interakcí, který dokáže zobrazovat vzájemné vazby mezi faktory. Jsou-li úsečky rovnoběžné, interakce neexistuje nebo je velmi slabá. Čím větší úhly úsečky svírají, tím větší je interakce mezi nimi. Pokud se úsečky kříží, je to známkou velmi silné interakce mezi faktory. Interakce existuje, pokud změna jednoho faktoru vyvolá výraznou změnu faktoru jiného [19].



Obr. 29: Graf interakcí z hlediska smáčení

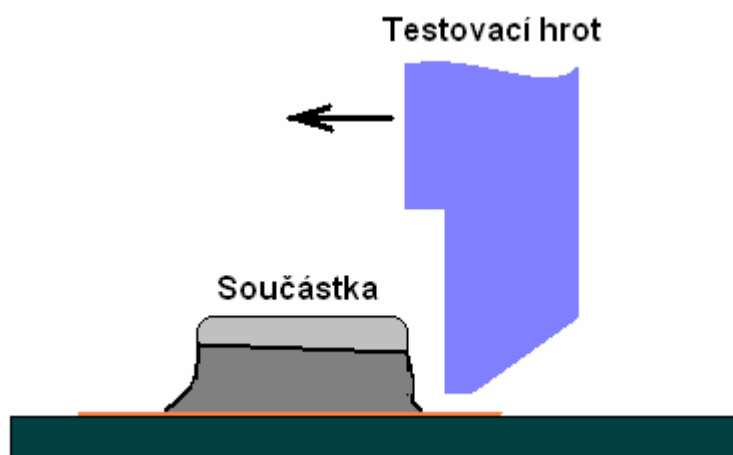
Z grafu interakcí je možné vypořizovat silnou interakci mezi bezolovnatými pájkami a typem povrchové úpravy. Je zřejmé, že pájecí pasta SAC se lépe smáčela na imersním cínu, zatím co pájecí pasta SN100C vykazovala lepší smáčecí charakteristiky na pájecích ploškách s povrchovou úpravou ENIG.

8.2 Hodnocení pevnosti pájeného spoje

Lze říci, že s rostoucí pevností pájeného spoje v závislosti na vstupních proměnných roste i jeho kvalita a spolehlivost.

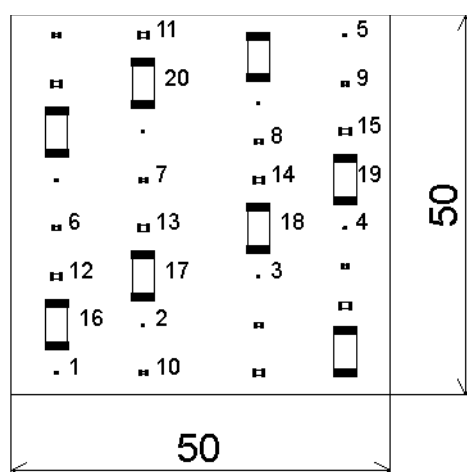
8.2.1 Měření pevnosti pájeného spoje

Pevnost pájených spojů je testovaná zkouškou stříhem na testovacím zařízení DAGE PC2400. Zařízení je schopno provést zkoušky stříhem se zatížením až do hodnoty 100 kg s přesností $\pm 0,5 \%$. Testová hlava zařízení tlačí do součástky, dokud se neutrhne. V okamžiku odtržení je výsledné zatížení zaznamenáno v přepočtených jednotkách hmotnosti. Princip metody je zobrazen na obr. 30.



Obr. 30: Princip metody stříhu na zařízení DAGE

Na testovacích DPS je rovnoměrně rozmístěno 32 součástek čtyř různých velikostí (0201, 0402, 0603, 2512), při testování mechanické pevnosti pájeného spoje bylo z každého vzorku odtrženo 20 součástek (5 součástek od každé velikosti pouzdra). Pro větší objektivitu měření byly součástky z každého vzorku trhány vždy ze stejné pozice. Jednotlivé pozice trhaných součástek jsou zobrazeny na obr. 31. Naměřené hodnoty, vypočtená průměrná hodnota a směrodatná odchylka jsou uvedeny v příloze B.



Obr. 31: Pozice trhaných součástek na testovacích DPS

8.2.2 Faktorový plán pro měření pevnosti pájených spojů

Prováděný experiment má čtyři vstupní faktory. Jedná se o velikost součástek, typ pájecí pasty, zbytkovou hladinu kyslíku a povrchovou úpravu pájecích plošek testované struktury. Vstupní faktory a jejich úrovně jsou zobrazeny v tab. 13.

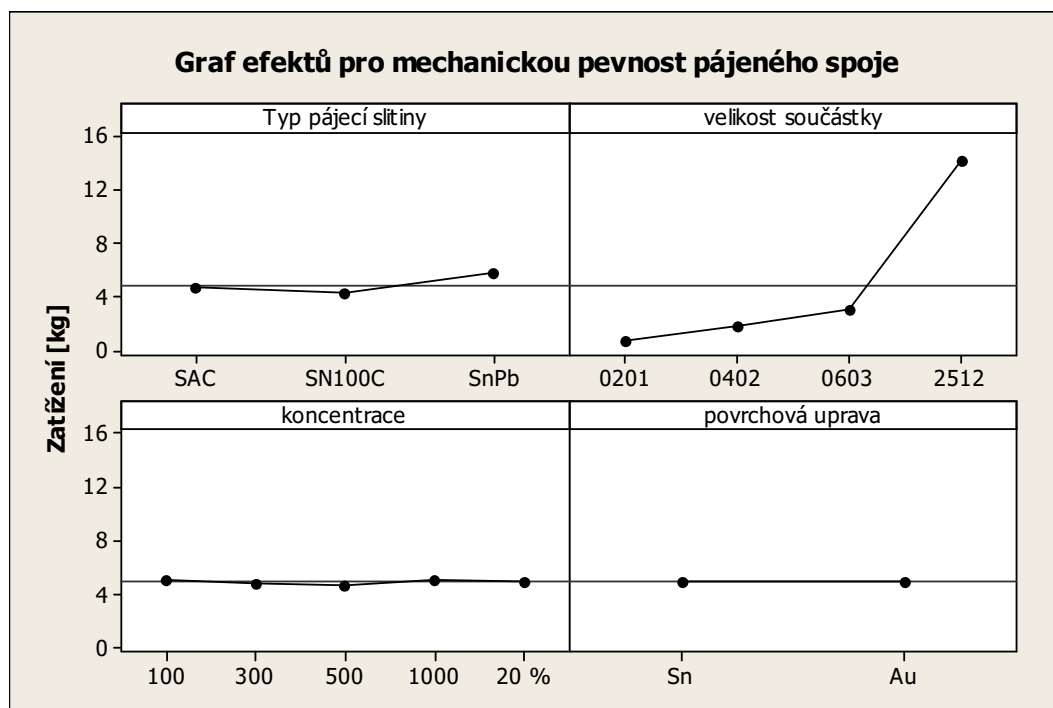
Faktor	Úroveň				
Velikost součástky	0201	0402	0603	2512	-
Koncentrace O ₂	100 ppm	300 ppm	500 ppm	1000 ppm	20 %
Typ pájecí slitiny	SAC	SN100C	SnPb	-	-
Typ povrchové úpravy	Imersní Sn	ENIG	-	-	-

Tab. 13: Tabulka faktorů a úrovní pro měření pevnosti pájeného spoje

Z předchozí tab. 13 je sestaven faktorový plán, který uveden v příloze B, postihuje všechny možné kombinace úrovní. Pro přehlednost bude raději zachován stávající popis faktorů i jejich úrovní. Při následném vyhodnocování a tvorbě grafů je poté přímo vidět, o který faktor se jedná. Opět byl použit úplný faktorový experiment, nyní je potřeba pro otestování všech kombinací 120 běhů.

8.2.3 Vyhodnocení mechanické pevnosti pájeného spoje

Na obr. 32 je zobrazen graf efektů pro mechanickou pevnost pájených spojů. Významnost jednotlivých faktorů je dána sklonem křivky. Na svislé ose jsou znázorněny průměry hodnot efektů faktorů, v tomto případě mechanická pevnost pájených spojů. Na vodorovné ose jsou znázorněny úrovně faktorů.



