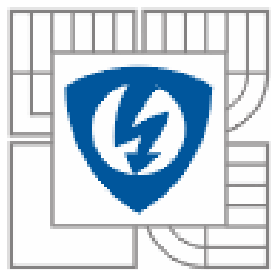


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ PÁJENÝCH SPOJŮ NA KERAMICKÝCH SUBSTRÁTECH POMOCÍ ZKOUŠKY STŘIHEM

THE COMPARISON OF PROPERTIES OF SOLDER JOINTS ON CERAMIC
SUBSTRATES BY SHEAR TEST

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

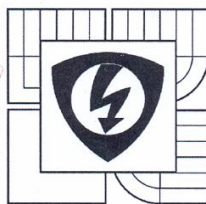
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUBOMÍR LIPAVSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARTIN ADÁMEK, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Lubomír Lipavský

Ročník: 3

ID: 125523

Akademický rok: 2011/12

NÁZEV TÉMATU:

Porovnání vlastností pájených spojů na keramických substrátech pomocí zkoušky stříhem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s technologií bezolovnatého pájení v ochranné atmosféře a testováním pájených spojů. Navrhněte testovací motiv na keramický substrát pro testování pevnosti bezolovnatých pájených spojů na zařízení Dage pomocí testu stříhem. Pomocí testovacího motivu otestujte různé typy pájecích past a zjištěné vlastnosti past porovnejte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

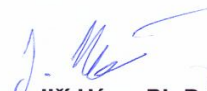
Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 31.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Martin Adámek, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:


doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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:

Tato práce se zabývá problematikou bezolovnatého pájení v ochranné atmosféře se zaměřením na mechanické zkoušky. Teoretická část je zaměřena na druhy bezolovnatých pájek, mechanické zkoušky prováděné na pájených spojích a různé metody pájení přetavením. Dále je probrána spolehlivost a životnost pájených spojů. Cílem praktické části je porovnání pevnosti pájených spojů pomocí zkoušky stříhem pro jednotlivé velikosti součástek, různé koncentrace ochranné dusíkové atmosféry a různé typy pájecích past. Testování se provádí na keramickém substrátu, čímž se odlišuje od prací, které jsou prováděné na organickém substrátu. Pro jednotlivé typy pájecích past jsou dále zpracovány procentuální výskyty jednotlivých typů utržení pájeného spoje.

Abstract:

This thesis deals with issues lead – free soldering in a protective atmosphere with a focus on mechanical tests. The theoretical part is focused on the types of lead-free solders, mechanical tests carried on the solder joints and various methods reflow soldering. It is also discussed reliability and durability of solder joints. Aim of the practical part is to compare the strength of solder joints using shear tests for various sizes of components, various concentrations of protective nitrogen atmosphere and various types of solder pastes. Testing is performed on a ceramic substrate, which differs from the works being carried on an organic substrate. For each type of solder paste is further processed by the percentage occurrences of each type tearing of solder joint.

Klíčová slova:

Bezolovnaté pájky, test stříhem, pájení přetavením, spolehlivost pájeného spoje, dusíková atmosféra.

Keywords:

Lead – free solder, shear test, reflow soldering, reliability of the solder joint, nitrogen atmosphere.

Bibliografická citace díla:

LIPA VSKÝ, L. *Porovnání vlastností pájených spojů na keramických substrátech pomocí zkoušky stříhem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Adámek, Ph.D..

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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:

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Adámkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc při plnění úkolů realizovaných v mé bakalářské práci. Dále děkuji Ing. Petru Schnederlemu za pomoc v laboratořích a za cenné rady a náměty, které mi poskytl při zpracování mé bakalářské práce.

Obsah

Úvod	9
1 Bezolovnaté pájky.....	10
1.1 Úvod do bezolovnatých pájek	10
1.2 Pájka Sn/Ag/Cu	11
1.3 Pájka Sn/Ag	11
1.4 Pájka Sn/Cu	12
1.5 Pájka Sn/Sb.....	12
1.6 Tavidla.....	12
2 Mechanické zkoušky.....	15
2.1 Zkouška stříhem.....	15
2.2 Zkouška tahem.....	17
2.3 Zkouška odolnosti proti odtržení.....	17
2.4 Zkouška cyklickým padáním	18
2.5 Zkouška cyklickým ohybem	18
2.6 Mechanická únavová zkouška smykem.....	19
3 Pájení přetavením.....	20
3.1 Ochranná atmosféra	24
4 Spolehlivost pájeného spoje	25
4.1 Jakost pájeného spoje.....	26
4.2 Životnost pájeného spoje	28
5 Praktická část	29
5.1 Návrh a výroba testovacích desek	29
5.2 Testování pájených spojů.....	31
5.3 Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů na stříh.....	35
5.3.1 Velikost součástek 2512.....	35
5.3.2 Velikost součástek 1206.....	36
5.3.3 Velikost součástek 0805.....	37
5.3.4 Velikost součástek 0603.....	38
5.3.5 Velikost součástek 0402.....	39
5.3.6 Pájecí pasta R256 tepelně vystárnutá	40
5.4 Zhodnocení výsledků	40
6 Závěr	43
7 Použitá literatura.....	45
Seznam použitých zkratk	47
Příloha A : Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů na stříh	48