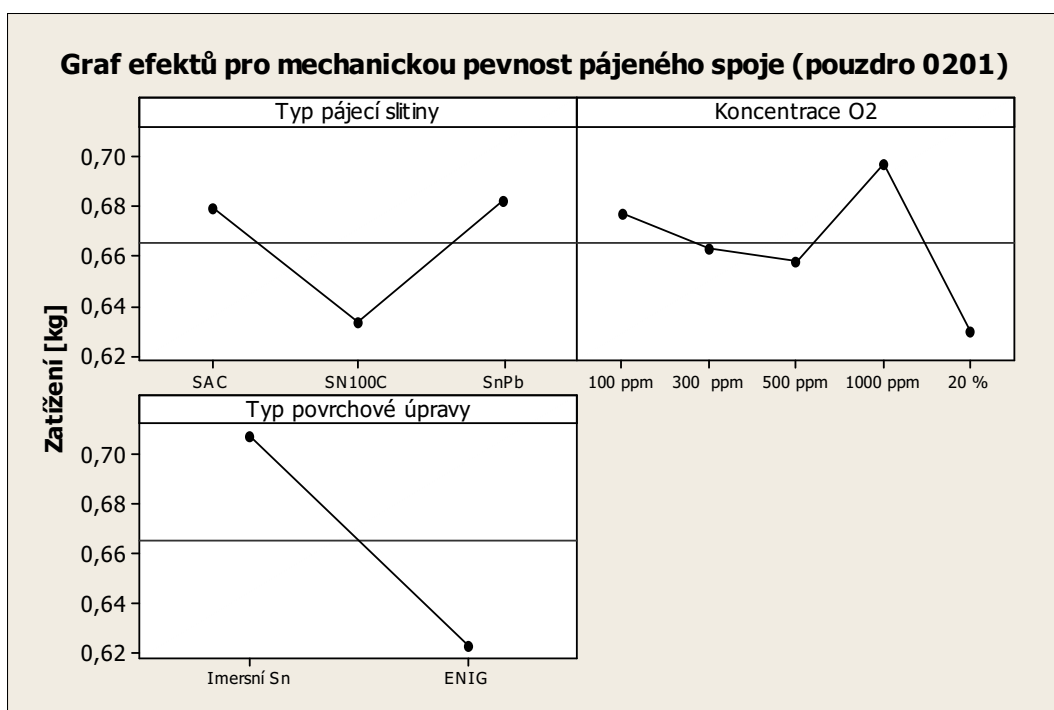
Obr. 32: Graf efektů pro mechanickou pevnost pájených spojů

Největší vliv na mechanickou pevnost pájeného spoje má velikost součástky a tudíž i množství pájky potřebné k zapájení, což není žádným velkým překvapením. Proto v dalším vyhodnocení bude vliv tří zbývajících faktorů na mechanickou pevnost pájeného spoje zkoumán pro každý typ pouzdra zvlášť.

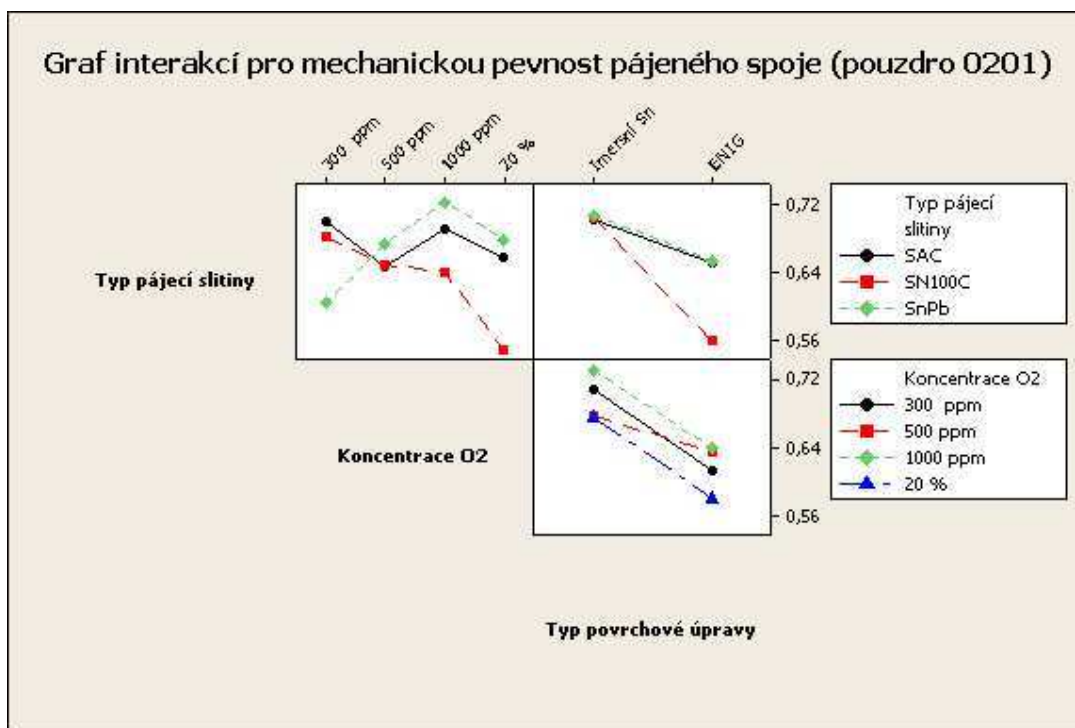
Z grafů na Obr. 33, 34 a v příloze C lze vyvodit závěr, že největší vliv na mechanickou pevnost pájených spojů má výběr pájecí pasty. Největší mechanickou pevnost vykazovaly spoje zapájené olovnatou pájkou. U bezolovnatých pájecích past vykazovala lepší výsledky pájka SAC.

Z hlediska vlivu povrchových úprav na mechanickou pevnost pájeného spoje lze tvrdit, že mírně lepší výsledky prokazuje povrchová úprava imersním Sn. Dalo by se však konstatovat, že vliv povrchových úprav na mechanickou pevnost pájeného spoje je zanedbatelný.

Vliv dusíkové atmosféry na mechanickou pevnost nelze z dosažených výsledku jednoznačně hodnotit. Její účinky by se pravděpodobně projeví až během doby života pájeného spoje. Jednou z možných příčin, proč nelze objektivně hodnotit vliv dusíkové atmosféry na mechanickou pevnost pájeného spoje, je i malý počet testovacích vzorků.



Obr. 33: Graf efektů pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 0201)



Obr. 34: Graf interakcí pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 0201)

8.3 Hodnocení vzniku tombstone defektů

V souvislosti s pájením v dusíkové atmosféře je v literatuře [14] často diskutována zvýšená pravděpodobnost tvorby tzv. tombstone defektů u malých dvoupólových součástek při nízkých koncentracích zbytkové hladiny kyslíku (100 ppm a menší).

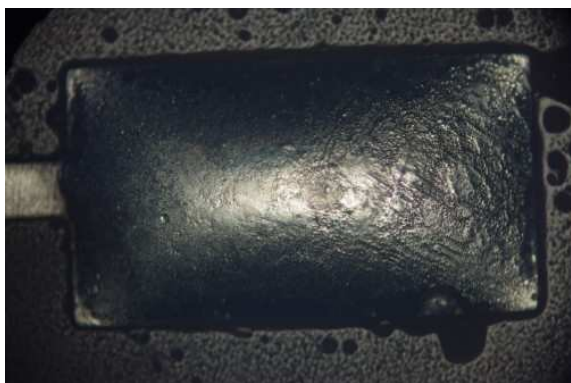
Pro ověření tohoto tvrzení byly na testovací struktuře zvoleny SMD součástky o velikosti 0201, 0402, 0603 a jako referenční součástka byla zvolena SMD 2512.

Po provedení všech experimentů, zobrazených v tab. 12, se nevyskytl žádný tombstone defekt a všechny součástky byly správně zapájeny. Tento stav byl pravděpodobně způsoben snahou o rovnoměrné zahřívání DPS v průběhu pájení. Určitý podíl lze přisoudit i návrhu a rozložení součástek na DPS. Lze tedy konstatovat, že větší vliv na tvorbu tombstone defektů má nerovnoměrné teplotní pole v okolí pájené dvoupólové součástky a částečně také návrh pájecích plošek na nosném substrátu.

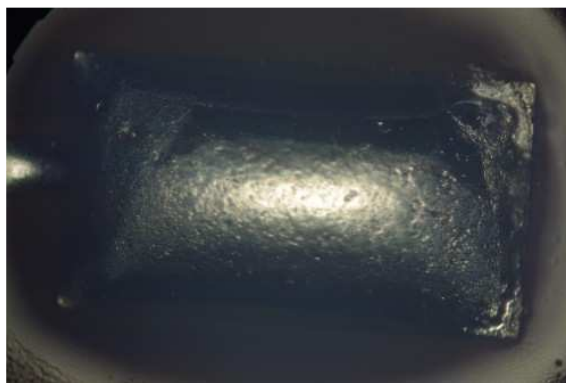
8.4 Optické hodnocení

Z optického hlediska byla hodnocena především barva a lesk povrchu přetavené pájky. Dále integrita povrchu, výskyt nerovností, důlků a hrbolků v pájce, především v závislosti na typu použité atmosféry v procesu přetavení.

Na obr. 35 je zobrazená bezolovnatá pájecí pasta SAC po přetavení v dusíkové atmosféře se zbytkovou hladinou kyslíku 300 ppm. Pro srovnání na obr. 36 je zobrazena olovnatá pájecí pasta SnPb, taktéž přetavena v dusíkové atmosféře, se zbytkovou koncentrací kyslíku 300 ppm a na obr. 37 je zobrazena bezolovnatá pájecí pasta SN100C, přetavená se stejnými parametry jako obě předchozí.



Obr. 35: SAC pájka, dusíková atmosféra,
300 ppm O₂



Obr. 36: SnPb pájka, dusíková atmosféra,
300 ppm O₂

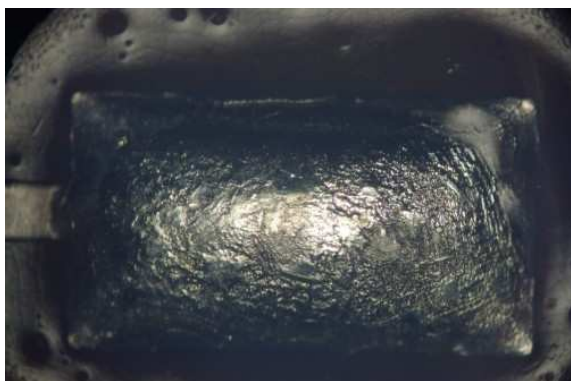


Obr. 37: SN100C pájka, dusíková atmosféra, 300 ppm O₂

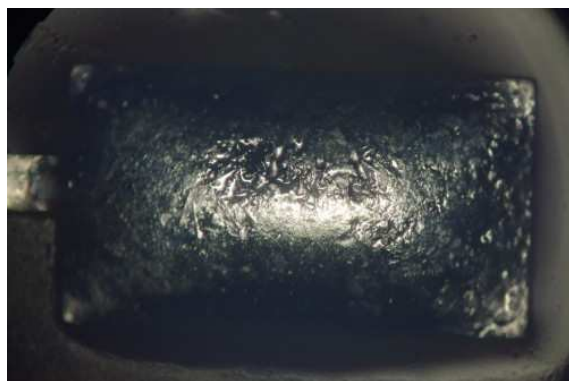
Povrch SAC a SnPb pájky, přetavených v dusíkové atmosféře, je celistvý, bez výrazných důlků a hrbolků v pájce. U bezolovnaté pájky SAC lze pozorovat mírné zvrásnění v pravé části. Dá se však konstatovat, že bezolovnatá pájka SAC se podobou velmi blíží pájce olovnaté, pravděpodobně by se dalo říct, že obě pájky jsou si z optického hlediska ekvivalentní.

Pájka SN100C vykazuje na svém povrchu jisté rýhování a vrásnění, také lze pozorovat nejednotnou barvu povrchu, která je pravděpodobně způsobená složením pájecí pasty.

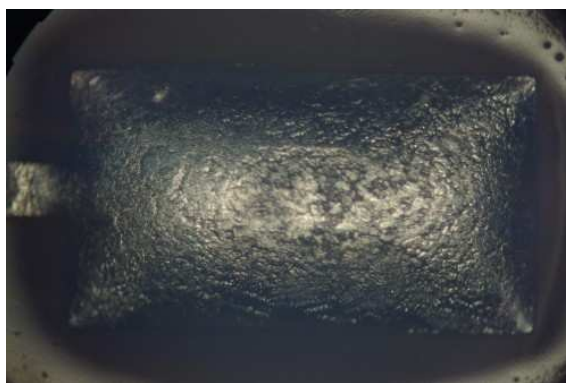
Na obr. 38, 39 a 40 jsou všechny tři typy použitých pájecích past, přetavených v klasické vzduchové atmosféře.



Obr. 38: SAC pájka, vzduchová atmosféra



Obr. 39: SnPb pájka, vzduchová atmosféra



Obr. 40: SN100C pájka, vzduchová atmosféra

Na povrchu všech třech typů pájek lze pozorovat hrubší strukturu povrchu s výskytem rýh, důlků a hrbolů. Nejlépe vypadá povrch olovnaté pájky, u níž lze konstatovat, že obsahuje nejméně povrchových nerovností a také se jeví jako nejlesklejší. Povrch SN100C pájky je pokryt spoustou hrbolů a prohlubní, vzdáleně připomíná pomerančovou kůru a také se jeví jako nejvíce matný.

Pájka SAC se mírou nerovností nachází někde mezi pájkou olovnatou a pájkou SN100C. Je o něco méně lesklejší než SnPb pájka. Lze učinit poznatek, že bezolovnatá pájka SAC, pájená v dusíkové atmosféře se z optického hlediska bez problému vyrovná pájce SnPb, pájené na vzduchu, dokonce lze konstatovat, že povrchová struktura SAC pájky se jeví jako jemnější a s větší integritou. Bezolovnatá pájka SN100C, pájená v dusíkové atmosféře vykazuje méně povrchových nerovností než pájka olovnatá, pájena na vzduchu.

8.5 Zhodnocení výsledků a doporučení

V prováděných experimentech bylo sledováno několik výstupních proměnných v závislosti na vybraných vstupních faktorech. Výčet vstupních i výstupních faktorů je popsán na začátku této kapitoly. Nyní bude uvedeno krátké shrnutí výsledků.

Z hlediska smáčení lze vyhodnotit jako lepší bezolovnatou pájku SAC (průměrný smáčecí úhel 13,9°) oproti pájce SN100C (průměrný smáčecí úhel 21,5 °), pro doplnění průměrný úhel smáčení SnPb pájky je 3°. Povrchová úprava imersní Sn vykazovala průměrný smáčecí úhel 14,6°, což je mírně horší výsledek oproti povrchové úpravě ENIG, která vykazovala průměrný smáčecí úhel 10,9°. Dusíková atmosféra pozitivně ovlivňovala smáčení, vliv jednotlivých koncentrací zbytkového kyslíku se však neprojevil.

Vliv pájek na mechanickou pevnost pájeného spoje lze demonstrovat na průměrném zatížení např. u pouzdra typu 2512. Průměrné zatížení u olovnaté pájky vyšlo 16,69 kg, u SAC pájky 13,67 kg a u pájky SN100C 12,18 kg. Lze tedy konstatovat, že SAC pájka dosáhne 81,9 % mechanické pevnosti pájeného spoje oproti SnPb pájce. Pájecí slitina SN100C potom dosáhne 72,9 % mechanické pevnosti olovnaté pájky SnPb. Vliv povrché úpravy je v tomto případě zanedbatelný a vliv dusíkové atmosféry je ze současných výsledků také neprokazatelný.

Po uskutečnění všech experimentů, je tedy možné říci, že optimální kombinace faktorů pro pájení přetavení je:

- pájecí pasta SAC,
- povrchová úprava imersní Sn
- přítomnost dusíkové atmosféry v procesu pájení s koncentrací zbytkového kyslíku < 1000 ppm.

8.5.1 Doporučení

Z experimentů vyšlo najevo, že nejvýznamnější faktor ovlivňující spolehlivost a jakost pájeného spoje, je typ pájecí pasty. V návaznosti na předešlé experimenty by bylo zajímavé sledovat vliv několika odlišných SAC pájek (s různými poměry cínu, stříbra a mědi) na mechanickou pevnost pájeného spoje.

Dále by bylo zajímavé pokračovat v pájení přetavením s použitím dusíkové atmosféry a zkoumat vliv zbytkové hladiny kyslíku na defekty, které se běžně vyskytují v procesu pájení přetavením. Vyhodnotit vliv různých koncentrací dusíkové atmosféry na tvorbu samostatných kuliček pájky tzv. beadings a na tvorbu voidu.

9 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo provést analýzu vlivů faktorů působících v procesu pájení přetavením a nalézt optimální kombinaci vybraných parametrů vstupujících do procesu pájení za účelem zvyšování jakosti a spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů. Výběr faktorů byl uskutečněn po nastudování problematiky bezolovnatého pájení s orientací na pozitivní účinky dusíkové atmosféry. Byly zvoleny tři nejvýznamnější faktory, složení pájecí pasty, povrchová úprava pájených ploch a vliv koncentrace atmosféry se zaměřením na zbytkovou hladinu kyslíku.

V první části diplomové práce je proveden rozbor problematiky s cílem zvolit vhodnou metodu pájení a implementovat do ní dusíkovou atmosféru. Postupným vývojem byla navržena a zkonstruována metoda pájení přetavením v exsikátoru. Jedná se o metodu pájení v hermeticky uzavřené nádobě, v níž lze plně využít potenciál dusíkové atmosféry.

V další části diplomové práce byla navržena testovací struktura, na niž byly testovány a ověřovány předpoklady, diskutované v teoretické části práce. Byl sledován vliv vstupních faktorů na velikost smáčecího úhlu, na mechanickou pevnost pájeného spoje a na tvorbu některých poruch, jejichž zvýšený výskyt se předpokládá v souvislosti s použitím bezolovnatých pájecích slitin a dusíkové atmosféry.

Pro určení hlavních faktorů ovlivňujících sledované výstupní charakteristiky byla použita technika DOE. Jedná se o analytickou metodu, která využívá jednoduchých, ale účinných statistických metod k nalezení nejvýznamnějších parametrů a jejich interakcí.

Závěrečná část je věnována provedení všech experimentů s cílem nalezení a stanovení neoptimálnějších faktorů, které ovlivňují a komplexně působí pozitivním účinkem na jakost a spolehlivost výsledného pájeného spoje. Ukázalo se, že za optimální variantu lze považovat kombinaci pájecí pasty SAC za působení dusíkové atmosféry s koncentrací zbytkové hladiny kyslíku 1000 ppm (u nižší koncentrací se neprojevovalo výrazné zlepšení). U povrchové úpravy pájecích plošek je třeba brát zřetel na typ použité slitiny, z hlediska smáčení je výhodnější ENIG a z hlediska mechanické pevnosti imersní cín.