Seznam obrázků

Obr. 1.1 : Porovnání smáčivosti různých typů tavidel [1].	14
Obr. 1.2 : Hodnocení pájeného spoje podle smáčivosti [11].	14
Obr. 2.1 : Zarovnání stříhové hlavy dle [14].	16
Obr. 2.2 : Nastavení výšky stříhové hlavy dle [14].	16
Obr. 2.3 : Místa utržení při testu stříhem dle [22].	16
Obr. 2.4 : Zkouška stříhem [13].	17
Obr. 2.5 : Zkouška tahem [13].	17
Obr. 2.6 : Zkouška odolnosti proti odtržení dle [23].	18
Obr. 2.7 : Mechanická únavová zkouška smykem dle [26].	19
Obr. 3.1 : Teplotní profil pro pájení přetavením dle [11].	20
Obr. 3.2 : Ishikawův diagram pro proces pájení přetavením [15].	21
Obr. 3.3 : Konvekční pec ERSA a detail trysek [11].	22
Obr. 3.4 : Kondenzační pájení, a) princip pájení přetavením kondenzací par, b) teplotní profil při pájení v parách dle [11].	23
Obr. 3.5 : Přetavovací pec s infračerveným ohřevem [11].	23
Obr. 3.6 : Srovnání dusíkové atmosféry se vzduchem [1].	24
Obr. 4.1 : Faktory ovlivňující spolehlivost pájeného spoje [1].	25
Obr. 4.2 : Znázornění struktury Ag_3Sn [17].	26
Obr. 4.3 : Srovnání pevnosti v tahu pro různé slitiny pájek dle [18].	27
Obr. 4.4 : Porovnání pevnosti v stříhu dle [19].	27
Obr. 4.5 : Vývoj růstu intermetalické vrstvy a prasklin [15].	28
Obr. 5.1 : Testovací motiv.	29
Obr. 5.2 : Natisknutá pájecí pasta.	30
Obr. 5.3 : Zařízení DAGE PC2400.	31
Obr. 5.4 : Ishikawův diagram pevnosti pájených spojů na stříh	32
Obr. 5.5 : Zapájená testovací deska, pasta Sn62Pb36Ag2 , $\text{O}_2 = 5000 \text{ ppm}$.	33
Obr. 5.6 : Zapájená testovací deska, pasta Sn62Pb36Ag2 , $\text{O}_2 < 10 \text{ ppm}$.	33
Obr. 5.7 : Detailní pohled na zapájený rezistor typu 0402, pájeno na vzduchu, pasta Sn62Pb36Ag2 .	33
Obr. 5.8 : Detailní pohled na zapájený rezistor typu 0402, pájeno na vzduchu, pasta SAC305.	33
Obr. 5.9 : Pohled na některé otrhané součástky.	34
Obr. 5.10 : Detailní pohled na utržený pájený spoj.	34
Obr. 5.11 : Detailní pohled na utrženou kontaktní plošku součástky.	34
Obr. 5.12 : Graf naměřených hodnot pevnosti pájených spojů na stříh pro součástku typu 2512.	35
Obr. 5.13 : Graf naměřených hodnot pevnosti pájených spojů na stříh pro součástku typu 1206.	36
Obr. 5.14 : Graf naměřených hodnot pevnosti pájených spojů na stříh pro součástku typu 0805.	37

Obr. 5.15 : Graf naměřených hodnot pevnosti pájených spojů na střih pro součástku typu 0603.....	38
Obr. 5.16 : Graf naměřených hodnot pevnosti pájených spojů na střih pro součástku typu 0402.....	39
Obr. 5.17 : Grafy procentuálního výskytu typů utržení pájeného spoje pro jednotlivé pájecí pasty.....	42

Seznam tabulek

Tab. 1.1 : Přehled bezolovnatých pájecích past dle [7].	11
Tab. 1.2 : Rozdělení tavidel podle složení dle [7].	13
Tab. 4.1 : Hodnoty pevnosti v tahu a protažení udávané výrobcem NIHON SUPERIOR dle [20].	27
Tab. 5.1 : Parametry testovacích desek.	30
Tab. 5.2 : Použité pájecí pasty.	30
Tab. 5.3 : Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 2512.	35
Tab. 5.4 : Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 1206.	36
Tab. 5.5 : Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 0805.	37
Tab. 5.6 : Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 0603.	38
Tab. 5.7 : Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 0402.	39
Tab. 5.8 : Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro tepelně vystárnutou pájecí pastu R256.	40
Tab. A.1 : Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 2512.	48
Tab. A.2 : Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 1206.	49
Tab. A.3 : Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 0805.	50
Tab. A.4 : Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 0603.	51
Tab. A.5 : Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 0402.	52
Tab. A.6 : Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro tepelně vystárnutou pájecí pastu R256.	53

Úvod

Pájení je metalurgické spojování kovů roztavenou pájkou. Proces pájení znali již obyvatelé starověké Mezopotámie kolem roku 2000 př. n. l. U nás proces pájení rozšířili Kelťové v 5. stol. př. n. l. Pro pájení součástek se používá tzv. měkké pájení s pracovními teplotami do 450 °C. Při procesu pájení dochází k difúzi a rozpouštění některých prvků pájky a spojovaných materiálů. Pro spojení je potřeba dobrá adheze a čistota spojovaných materiálů. Existuje dále kategorie tzv. tvrdého pájení s pracovními teplotami nad 450 °C. Při tomto typu pájení se pro spojování kovů nejčastěji používá stříbro a měď. [1], [2]

V minulosti, byly nejvíce používány eutektické a téměř eutektické pájky SnPb pro jejich nízkou cenu, nízký bod tání a vynikající mechanické vlastnosti. Avšak kolem roku 2000, se začala řešit toxicita používaných materiálů pro elektroniku. Z tohoto důvodu vyšla k 1.7.2006 směrnice EU, která omezuje používání nebezpečných látek v elektronickém průmyslu. Za nebezpečné látky byly označeny olovo (Pb), kadmium (Cd), rtuť (Hg), šestimocný chrom (CrVI), polybromované bifenylly (PBB) a polybromované difenylethery (PBDE). [3], [4]

Elektronický průmysl musel proto začít hledat vhodné náhrady k pájkám s obsahem Pb. Základem pro bezolovnaté pájky zůstal Sn a k němu se hledají vhodné příměsi k docílení stejných nebo lepších vlastností jako u pájek SnPb. Bezolovnaté pájky se v porovnání s pájkami SnPb vyznačují vynikajícími mechanickými vlastnostmi, pokud jde o maximální pevnost a tažnost. Obsahují vyšší množství cínu a k přetavení potřebují vyšší teplotu. Mají horší smáčivost a větší tendenci k oxidaci. Dobré smáčivosti se dosahuje použitím ochranné atmosféry, která ale zvyšuje náklady použitím inertního plynu. [3]

Pro používání olovnatých pájek jsou uděleny i výjimky a to z důvodu zcela neověřených vlastností bezolovnatých pájek, které jsou ještě v procesu testování. Výjimky jsou uděleny např.: v lékařském, vojenském nebo leteckém průmyslu.

S příchodem bezolovnatých pájek jsou spojeny i zvýšené nároky na pájecí zařízení. Je vyžadována mnohem vyšší přesnost pájecích vln a pecí pro pájení přetavením. Doporučuje se používání ochranné dusíkové atmosféry, která redukuje oxidaci, zlepšuje vzhlednost a výrazně zlepšuje smáčivost pájeného spoje. Zavádění ochranné atmosféry snižuje používání tavidel, což vede ke zvýšení spolehlivosti a životnosti pájeného spoje.