10 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Neznalost direktivy RoHS se nevyplácí* [online]. 2003-2006 [cit. 2009-12-09]. Dostupný z WWW: <<http://www.rohs.cz/>>.
- [2] *Felder* [online]. 2010 [cit. 2010-03-17]. Ni - Ge electronic solders. Dostupné z WWW: <<http://www.felder.de/picture/upload/file/PDF/Produktinformationen/en/NiGe-Electronic%20Solders.pdf>>.
- [3] HAMÁČEK, A., et al. Diagnostika mechanických vlastností pájeného spoje. In *Diagnostika 09*. [s.l.] : [s.n.], 2009. s. 4. Dostupný z WWW: <<http://ketsy.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce1/36.pdf>>.
- [4] STARÝ, Jiří, ŠANDERA, Josef, KAHLE, Petr. *Plošné spoje a povrchová montáž* [online]. Brno : PC DIR-REAL, 1999 [cit. 2009-12-10]. Dostupný z WWW: <<http://147.229.68.79/SMT/eltext/PSPM/4.pdf>>
- [5] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Brno : Vutium, 2006. 379 s. ISBN 80-214-3292-6.
- [6] Pájecí pasty [online]. 2008 , 07. 12. 2008 [cit. 2010-03-09]. Dostupný z WWW: <<http://www.pbt.cz/produkty/spotrebni-materialy/materialy-pro-pajeni/pajeci-pasty>>.
- [7] *Telefon.unas* [online]. 2009 [cit. 2010-04-2]. Rozpustnost kovů. Dostupné z WWW: <<http://telefon.unas.cz/sell/pipojovn.htm>>.
- [8] *SMT centrum* [online]. 2007 [cit. 2010-04-8]. Pájený spoj. Dostupné z WWW: <<http://www.smtcentrum.cz/pruvodce-technologie/smt/pajeny-spoj-pajitelnost/pajeny-spoj.html>>.
- [9] *Leaching.net* [online]. 2007 [cit. 2010-03-5]. Leaching. Dostupné z WWW: <<http://www.leaching.net/>>.
- [10] BELL, Hans, GROSSMANN, Günter. *Reflow Technology, Fundamentals of Reflow Soldering*. [s.l.] : [s.n.], 2009. 78 s.
- [11] Produkt datasheet Pb-free solders [online]. 2005 [cit. 2009-12-12]. Dostupný z WWW: <http://www.indium.com/_dynamo/download.php?docid=130>.
- [12] PELC, M. *Výzkum spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 32 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

- [13] EISO.cz [online]. c2006 [cit. 2010-04-20]. E-ISO slovník. Dostupné z WWW: <<http://www.eiso.cz/informacni-servis/eiso-slovník/>>.
- [14] BELL, Hans, Part 2: Reflow Soldering Methods, 2010, Počet stran 117
- [15] PELC, M. *Vodivé propojení keramiky s FR4 v 3D struktuře*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Kosina.
- [16] PRAGOBOARD [online]. 2006 [cit. 2011-03-07]. VÝROBNÍ A TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI. Dostupné z WWW: <http://www.pragoboard.cz/tech_moznosti.htm>.
- [17] COBAR [online]. 2010 [cit. 2010-03-09]. Product datasheet. Dostupné z WWW: <http://www.cobar.com/flux_products.asp?group=14&id=232>.
- [18] DREISEITLOVÁ, Dagmar . *Dto.cz* [online]. 2003 - 2011 [cit. 2011-04-05]. Jakost pro život. Dostupné z WWW: <http://www.dto.cz/casopis.php?id_article=179>.
- [19] LABAJ R. *Vliv smáčecích charakteristik na spolehlivost pájeného spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [20] ADÁMEK, Martin, VAŠKO, Cyril, NICÁK, Michal. *Moderní technologie elektronických obvodů a systémů* [online]. [s.l.], 8. 3. 2011. 22 s. Skriptum. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Dostupné z WWW: <<https://www.vutbr.cz/elearning/course/view.php?id=98903>>.
- [21] STEJSKAL, Petr. *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

Příloha A: Naměřené hodnoty průměrů přetavené pájky

Tab. A1: Naměřené hodnoty průměrů přetavené pájky

Pořadí	VSTUPNÍ PROMĚNNÉ			Změřené průměry přetavené pájky [mm]						Prům. hodnota 2 σ [mm]	Sm. odchylka [mm]
	Typ pájecí pasty	Koncen. O ₂	Povrch. úprava	1	2	3	4	5	6		
1	SAC	100 ppm	Im. Sn	1,733	1,745	1,806	1,806	1,697	1,770	1,760	0,043
2	SAC	100 ppm	ENIG	1,357	1,406	1,345	1,330	1,357	1,406	1,367	0,026
3	SAC	300 ppm	Im. Sn	1,770	1,685	1,782	1,770	1,854	1,757	1,770	0,054
4	SAC	300 ppm	ENIG	1,309	1,394	1,212	1,757	1,418	1,394	1,414	0,184
5	SAC	500 ppm	Im. Sn	1,698	1,857	1,557	1,745	1,748	1,779	1,731	0,097
6	SAC	500 ppm	ENIG	1,350	1,354	1,378	1,419	1,396	1,227	1,354	0,026
7	SAC	1000 ppm	Im. Sn	1,757	1,794	1,830	1,733	1,798	1,806	1,786	0,034
8	SAC	1000 ppm	ENIG	1,304	1,423	1,410	1,263	1,487	1,396	1,381	0,082
9	SAC	20 %	Im. Sn	1,597	1,460	1,465	1,799	1,739	1,556	1,603	0,139
10	SAC	20 %	ENIG	1,259	1,304	1,364	1,263	1,217	1,402	1,302	0,050
11	SN100C	100 ppm	Im. Sn	1,079	1,115	1,079	1,093	1,103	1,127	1,099	0,014
12	SN100C	100 ppm	ENIG	1,581	1,532	1,516	1,623	1,667	1,657	1,596	0,056
13	SN100C	300 ppm	Im. Sn	1,103	1,103	1,139	1,091	1,054	1,115	1,101	0,027
14	SN100C	300 ppm	ENIG	1,830	1,770	1,660	1,660	1,720	1,636	1,713	0,066
15	SN100C	500 ppm	Im. Sn	1,176	1,164	1,115	1,127	1,139	1,176	1,150	0,023
16	SN100C	500 ppm	ENIG	1,762	1,661	1,821	1,616	1,562	1,629	1,675	0,095
17	SN100C	1000 ppm	Im. Sn	1,139	1,176	1,103	1,115	1,091	1,139	1,127	0,030
18	SN100C	1000 ppm	ENIG	1,291	1,391	1,579	1,492	1,574	1,405	1,455	0,111
19	SN100C	20 %	Im. Sn	1,164	1,115	1,151	1,139	1,079	1,176	1,137	0,030
20	SN100C	20 %	ENIG	1,149	1,318	1,341	1,153	1,350	1,423	1,289	0,091
21	SnPb	100 ppm	Im. Sn	2,109	2,012	2,109	2,206	2,151	2,032	2,103	0,064
22	SnPb	100 ppm	ENIG	2,509	2,824	2,194	2,235	2,448	2,448	2,443	0,226
23	SnPb	300 ppm	Im. Sn	2,509	2,824	2,194	2,739	2,448	2,448	2,527	0,223
24	SnPb	300 ppm	ENIG	2,776	2,751	2,533	2,703	2,885	2,752	2,733	0,115
25	SnPb	500 ppm	Im. Sn	2,251	2,194	2,388	2,557	2,485	2,388	2,377	0,137
26	SnPb	500 ppm	ENIG	3,285	3,115	3,527	3,333	2,873	2,909	3,174	0,220
27	SnPb	1000 ppm	Im. Sn	2,703	2,873	2,921	2,873	2,836	2,792	2,833	0,074
28	SnPb	1000 ppm	ENIG	3,091	3,103	3,212	3,163	3,139	3,103	3,135	0,044
29	SnPb	20 %	Im. Sn	2,291	2,279	2,279	2,133	2,170	2,279	2,239	0,066
30	SnPb	20 %	ENIG	2,121	1,976	1,939	2,073	2,192	2,218	2,087	0,093

Příloha B: Naměřené hodnoty pevnosti pájeného spoje

Tab. B1: Naměřené hodnoty pevnosti pájeného spoje (pájka SAC)

Číslo desky		1	3	5	7	9
Povrchová úprava		Sn	Sn	Sn	Sn	Sn
Koncentrace		100 ppm	300 ppm	500 ppm	1000 ppm	20 %
Pouzdro	Spoj					
0201	1	840,0	886,9	686,9	719,4	640,1
	2	523,0	706,3	277,4	748,4	745,6
	3	961,1	700,0	725,8	761,1	757,5
	4	607,9	696,4	762,7	744,4	794,0
	5	496,8	775,4	638,9	707,9	731,3
	průměr [g]	685,76	753,00	618,34	736,24	733,70
	směr. odch. [g]	183,23	72,97	175,36	19,59	51,21
0402	6	1254,4	2031,7	1917,9	2058,3	1827,0
	7	1752,8	2007,9	1925,4	1814,7	1487,3
	8	1407,9	1983,3	2048,4	1956,7	1730,6
	9	1658,7	2219,4	2335,3	2122,2	1788,5
	10	2380,6	1449,2	432,5	1373,0	2386,5
	průměr [g]	1690,88	1938,30	1731,90	1864,98	1843,98
	směr. odch. [g]	387,60	258,39	667,04	267,03	295,90
0603	11	1729,4	3468,3	2894,4	3711,5	3382,1
	12	2481,3	2903,2	2625,4	3206,0	2645,6
	13	2661,5	2499,6	2890,9	2632,9	2521,4
	14	2594,4	2642,1	0,0	2793,7	2023,4
	15	3038,9	2990,1	3619,0	3019,8	2295,6
	průměr [g]	2501,10	2900,66	3007,43	3072,78	2573,62
	směr. odch. [g]	428,85	334,04	1247,56	374,14	456,42
2512	16	15,89	17,10	14,86	20,36	18,27
	17	19,68	10,65	4,14	16,47	12,13
	18	15,51	10,34	10,03	16,06	12,08
	19	12,87	10,31	11,36	15,33	9,99
	20	19,45	13,97	9,99	17,13	13,12
	průměr [g]	16681,00	12470,60	10074,80	17069,40	13117,00
	směr. odch. [g]	2575,02	2692,06	3457,71	1747,13	2769,35

Tab. B2: Naměřené hodnoty pevnosti pájeného spoje (pájka SAC)