Problematika pájení je stále více aktuální vzhledem ke stále se zmenšujícím pájeným spojům a součástkám. Zmenšováním pájených spojů se musí také zvýšit přesnost při výrobě desek plošných spojů, jejich osazování a pájení. Nedodržením výrobního postupu a přesnosti, může dojít ke snížení nejen životnosti pájeného spoje, ale i celého elektronického systému. [5]

Tato bakalářská práce se zabývá bezolovnatým pájením se zaměřením na mechanické zkoušky. V praktické části byly testovány pájené spoje pomocí zkoušky stříhem na zařízení DAGE PC2400. Testování bylo prováděno pomocí navrženého testovacího motivu s různými velikostmi rezistorů a různými typy pájecích past. Testovací desky byly zapájeny v ochranné dusíkové atmosféře při různých koncentracích. Výsledkem této práce jsou grafy závislosti mechanické pevnosti pájených spojů na stříh pro různé velikosti součástek a pro různé koncentrace ochranné dusíkové atmosféry. Následně jsou zpracovány typy utržení pro jednotlivé pájecí pasty, ke kterým docházelo při testování. V práci je dále navržen a vypracován Ishikawův diagram vlivů projevujících se při testování mechanické pevnosti pájených spojů pomocí zkoušky stříhem.

1 Bezolovnaté pájky

1.1 Úvod do bezolovnatých pájek

Hlavní problém v nahrazování olova drahými kovy v bezolovnatém pájení je nárůst ceny pájecích slitin. Další problémy souvisí se spolehlivostí, kde se výrobci snaží napodobit vlastnosti pájky SnPb. Každá z těchto slitin má své výhody a nevýhody. [6] Jako nejvíce aplikované náhrady za olovnaté pájky jsou pro většinu aplikací používané pájky Sn95,5Ag4Cu0,5 (Sn95,5 %, Ag4 %, Cu0,5 %), Sn96,5Ag3,5, Sn99,3Cu0,7 a Sn95Sb5. [7]

Základem bezolovnatých pájek je cín. K němu se přidávají různé příměsi, jež ovlivňují teplotu tavení, smáčivost, elektrické vlastnosti, mechanické vlastnosti a řadu dalších. Cín má vynikající schopnost smáčet pájený povrch, je měkký a dobře tvárný, má dobré elektrické i tepelné vlastnosti. Nevýhodou Sn je jeho nízká mechanická pevnost v tahu a stříhu. Mechanická pevnost se zvyšuje příměsemi např.: Cu, Sb, které ale mohou mít jiné negativní vlastnosti působící na výslednou slitinu.

Bezolovnaté pájky se většinou vyznačují vyšší teplotou tavení a výrazně užším teplotním pracovním oknem, než je tomu u pájek olovnatých. Jako vhodné náhrady olova v SnPb pájkách se osvědčily prvky bismut, stříbro, měď, zlato, zinek, antimon a další.

Na rozdíl od pájek olovnatých jsou bezolovnaté pájky reaktivnější a tvorba spoje probíhá v kratším čase. Dále se musí kvůli zvýšené reaktivitě zvyšovat nároky na kontrolu procesu pájení a na zařízení, které musí být dostatečně přesné, aby se mohl co nejlépe nastavit teplotní profil. Orientační teploty tavení různých bezolovnatých pájecích past jsou uvedeny v tab. 1.1. [7]

Vlastnosti některých prvků, které se přidávají k základnímu materiálu: [7]

- Antimon (Sb) – zlepšuje smáčivost, mechanickou pevnost a odolnost pájeného spoje. Snižuje povrchové napětí a pravděpodobnost tombstoningu. Částečně vykazuje toxické působení na lidský organismus, proto se jeho rozšíření v ekologicky nezávadných pájkách neočekává.
- Stříbro (Ag) – má dobré elektrické vlastnosti, snižuje bod tání, zlepšuje smáčivost a pevnost spoje, na povrchu se vytváří zrnitost a důlky.
- Měď (Cu) – zlepšuje smáčivost povrchu, mechanickou pevnost, dochází k rozpouštění v cínu.
- Bismut (Bi) – snižuje teplotu tavení, zlepšuje vzhled pájeného spoje, obtížné získávání.
- Indium (In) – snižuje teplotu tavení, dobrá smáčivost, vysoká cena.

Tab. 1.1 : Přehled bezolovnatých pájecích past dle [7].

Teplota tavení (°C)			
< 180	180 - 200	200 - 230	> 230
Sn42Bi58	Sn89Zn8Bi3	Sn	Sn99Sb1
Sn58Bi42	Sn90Bi9,5Cu0,5	Sn97,5Ag2,5	Sn95Sb5
Sn50Bi50	Sn77,2In20Ag2,8	Sn96,5Ag3,5	Sn97Cu3
Sn48Bi52	Sn63,6In8,8Zn27,6	Sn96Ag4	Sn65Ag25Sb10
		Sn95,4Ag3,4Cu1,2	
		Sn92,1Ag3,4Cu1,2Bi3,3	
		Sn95,5Ag4Cu0,5	
		Sn93,6Ag4,7Cu1,7	
		Sn96,2Ag2,5Cu0,8Sb0,5	
		Sn99,3Cu0,7	
		Sn96Ag1,5Bi2Cu0,5	
		Sn91,8Ag3,4Bi4,8	
		Sn95Ag3Bi2	

1.2 Pájka Sn/Ag/Cu

Tato slitina se skládá z cínu, stříbra a mědi. Jednotlivé slitiny SAC se liší různým procentním zastoupením jednotlivých příměsí. Nejpoužívanější slitiny pájek jsou Sn95,5Ag4Cu0,5 (216 – 219 °C), Sn95,5Ag3,8Cu0,7 (217 – 219 °C), Sn95Ag4Cu1 (216 – 219 °C) a Sn93,6Ag4,7Cu1,7 (216 – 218 °C). Obecně se mechanická stabilita pájeného spoje zhoršuje při přibližování provozní teploty k bodu tání. Se vzrůstajícími teplotními cykly by to pro pájky SnPb s bodem tání 183 °C způsobovalo větší degradace, než u pájek s vyšším bodem tání. Teplota tání SAC pájek umožňuje, aby se mohly použít při vysokých provozních teplotách do 175 °C. Tyto pájky smáčí měď hůře, než pájky SnPb s použitím tavidel. Lepší smáčení je dosahováno tavidly navrženými pro použití při vyšších teplotách. Pro další zlepšení smáčivosti se může použít ochranná dusíková atmosféra. Vysoký obsah mědi ve slitině Sn93,6Ag4,7Cu1,7 brání v rozpouštění mědi do spoje. [8]

1.3 Pájka Sn/Ag

Představitelem této skupiny je Sn96,5Ag3,5 s bodem tání 221 °C. Tato slitina vykazuje dostatečnou pevnost a smáčivost pro použití v elektronice, stejně jako při pájení vodovodních trubek. Má dobrou tepelnou únavovou vlastnost ve srovnání s SnPb. Slitina SnAg má omezenou rozpustnost stříbra v cínu, čímž je odolnější vůči zhrubnutí na rozdíl od pájky SnPb, kde dochází k rozpouštění olova do cínu zejména při zvýšených teplotách. Ke zpomalení difúzního růstu se mohou použít povrchové úpravy NiAu. Povlak Au na Ni slouží jako difúzní bariéra k omezení pronikání mědi do pájky a vytváření intermetalické vrstvy Cu₆Sn₅. [8]