Číslo desky		2	4	6	8	10
Povrchová uprava		Au	Au	Au	Au	Au
Koncentrace		100ppm	300 ppm	500 ppm	1000 ppm	vzduch
Pouzdro	Spoj					
0201	1	573,6	847,2	597,6	711,1	484,1
	2	658,7	557,5	689,7	588,1	356,4
	3	406,4	563,9	602,4	650,4	678,2
	4	981,3	515,9	520,2	658,3	779,0
	5	805,2	767,9	978,6	729,0	632,1
	průměr [g]	685,04	650,48	677,70	667,38	585,96
	směr. odch. [g]	196,45	131,71	159,74	49,73	148,98
0402	6	1698,4	1548,0	1215,1	1745,2	1483,3
	7	1598,0	1085,3	1833,3	1553,2	1704,0
	8	1495,6	1794,8	1857,1	1914,3	1472,6
	9	1879,4	1977,0	2092,9	2163,5	2145,2
	10	1284,5	1327,4	2092,1	1269,4	1368,7
	průměr [g]	1591,18	1546,50	1818,10	1729,12	1634,76
	směr. odch. [g]	198,90	318,65	321,23	305,13	277,62
0603	11	3920,6	3084,5	2982,1	4248,0	2855,6
	12	3329,8	2953,6	3291,3	2360,7	2385,3
	13	2657,5	2718,3	3344,4	2169,0	2284,5
	14	2221,4	2304,0	2817,1	2640,5	2709,9
	15	2680,2	2683,3	2724,2	3145,2	2534,9
	průměr [g]	2961,90	2748,74	3031,82	2912,68	2554,04
	směr. odch. [g]	595,79	267,47	248,29	744,17	208,19
2512	16	18,96	15,29	14,07	14,54	16,85
	17	12,88	11,61	13,32	15,52	19,16
	18	11,00	15,55	13,05	10,04	10,90
	19	15,03	7,13	9,01	8,48	11,79
	20	18,59	12,86	9,41	15,01	16,32
	průměr [g]	15292,60	12488,20	11771,20	12718,00	15003,40
	směr. odch. [g]	3118,00	3060,07	2121,43	2883,16	3149,14

Tab. B3: Naměřené hodnoty pevnosti pájeného spoje (pájka SN100C)

Číslo desky			11	13	15	17	19
Povrchová uprava			Sn	Sn	Sn	Sn	Sn
Koncentrace			100 ppm	300 ppm	500 ppm	1000 ppm	20 %
Součástka		Spoj					
0201		1	606,00	666,30	534,10	527,40	715,50
		2	659,50	711,10	648,80	644,40	477,00
		3	596,40	620,20	783,30	726,20	718,70
		4	700,40	631,80	709,90	815,10	524,60
		5	865,10	1125,40	918,30	954,40	796,00
	průměr [g]		685,48	750,96	718,88	733,50	646,36
	sm. odch. [g]		97,38	189,87	128,88	145,55	123,22
0402		6	1412,30	1712,30	1607,10	1638,50	1825,00
		7	1655,60	1660,70	1616,30	1482,90	1642,10
		8	1614,30	1827,40	1987,30	1612,30	1640,10
		9	1849,60	1583,30	2480,60	1818,70	2038,10
		10	1826,60	1292,50	1526,20	1140,90	1294,40
	průměr [g]		1671,68	1615,24	1843,50	1538,66	1687,94
	sm. odch. [g]		159,05	179,82	356,30	225,89	245,22
0603		11	2472,50	1013,50	1407,50	3785,30	2971,00
		12	3312,70	2492,50	3324,60	2571,00	2507,10
		13	1952,40	2313,90	2365,50	2086,90	2216,30
		14	2513,50	2228,20	2472,20	2191,30	2831,70
		15	2673,00	2813,50	3133,70	2600,00	3010,70
	průměr [g]		2584,82	2172,32	2540,70	2646,90	2707,36
	sm. odch. [g]		437,09	613,13	676,12	604,17	302,73
2512		16	15,30	14,40	14,64	17,42	12,66
		17	12,35	9,90	14,99	14,91	12,95
		18	12,26	9,34	10,15	10,46	11,36
		19	9,16	9,90	6,94	10,38	7,49
		20	7,59	15,77	14,53	14,64	13,64
	průměr [g]		11332,60	11860,20	12246,80	13561,20	11619,80
	sm. odch. [g]		2695,00	2674,14	3193,67	2743,41	2192,10

Tab. B4: Naměřené hodnoty pevnosti pájeného spoje (pájka SN100C)

Číslo desky			12	14	16	18	20
Povrchová uprava			Au	Au	Au	Au	Au
Koncentrace			100 ppm	300 ppm	500 ppm	1000 ppm	20 %
Součástka	Spoj						
0201		1	535,70	368,60	556,30	510,30	188,50
		2	535,70	656,30	589,70	547,20	302,80
		3	653,20	641,70	608,70	590,10	544,40
		4	463,90	556,30	496,00	434,10	490,10
		5	764,30	858,30	663,10	721,40	740,10
	průměr [g]		590,56	616,24	582,76	560,62	453,18
	sm. odch. [g]		105,99	158,60	55,50	95,33	192,19
0402		6	1137,30	1679,40	1698,40	1866,30	1716,70
		7	1848,40	1246,80	1698,40	1586,10	1666,70
		8	2286,90	1585,30	2007,50	2106,00	1799,20
		9	2047,20	1989,70	2017,90	1886,90	1437,70
		10	1962,70	1528,20	1596,00	1268,70	1521,80
	průměr [g]		1856,50	1605,88	1803,64	1742,80	1628,42
	sm. odch. [g]		387,35	240,05	174,78	288,88	131,28
0603		11	3519,40	3123,40	4073,00	3327,00	4068,60
		12	2354,40	2078,60	2452,40	2390,50	3067,10
		13	2280,20	2117,90	2702,80	2502,80	2735,70
		14	2433,30	2792,90	2598,00	2380,60	3134,10
		15	2748,00	2866,70	2954,40	2615,50	2666,30
	průměr [g]		2667,06	2595,90	2956,12	2643,28	3134,36
	sm. odch. [g]		454,99	421,07	581,99	352,39	501,07
2512		16	13,29	15,33	14,88	16,87	12,39
		17	11,57	9,19	14,92	13,55	12,12
		18	10,65	9,95	10,84	13,74	9,33
		19	9,57	9,00	8,88	9,77	8,05
		20	16,97	16,50	11,97	14,81	11,97
	průměr [g]		12408,80	11994,60	12298,00	13744,80	10770,00
	sm. odch. [g]		2584,65	3237,44	2342,98	2311,70	1753,28

Tab. B5: Naměřené hodnoty pevnosti pájeného spoje (pájka SnPb)

Číslo desky			21	23	25	27	29
Povrchová uprava			Sn	Sn	Sn	Sn	Sn
Koncentrace			100 ppm	300 ppm	500 ppm	1000 ppm	20 %
Součástka	Spoj						
0201		1	878,20	423,00	594,80	967,10	496,80
		2	589,70	584,50	637,30	649,20	595,20
		3	621,40	635,30	686,50	660,30	658,30
		4	791,70	732,10	723,80	797,20	695,60
		5	906,30	778,20	860,30	944,00	823,40
	průměr [g]		757,46	630,62	700,54	803,56	653,86
	sm. odch. [g]		130,05	124,36	91,04	134,80	108,27
0402		6	1502,40	1501,60	1531,30	1839,30	1545,60
		7	1613,90	1357,90	1525,00	1807,50	1922,60
		8	2177,40	1704,80	2059,90	2175,00	2115,50
		9	2757,90	1806,30	2471,40	2469,00	1911,10
		10	1720,20	1417,50	1394,80	1552,80	1577,00
	průměr [g]		1954,36	1557,62	1796,48	1968,72	1814,36
	sm. odch. [g]		462,70	170,98	407,50	318,92	219,24
0603		11	2642,10	3276,60	3477,00	3176,20	3694,40
		12	2871,80	2285,70	2914,70	2606,70	3208,70
		13	2376,60	2724,60	2442,10	2477,00	3735,30
		14	2703,20	2624,20	3948,40	3490,10	3577,80
		15	3251,60	2952,00	3271,80	2941,70	4651,20
	průměr [g]		2769,06	2772,62	3210,80	2938,34	3773,48
	sm. odch. [g]		289,10	330,94	509,35	369,82	476,52
2512		16	19,66	23,36	19,01	17,59	19,25
		17	15,75	15,12	16,88	17,15	18,11
		18	17,18	15,06	16,87	13,78	15,97
		19	13,37	15,02	13,66	13,38	15,28
		20	16,15	21,73	19,47	18,17	19,42
	průměr [g]		16421,40	18056,60	17178,20	16015,80	17605,20
	sm. odch. [g]		2042,39	3699,82	2058,28	2015,67	1691,41

Tab. B6: Naměřené hodnoty pevnosti pájeného spoje (pájka SnPb)

Číslo desky			22	24	26	28	30
Povrchová uprava			Au	Au	Au	Au	Au
Koncentrace			100 ppm	300 ppm	500 ppm	1000 ppm	20 %
Součástka	Spoj						
0201		1	534,10	453,20	492,10	603,20	852,40
		2	597,60	426,60	419,00	800,00	325,00
		3	698,40	657,50	713,90	513,50	836,50
		4	744,00	546,80	810,30	649,20	635,30
		5	724,20	812,30	821,40	838,50	888,50
	průměr [g]		659,66	579,28	651,34	680,88	707,54
	sm. odch. [g]		80,49	141,90	165,80	121,73	210,67
0402		6	1836,10	2166,70	2275,80	1875,80	1109,10
		7	1766,30	2070,60	2266,30	1817,90	2662,70
		8	2090,50	2558,70	2238,50	2427,80	2852,00
		9	2568,30	4793,30	2580,60	2533,30	2799,60
		10	1692,90	1865,50	2086,10	1806,00	1690,90
	průměr [g]		1990,82	2690,96	2289,46	2092,16	2222,86
	sm. odch. [g]		318,28	1075,03	160,90	319,74	699,34
0603		11	5108,70	3978,20	5846,80	4145,20	3667,90
		12	3376,20	3472,60	3853,60	2346,00	2893,70
		13	3427,40	3607,10	4148,00	3059,10	2996,40
		14	4775,40	3795,60	3768,70	3468,60	3248,00
		15	3825,40	2119,40	3784,50	4254,40	3988,10
	průměr [g]		4102,62	3394,58	4280,32	3454,66	3358,82
	sm. odch. [g]		710,67	660,12	795,12	707,42	412,67
2512		16	16,86	17,31	17,28	18,10	18,98
		17	18,83	13,81	16,14	17,18	17,71
		18	15,34	18,14	14,18	15,34	15,74
		19	12,08	14,34	9,87	15,54	11,44
		20	17,53	16,96	19,53	20,29	19,47
	průměr [g]		16128,20	16112,20	15400,60	17287,40	16668,40
	sm. odch. [g]		2314,82	1715,44	3262,29	1819,12	2916,29

Příloha C: Faktorová analýza pro určení mechanické pevnosti pájeného spoje

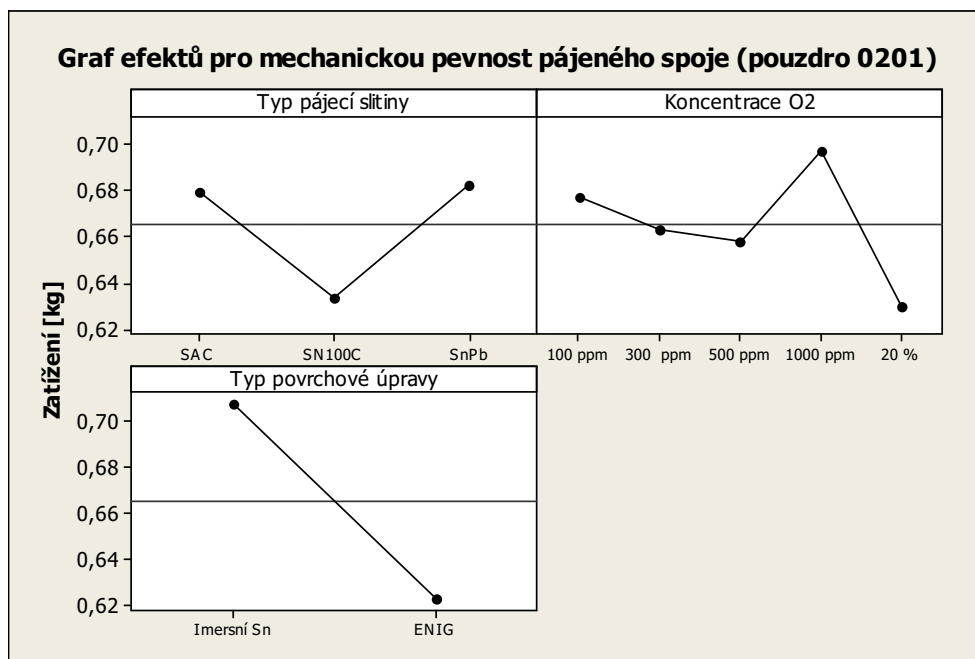
Tab. C1: Faktorová analýza pro určení mechanické pevnosti pájeného spoje

Pořadí	VSTUPNÍ PROMĚNNÉ				VÝSTUPNÍ PROMĚNNÉ	
	Typ pájecí pasty	Velikost pouzdra	Koncentrace O ₂	Typ povrchové úpravy	Průměrná hmotnost [kg]	Směrodatná odchylka [kg]
1	SAC	0201	100 ppm	Imersní Sn	0,686	0,183
2	SAC	0201	100 ppm	ENIG	0,685	0,196
3	SAC	0201	300 ppm	Imersní Sn	0,753	0,073
4	SAC	0201	300 ppm	ENIG	0,650	0,132
5	SAC	0201	500 ppm	Imersní Sn	0,618	0,175
6	SAC	0201	500 ppm	ENIG	0,678	0,160
7	SAC	0201	1000 ppm	Imersní Sn	0,736	0,020
8	SAC	0201	1000 ppm	ENIG	0,667	0,050
9	SAC	0201	20 %	Imersní Sn	0,734	0,051
10	SAC	0201	20 %	ENIG	0,586	0,149
11	SAC	0402	100 ppm	Imersní Sn	1,691	0,388
12	SAC	0402	100 ppm	ENIG	1,591	0,199
13	SAC	0402	300 ppm	Imersní Sn	1,938	0,258
14	SAC	0402	300 ppm	ENIG	1,547	0,319
15	SAC	0402	500 ppm	Imersní Sn	1,732	0,667
16	SAC	0402	500 ppm	ENIG	1,818	0,321
17	SAC	0402	1000 ppm	Imersní Sn	1,865	0,267
18	SAC	0402	1000 ppm	ENIG	1,729	0,305
19	SAC	0402	20 %	Imersní Sn	1,844	0,296
20	SAC	0402	20 %	ENIG	1,635	0,278
21	SAC	0603	100 ppm	Imersní Sn	2,501	0,429
22	SAC	0603	100 ppm	ENIG	2,962	0,596
23	SAC	0603	300 ppm	Imersní Sn	2,901	0,334
24	SAC	0603	300 ppm	ENIG	2,749	0,267
25	SAC	0603	500 ppm	Imersní Sn	3,007	1,248
26	SAC	0603	500 ppm	ENIG	3,032	0,248
27	SAC	0603	1000 ppm	Imersní Sn	3,073	0,374
28	SAC	0603	1000 ppm	ENIG	2,913	0,744
29	SAC	0603	20 %	Imersní Sn	2,574	0,456
30	SAC	0603	20 %	ENIG	2,554	0,208
31	SAC	2512	100 ppm	Imersní Sn	16,681	2,575
32	SAC	2512	100 ppm	ENIG	15,293	3,118
33	SAC	2512	300 ppm	Imersní Sn	12,471	2,692
34	SAC	2512	300 ppm	ENIG	12,488	3,060
35	SAC	2512	500 ppm	Imersní Sn	10,075	3,458
36	SAC	2512	500 ppm	ENIG	11,771	2,121

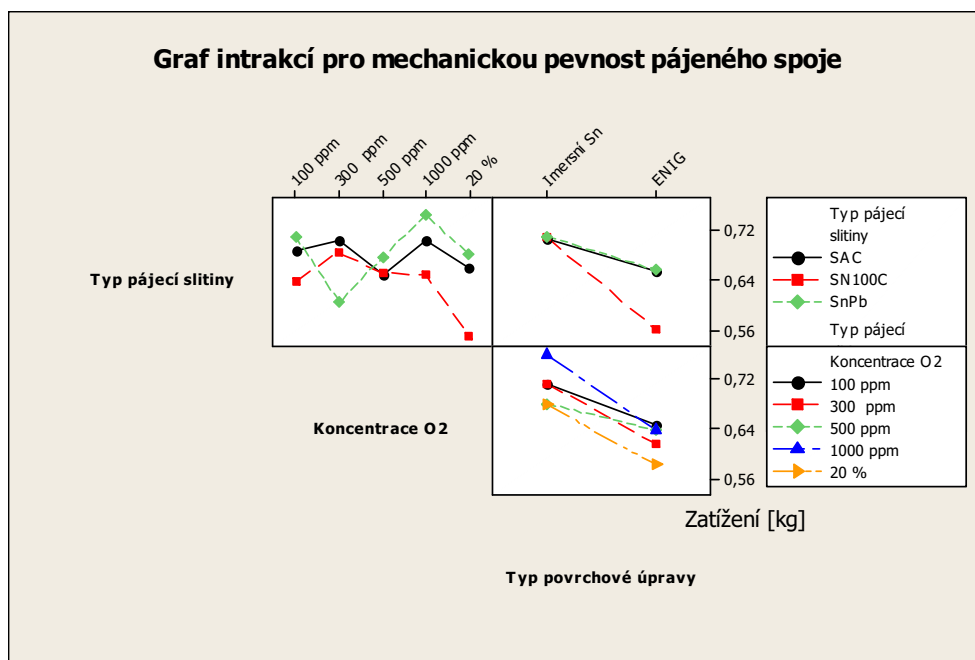
Pořadí	VSTUPNÍ PROMĚNNÉ				VÝSTUPNÍ PROMĚNNÉ	
	Typ pájecí pasty	Velikost pouzdra	Koncentrace O ₂	Typ povrchové úpravy	Průměrná hmotnost [kg]	Směrodatná odchylka [kg]
37	SAC	2512	1000 ppm	Imersní Sn	17,069	1,747
38	SAC	2512	1000 ppm	ENIG	12,718	2,883
39	SAC	2512	20 %	Imersní Sn	13,117	2,769
40	SAC	2512	20 %	ENIG	15,003	3,149
41	SN100C	0201	100 ppm	Imersní Sn	0,685	0,097
42	SN100C	0201	100 ppm	ENIG	0,591	0,106
43	SN100C	0201	300 ppm	Imersní Sn	0,751	0,190
44	SN100C	0201	300 ppm	ENIG	0,616	0,159
45	SN100C	0201	500 ppm	Imersní Sn	0,719	0,129
46	SN100C	0201	500 ppm	ENIG	0,583	0,056
47	SN100C	0201	1000 ppm	Imersní Sn	0,734	0,146
48	SN100C	0201	1000 ppm	ENIG	0,561	0,095
49	SN100C	0201	20 %	Imersní Sn	0,646	0,123
50	SN100C	0201	20 %	ENIG	0,453	0,192
51	SN100C	0402	100 ppm	Imersní Sn	1,672	0,159
52	SN100C	0402	100 ppm	ENIG	1,857	0,387
53	SN100C	0402	300 ppm	Imersní Sn	1,615	0,180
54	SN100C	0402	300 ppm	ENIG	1,606	0,240
55	SN100C	0402	500 ppm	Imersní Sn	1,844	0,356
56	SN100C	0402	500 ppm	ENIG	1,804	0,175
57	SN100C	0402	1000 ppm	Imersní Sn	1,539	0,226
58	SN100C	0402	1000 ppm	ENIG	1,743	0,289
59	SN100C	0402	20 %	Imersní Sn	1,688	0,245
60	SN100C	0402	20 %	ENIG	1,628	0,131
61	SN100C	0603	100 ppm	Imersní Sn	2,585	0,437
62	SN100C	0603	100 ppm	ENIG	2,667	0,455
63	SN100C	0603	300 ppm	Imersní Sn	2,172	0,613
64	SN100C	0603	300 ppm	ENIG	2,596	0,421
65	SN100C	0603	500 ppm	Imersní Sn	2,541	0,676
66	SN100C	0603	500 ppm	ENIG	2,956	0,582
67	SN100C	0603	1000 ppm	Imersní Sn	2,647	0,604
68	SN100C	0603	1000 ppm	ENIG	2,643	0,352
69	SN100C	0603	20 %	Imersní Sn	2,707	0,303
70	SN100C	0603	20 %	ENIG	3,134	0,501
71	SN100C	2512	100 ppm	Imersní Sn	11,333	2,695
72	SN100C	2512	100 ppm	ENIG	12,409	2,585
73	SN100C	2512	300 ppm	Imersní Sn	11,860	2,674
74	SN100C	2512	300 ppm	ENIG	11,995	3,237
75	SN100C	2512	500 ppm	Imersní Sn	12,247	3,194
76	SN100C	2512	500 ppm	ENIG	12,298	2,343
77	SN100C	2512	1000 ppm	Imersní Sn	13,561	2,743
78	SN100C	2512	1000 ppm	ENIG	13,745	2,312
79	SN100C	2512	20 %	Imersní Sn	11,620	2,192