1.4 Pájka Sn/Cu

Nejpoužívanějším typem slitiny této skupiny je pájka Sn99,3Cu0,7 s bodem tání 227 °C. Je vhodná pro vysokoteplotní aplikace např. v automobilovém průmyslu. Vykazuje dobré únavové vlastnosti. [8]

Dalším typem Sn/Cu slitiny je eutektická slitina Sn100C s bodem tání 227 °C. Skládá se ze stejného procentuálního zastoupení mědi a cínu jako Sn99,3Cu0,7, ale navíc obsahuje nepatrné množství Ni a Ge. Výhodou této slitiny je nižší agresivita vůči nerezové oceli a jiným materiálům, ze kterých je vyrobena pájecí lázeň ve srovnání se slitinami SAC. Vytváří hladké, lesklé a dobře tvarované spoje. Intermetalická vrstva se vytváří pomalu a rovnoměrně. [9]

1.5 Pájka Sn/Sb

Představitelem této slitiny je Sn95Sb5 s bodem tání 232 – 240 °C. Tato slitina je vhodná pro vysokoteplotní aplikace pro její relativně vysoký bod tání. Antimon zvyšuje pevnost a tvrdost této slitiny. Vznikající intermetalická sloučenina má kubickou strukturu s vysokou tvrdostí. Při použití standardního RMA tavidla bez ochranné atmosféry je smáčivost u této slitiny podstatně lepší než u Sn63Pb37 a Sn96,5Ag3,5. Nevýhodou Sb je, že vykazuje částečnou toxicitu a při obsahu většího množství (4 %) zhoršuje pevnost v tahu. Antimon stejně jako Bismut jsou vedlejší produkty při výrobě olova. [8]

1.6 Tavidla

Důležitou složkou při vytváření pájeného spoje jsou tavidla. Při zahřátí urychlují a podporují smáčení pájených materiálů pájkou. Dále také pomáhají za působení tepla odstraňovat oxidy a nečistoty z povrchu pájeného materiálu a chrání je i proti oxidaci při pájení. Nanášejí se buď v tekutém stavu při pájení vlnou, nebo jsou přímo obsažena v pájecí pastě při pájení přetavením.

Tavidlo má celou řadu dalších funkcí: [1], [7]

- odstraňuje povrchové oxidy a další nečistoty z pájeného povrchu a případně i ze samostatné pájky,
- odstraňuje reakční produkty z pájeného spoje a umožňuje pájce dostat se na kovové plochy,
- snižuje povrchové napětí pájecí slitiny a umožňuje tak pájce aby se dobře roztekla,
- chrání očištěné kovové plochy před vznikem oxidů až do okamžiku vytvoření pájeného spoje,
- zlepšuje přenos tepla na celé ploše pájeného spoje,
- řídí tixotropní a reologické vlastnosti.

S použitím tavidla nastává problém čištění. Zbytky tavidla mohou nepříznivě působit z několika důvodů: [7]

- mohou snížit životnost a spolehlivost pájeného spoje,
- mohou zhoršit elektrické vlastnosti,
- mohou způsobit korozi,
- mohou omezovat elektrické testování.

Z tohoto výčtu vyplývá, že snižování tavidla v pájce je jedním ze základních požadavků v technologii pájení. Nesmí obsahovat zdraví a životnímu prostředí škodlivé látky, což je pochopitelné už z důvodu přechodu na bezolovnaté pájky. Musí být chemicky stále, mít inertní charakter, nebo musí být snadno odstranitelné. [1], [7]

Tavidla rozdělujeme do tří základních skupin: [10]

- mírně aktivovaná pryskyřice (RMA – Rosin Mildly Activated),
- tavidla, jejichž zbytky není nutné odstraňovat,
- tavidla rozpustná ve vodě.

Tavidlo typu RMA se skládá z kalafuny rozpuštěné v organickém ředidle a aktivátoru, kterým může být organická kyselina nebo sůl. Maximální aktivitu vykazuje při pájecím procesu, ale po zapájení vykazuje už nízkou aktivitu a tím i korozivitu. U aplikací kde se nevyžaduje vysoká spolehlivost se tavidlo po zapájení nemusí odstraňovat.

Dalším typem jsou tavidla, jež se nemusí po pájení odstraňovat, protože mají nízkou aktivitu. S tím je spojena nevýhoda, že spojované části musí být před pájením dokonale očištěny. Výhodou těchto tavidel je, že se nemusí po pájení odstraňovat, např.: u součástek umístěných v malé výšce je odstraňování obtížné. Nenavlhají a nemění elektrické vlastnosti z důvodu uzavření tavidla po pájení.

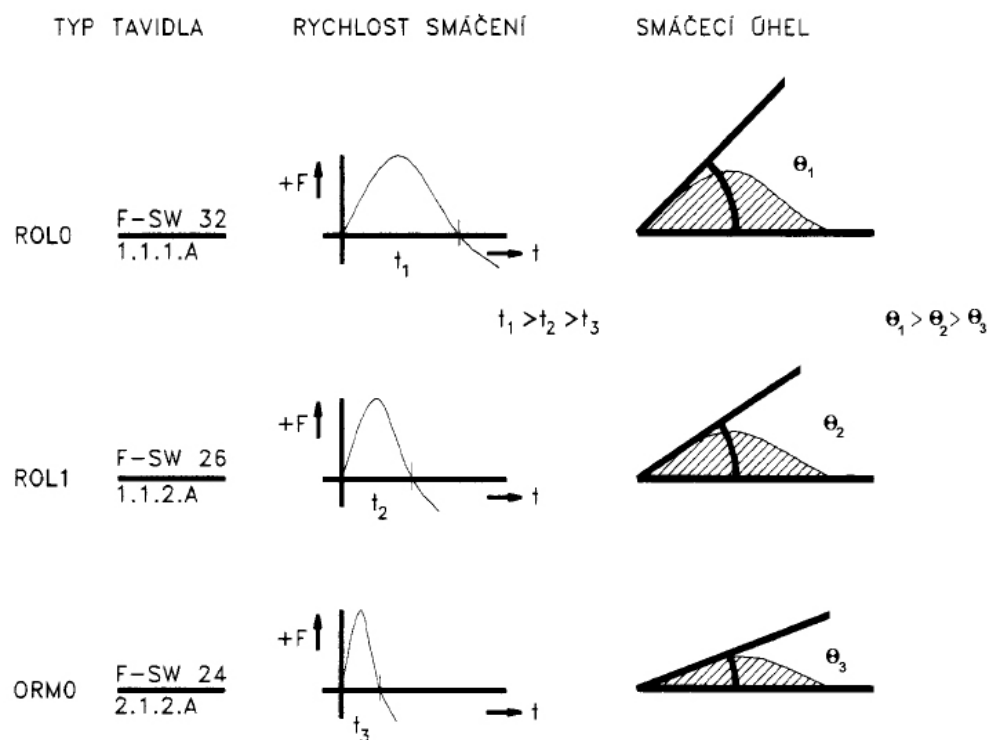
Tavidla rozpustná ve vodě se používají tam, kde je potřeba vyšší aktivita tavidla. Jsou agresivnější, čímž způsobují korozi, a proto musí být odstraněny. Jejich výhodou je, že se odstraňují deionizovanou vodou. [10]

Tab. 1.2 : Rozdělení tavidel podle složení dle [7].

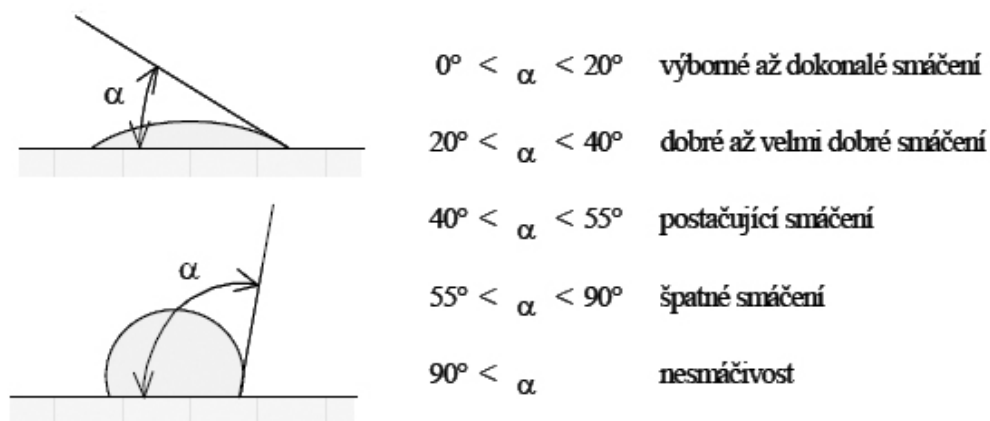
Typ tavidla	Základní složka	Aktivátor	Forma tavidla
pryskyřicové	kalafuna (přírodní) syntetická pryskyřice	bez aktivátoru	tekuté
organické	vodou rozpustné vodou nerozpustné	halogenové	
		bezhalogenové	
anorganické	solí	chlorid amonný bez chloridu amonného	tuhé
	kyseliny	fosforečná jiné kyseliny	pasta
	zásady	aminy nebo amoniaky	

Smáčivost je důležitou vlastností při hodnocení pájených povrchů. Hlavními faktory při posuzování kvality jsou: [11]

- stupeň smáčivosti (je udáván úhlem smáčení),
- rychlost smáčení (je to doba, za kterou se pájka rozprostře po pájeném povrchu).



Obr. 1.1 : Porovnání smáčivosti různých typů tavidel [1].



Obr. 1.2 : Hodnocení pájeného spoje podle smáčivosti [11].

2 Mechanické zkoušky

Tepelné změny a mechanické vibrace mají vliv na selhání pájeného spoje (kritické např. u flip-chip, které mají malé vývody a tím i pájené spoje). Tyto změny jsou většinou cyklické, což vede k únavě materiálu v provozu. Proto je důležité analyzovat mechanické vlastnosti pájených spojů. [12]

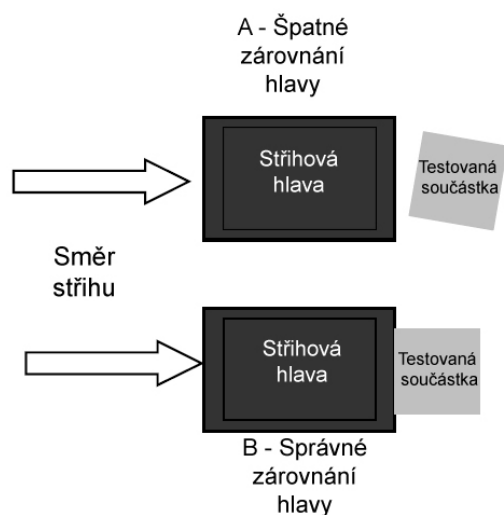
Mechanické zkoušky se používají pro znázornění deformace pájky v závislosti na čase, při působení vnějších zatěžovacích sil. Testování se provádí vibracemi, stříhem, tahem, krutem, ohybem atd. Pájené spoje jsou mechanicky omezené na rozhraní mezi substrátem a pájkou, protože substrát se deformuje pružně na rozdíl od pájky, která se deformuje nepružně. [13]

2.1 Zkouška stříhem

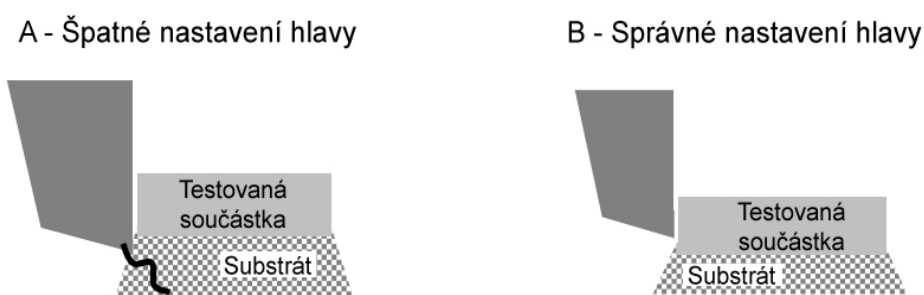
Tato metoda je popsána normou ČSN EN 60749 – 19 jako zkouška pevnosti čipu stříhem nebo normou ČSN EN 62137 – 1 – 2 jako zkouška pevnosti ve smyku. Zkouška stříhem je osvědčená destruktivní metoda pro hodnocení nejen stupně trhlin a poškození pájeného spoje, ale i pevnosti spoje. Je použitelná pro součástky a konektory pro povrchovou montáž, ale není použitelná pro více vývodové součástky a pro vývody typu gull wing (racčího křídla). Dále není použitelná pro velikosti pájených plošek větších než 10 mm², pro flip-chip technologii a pro flexibilní substráty. Při této zkoušce se zkoumá síla, která je potřebná k utrnutí součástky v pájeném spoji. Tato síla je odlišná pro různé typy pájek a je závislá na množství a velikosti trhlin, které se vytvoří po přetavení pájeného spoje. [13], [21], [22]