Pořadí	VSTUPNÍ PROMĚNNÉ				VÝSTUPNÍ PROMĚNNÉ	
	Typ pájecí pasty	Velikost pouzdra	Koncentrace O ₂	Typ povrchové úpravy	Průměrná hmotnost [kg]	Směrodatná odchylka [kg]
80	SN100C	2512	20 %	ENIG	10,770	1,753
81	SnPb	0201	100 ppm	Imersní Sn	0,757	0,130
82	SnPb	0201	100 ppm	ENIG	0,660	0,080
83	SnPb	0201	300 ppm	Imersní Sn	0,631	0,124
84	SnPb	0201	300 ppm	ENIG	0,579	0,142
85	SnPb	0201	500 ppm	Imersní Sn	0,701	0,091
86	SnPb	0201	500 ppm	ENIG	0,651	0,166
87	SnPb	0201	1000 ppm	Imersní Sn	0,804	0,135
88	SnPb	0201	1000 ppm	ENIG	0,681	0,122
89	SnPb	0201	20 %	Imersní Sn	0,654	0,108
90	SnPb	0201	20 %	ENIG	0,708	0,211
91	SnPb	0402	100 ppm	Imersní Sn	1,954	0,463
92	SnPb	0402	100 ppm	ENIG	1,991	0,318
93	SnPb	0402	300 ppm	Imersní Sn	1,558	0,171
94	SnPb	0402	300 ppm	ENIG	2,691	1,075
95	SnPb	0402	500 ppm	Imersní Sn	1,796	0,407
96	SnPb	0402	500 ppm	ENIG	2,289	0,161
97	SnPb	0402	1000 ppm	Imersní Sn	1,969	0,319
98	SnPb	0402	1000 ppm	ENIG	2,092	0,320
99	SnPb	0402	20 %	Imersní Sn	1,814	0,219
100	SnPb	0402	20 %	ENIG	2,223	0,699
101	SnPb	0603	100 ppm	Imersní Sn	2,769	0,289
102	SnPb	0603	100 ppm	ENIG	4,103	0,711
103	SnPb	0603	300 ppm	Imersní Sn	2,773	0,331
104	SnPb	0603	300 ppm	ENIG	3,395	0,660
105	SnPb	0603	500 ppm	Imersní Sn	3,211	0,509
106	SnPb	0603	500 ppm	ENIG	4,280	0,795
107	SnPb	0603	1000 ppm	Imersní Sn	2,938	0,370
108	SnPb	0603	1000 ppm	ENIG	3,455	0,707
109	SnPb	0603	20 %	Imersní Sn	3,773	0,477
110	SnPb	0603	20 %	ENIG	3,359	0,413
111	SnPb	2512	100 ppm	Imersní Sn	16,421	2,042
112	SnPb	2512	100 ppm	ENIG	16,128	2,315
113	SnPb	2512	300 ppm	Imersní Sn	18,057	3,700
114	SnPb	2512	300 ppm	ENIG	16,112	1,715
115	SnPb	2512	500 ppm	Imersní Sn	17,178	2,058
116	SnPb	2512	500 ppm	ENIG	15,401	3,262
117	SnPb	2512	1000 ppm	Imersní Sn	16,016	2,016
118	SnPb	2512	1000 ppm	ENIG	17,287	1,819
119	SnPb	2512	20 %	Imersní Sn	17,605	1,691
120	SnPb	2512	20 %	ENIG	16,668	2,916

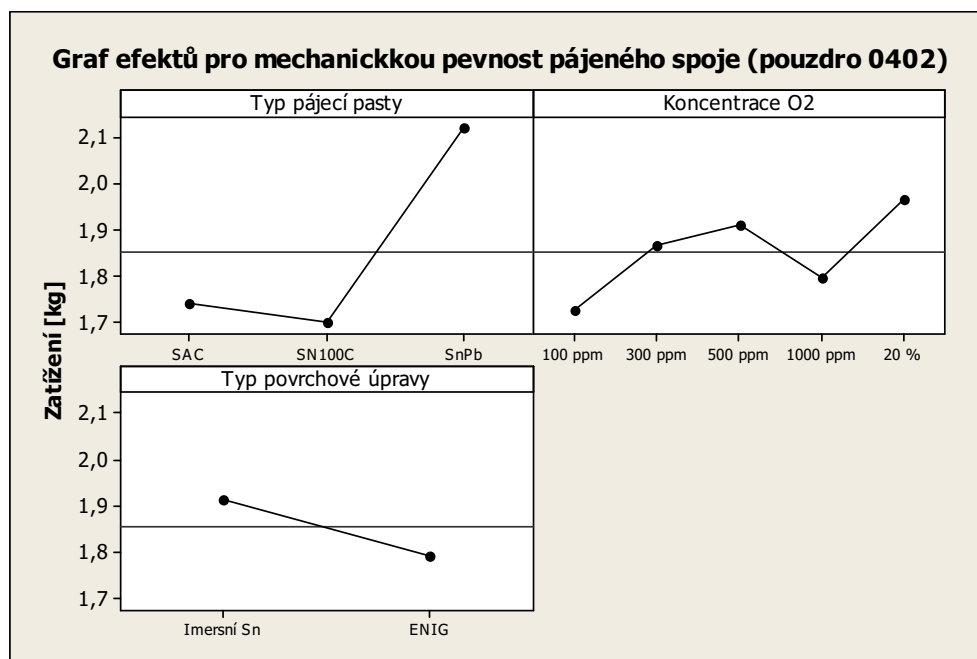
Příloha D: Grafy efektů a interakcí pro mechanickou pevnost pájeného spoje



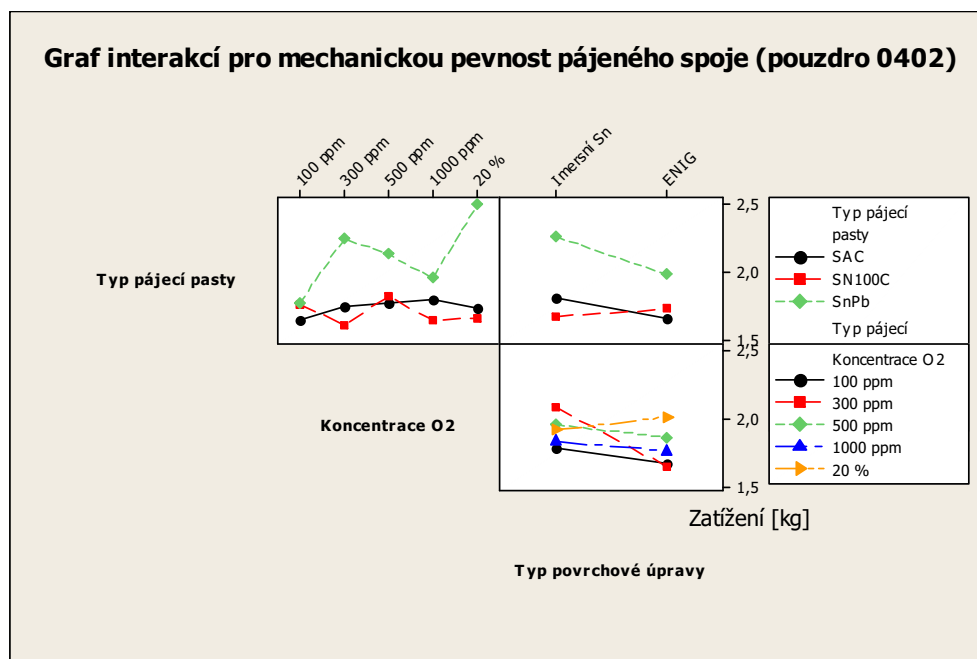
Obr. D1: Graf efektů pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 0201)