Testování se obvykle provádí při pokojové teplotě, ale může se provádět i při zvýšených teplotách nebo po teplotním cyklování. Při použití teplotního cyklování je normou ČSN EN 62137 – 1 – 2 doporučeno cyklování od -40 do +125 °C, kdy změna teploty od spodní hranice po horní trvá 30 min. Doporučený střední počet cyklování je 500 cyklů a maximální 1000 cyklů. Deska se po teplotním cyklování může testovat až po více jak 4 hodinách, kdy je umístěna ve standardních atmosférických podmínkách. Při nastavování stříhové hlavy se musí správně nastavit rovnoběžnost stříhové hlavy s testovanou součástkou. Nesprávné nastavení způsobuje předčasné popraskání pájeného spoje, což vede k nesprávným naměřeným hodnotám. [14], [22]

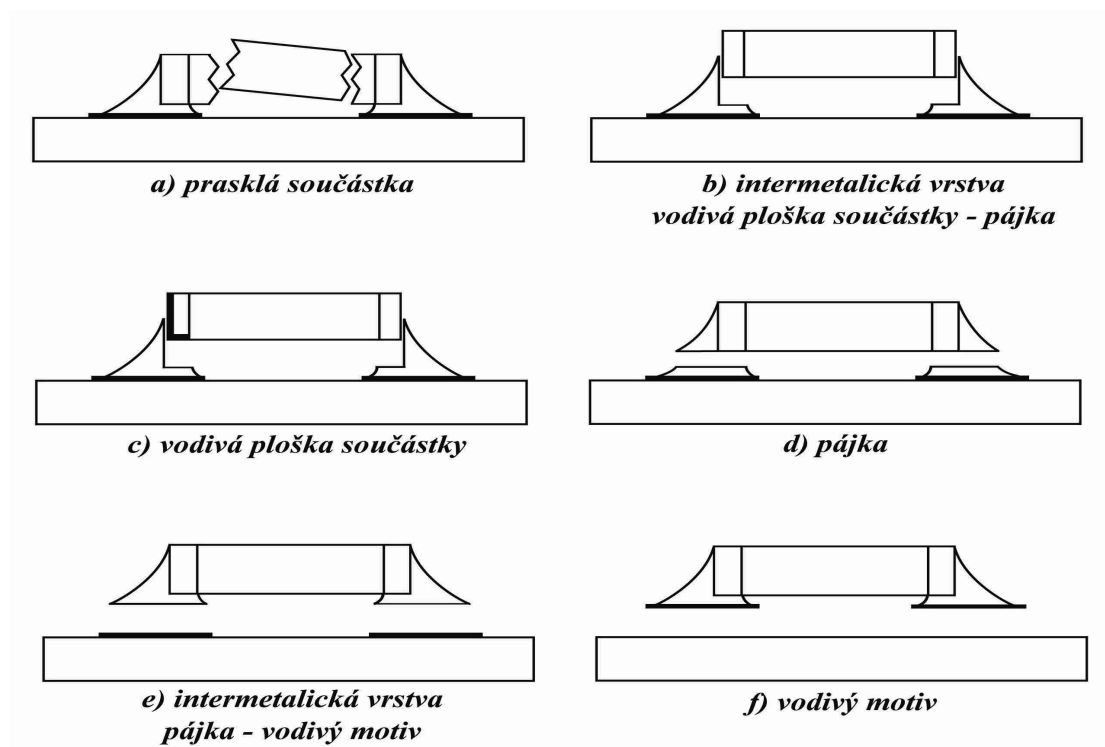
Dalším parametrem, který se nastavuje je výška hlavy. Podle normy musí stříhová hlava tlačít minimálně do $\frac{3}{4}$ výšky testované součástky. Toto nastavení je důležité, aby stříhová hlava tlačila do co největší boční plochy součástky, ale přitom nesmí být příliš nízká, aby nejela po desce. Před testováním se také nastavuje rychlost hlavy. Doporučený posuv je od 0,5 po 9 mm/min. Důležitý parametr je také správně upevněná deska. Deska se při testu nesmí posunout. Po nastavení stříhové hlavy před součástku se spustí test. Působící síla se zvyšuje, dokud nedojde k utržení součástky. Tato síla se po utrnutí součástky zaznamená. [13], [22]



Obr. 2.1 : Zarovnání střihové hlavy dle [14].



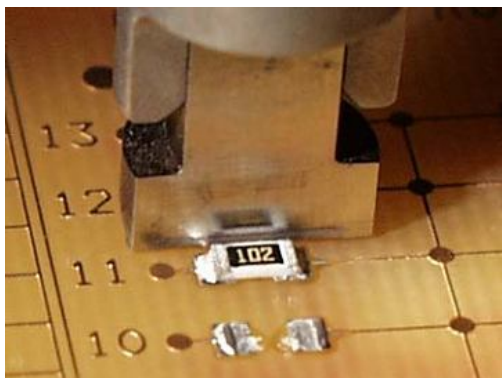
Obr. 2.2 : Nastavení výšky střihové hlavy dle [14].



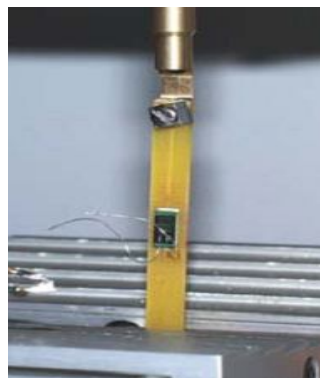
Obr. 2.3 : Místa utržení při testu stříhem dle [22].

2.2 Zkouška tahem

Při zkoušce tahem se na testovací vzorek působí silou, jež má určitý gradient nárůstu síly za čas (řádově v jednotkách N/s). Na obr. 2.5 je použit substrát FR4, na němž je připájen rezistor typu 2512. Deformace se měří pomocí tenzometrů, které jsou umístěny na horní straně rezistoru. [13]



Obr. 2.4 : Zkouška stříhem [13].



Obr. 2.5 : Zkouška tahem [13].

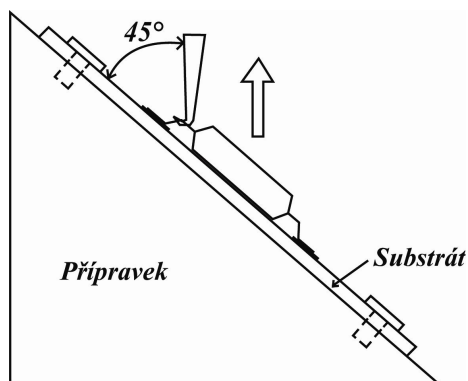
2.3 Zkouška odolnosti proti odtržení

Tato metoda je popsána normou ČSN EN 62137 – 1 – 1. Používá se pro součástky pro povrchovou montáž s vývody typu gull wing (racčího křídla). Slouží pro hodnocení pevnosti pájeného spoje na tah a je vhodná pro hodnocení pájeného spoje po teplotním cyklování.

Při testování se deska s testovanou součástkou umístí do přípravku, který zajistí, že tahová síla bude působit na desku se součástkou pod úhlem 45 °. Při použití teplotního cyklování je v normě doporučeno cyklování od -40 do +125 °C, kdy změna teploty od spodní hranice po horní trvá 30 min. Doporučený střední počet cyklování je 500 cyklů a maximální 1000 cyklů. Deska se po teplotním cyklování může testovat až po více jak 4 hodinách, kdy je umístěna ve standardních atmosférických podmínkách. Pro součástky typu SOIC, TSOP a QFP s roztečí vývodů 0,5 mm je doporučená rychlost tahu 0,5 mm/min. [23]

Tato metoda je destruktivní a můžou u ní nastat následující poruchy: [23]

- utržení nožičky od součástky,
- utržení mezi intermetalickou vrstvou,
- utržení celého pájeného spoje od kontaktní plošky,
- utržení celého pájeného spoje i s kontaktní ploškou.



Obr. 2.6 : Zkouška odolnosti proti odtržení dle [23].

2.4 Zkouška cyklickým padáním

Tato metoda je popsána normou ČSN EN 62137 – 1 – 3. Používá se pro hodnocení pevnosti pájených spojů u povrchově montovaných součástek. Je určena především pro větší součástky s více vývody. Používá se např.: u mobilních zařízení.

Testovaný vzorek se umístí do mechanismu, který opakovaně simuluje pád z dané výšky. Používají se výšky 1,5 a 0,75 m. Na povrch testované desky se umístí tenzometr, jenž měří tlak na povrchu. Dále se deska připojí k zařízení, sledující jestli nedošlo k elektrickému přerušení. Zařízení by mělo být schopné zaznamenat přerušení 100 μ s. Okamžité přerušení je bráno jako porucha. [24]

Příklady přerušení: [24]

- trhlina v pájce,
- přerušení povrchového pokovení,
- trhlina v prokoveném otvoru.

2.5 Zkouška cyklickým ohybem

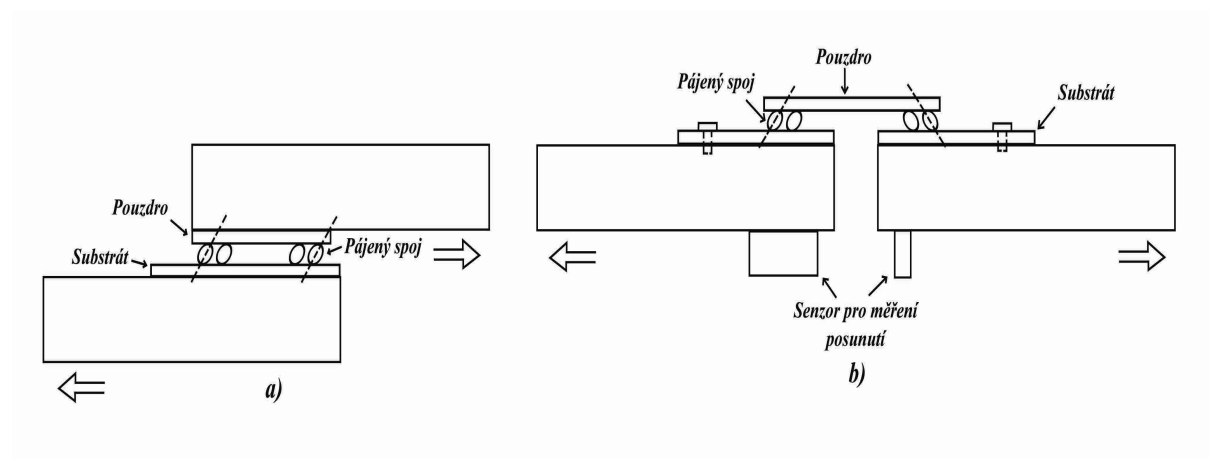
Tato metoda je popsána normou ČSN EN 62137 – 1 – 4. Používá se pro povrchově montované součástky typu QFP a BGA. Slouží pro hodnocení mechanické pevnosti pájených spojů. Dále se může použít např.: pro sledování mechanického namáhání tlačítek mobilních telefonů.

Testovaná deska se umístí do přípravku, který se skládá ze dvou krajních pohyblivých upínacích hrotů a jednoho hrotu, který tlačí na střed desky a způsobuje ohyb. Dále se připojí vodiče pro sledování elektrického odporu a vodiče pro sledování okamžitého elektrického přerušení. Rychlost prohýbání se volí 0,5 mm/s. Maximální průhyb se stanoví provedením předběžné zkoušky. Nicméně se volí přibližně 1 až 4 mm. Při testu se provádí několik tisíc cyklů. Zařízení měřící elektrické přerušení by mělo být schopné zaznamenat přerušení dlouhé přibližně 10 až 100 μ s. Záznamové zařízení zaznamenává počet cyklů, posuv a sílu. [25]

2.6 Mechanická únavová zkouška smykem

Tato metoda je popsána normou ČSN EN 62137 – 1 – 5. Používá se pro povrchově montované součástky typu BGA. Provádí se mechanickým nebo teplotním cyklováním. Pomocí mechanického cyklování se hodnotí spolehlivost pájeného spoje.

Testovaná deska se umístí do přípravku. Nastaví se rozsah a rychlost posunutí. Rozsah posunutí se nastavuje v rozmezí $\pm 0,001$ až $\pm 0,1$ mm a rychlost posunutí v rozmezí 0,001 až 0,01 mm/s. Test se přeruší při poklesu síly např.: o 20 %, nebo při elektrickém přerušení. Po přerušení testu se zaznamená počet cyklů. Tato norma popisuje tři možné způsoby testování. První způsob popisuje testování jednoho pájeného spoje. Další dvě metody jsou znázorněny na obr. 2.7. [26]



Obr. 2.7 : Mechanická únavová zkouška smykem dle [26].