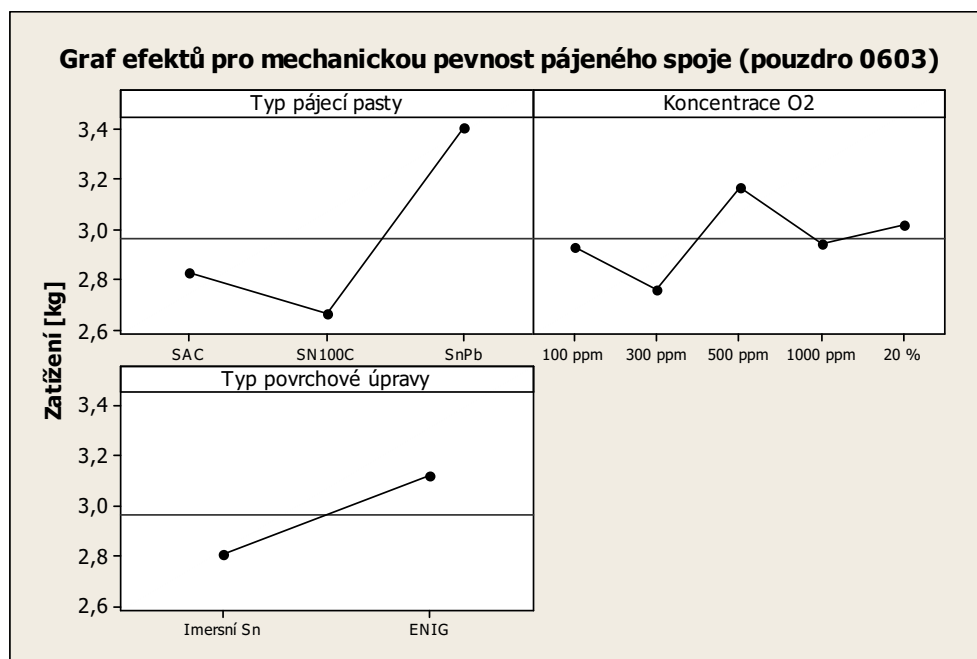
Obr. D2: Graf interakcí pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 0201)



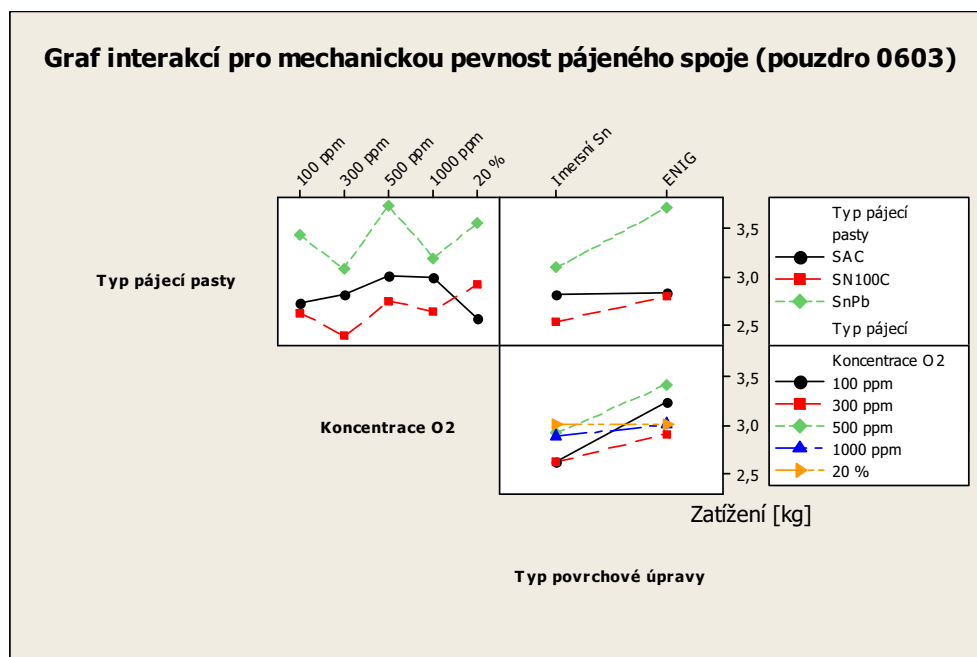
Obr. D3: Graf efektů pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 0402)



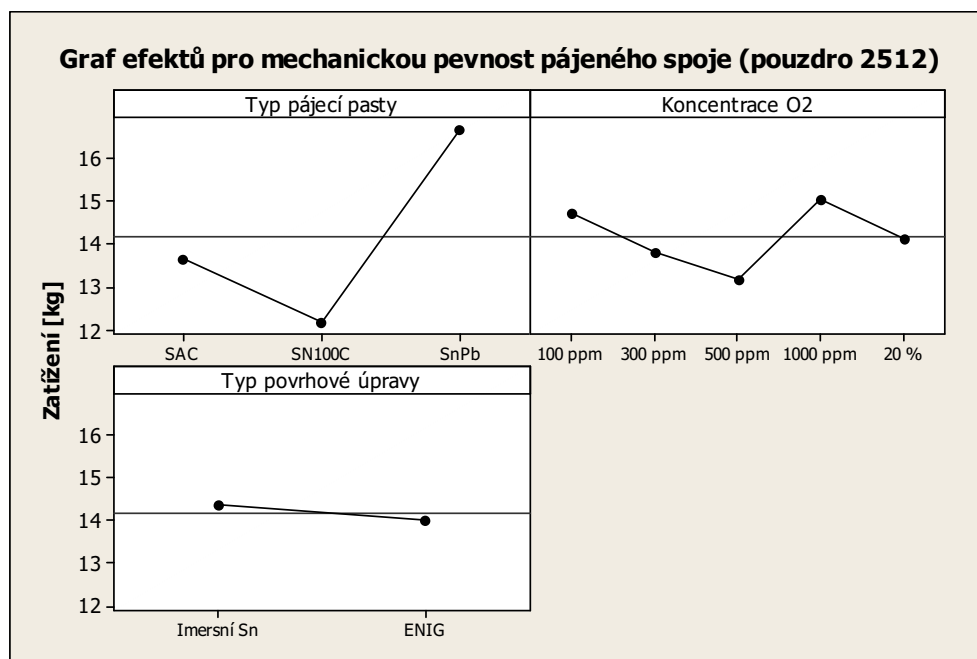
Obr. D4: Graf interakcí pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 0402)



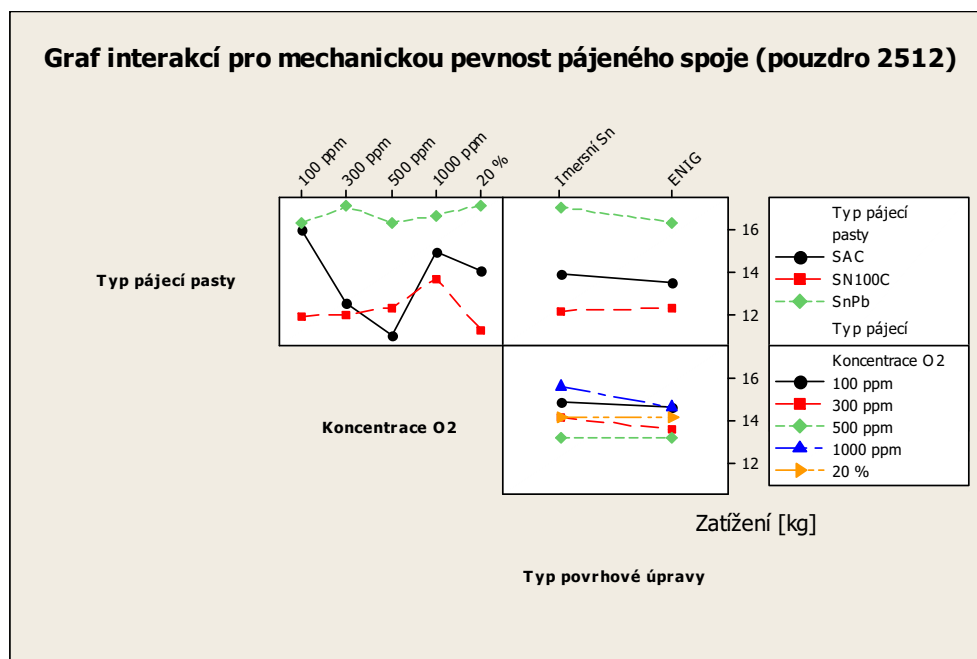
Obr. D5: Graf efektů pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 0603)



Obr. D6: Graf interakcí pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 0603)



Obr. D7: Graf efektů pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 2512)



Obr. D8: Graf interakcí pro mechanickou pevnost pájeného spoje (pouzdro 2512)