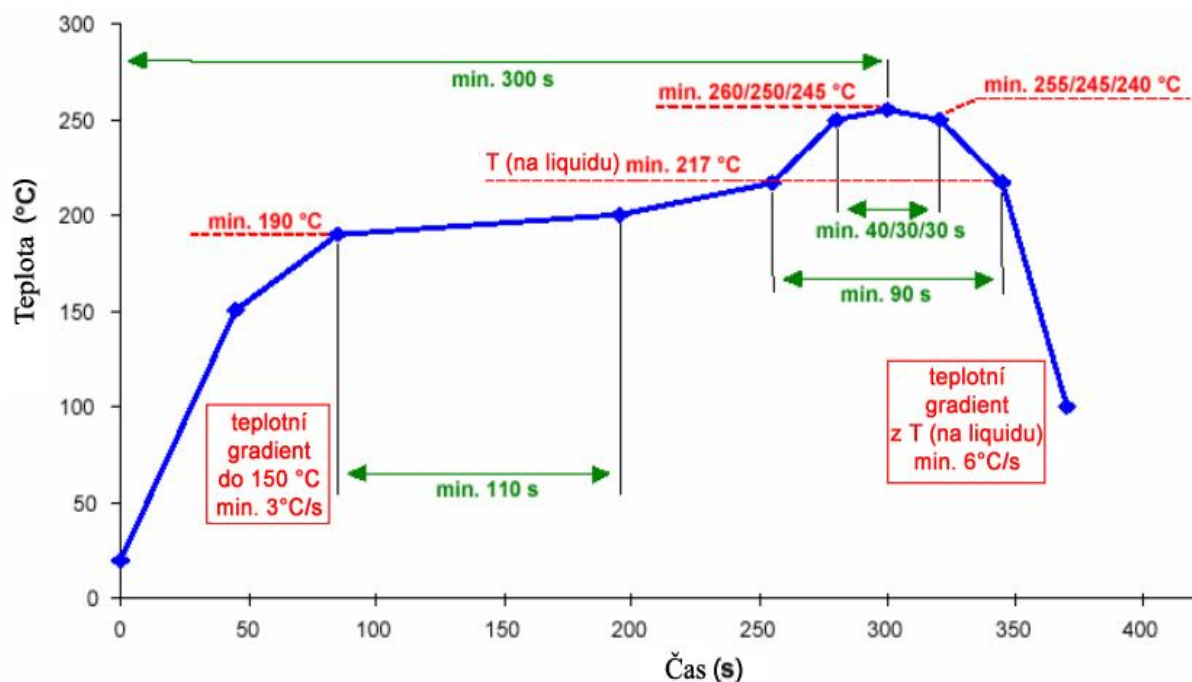
Dále existuje mnoho různých mechanických testů, pomocí kterých lze testovat pájené spoje. Testování můžeme provádět dále např.: pomocí vibrací a tří bodovým nebo čtyř bodovým ohybovým testem. Testování pájeného spoje pomocí vibrací patří mezi nejrozšířenější mechanické zkoušky. Používá se především v automobilovém a leteckém průmyslu. [13]

3 Pájení přetavením

Pájení přetavením je způsob pájení, při němž dochází k přetavení pájecí pasty nanesené na kontaktních ploškách. Nanášení pájecí pasty se provádí šablonovým tiskem, sítotiskem nebo dispenzerem, při kterém je pájecí pasta nanesena na příslušné kontaktní plošky. Pro osazení součástek se používají různé osazovací automaty, které musí součástku uchopit, vystředit a umístit na požadované místo. Osazovací automat odebírá součástky z různých druhů zásobníků. Zásobníky mohou být páskové (kotoučové), vibrační, tyčové, ploché atd. Pájecí pasta má navíc funkci lepidla, jež slouží k přidržení součástek do okamžiku, než dojde k přetavení pájecí pasty. Přetavení pájecí pasty se provádí různými metodami popsány níže. Pájecí pasta se přetavuje teplotou o několik desítek stupňů vyšší, než je bod tání pájky, z důvodu rozšíření procesního okna. Při pájení přetavením se musí dodržovat optimální podélný teplotní profil, protože ovlivňuje spolehlivost a životnost pájeného spoje. [7], [11]

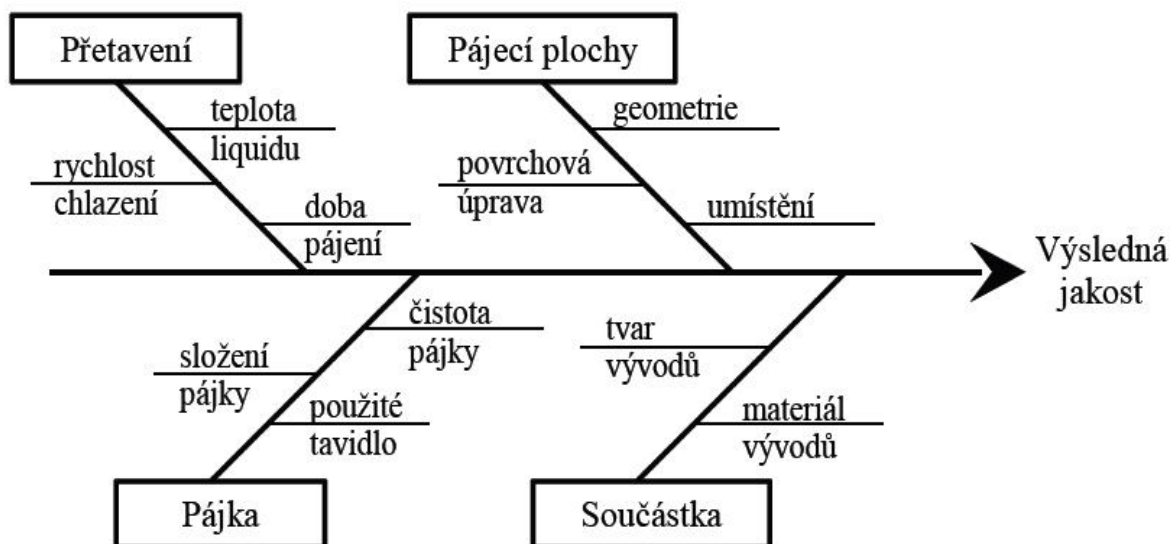
V podélném teplotním profilu jsou důležité 4 základní oblasti: [1]

1. přehřev,
2. vyrovnání teploty (aktivace tavidla),
3. přetavení,
4. chlazení.



Obr. 3.1 : Teplotní profil pro pájení přetavením dle [11].

Nejdůležitější technologické faktory působící při pájení přetavením na jakost a životnost pájeného spoje jsou znázorněny v Ishikawově diagramu na obr.3.2.



Obr. 3.2 : Ishikawův diagram pro proces pájení přetavením [15].

Při pájení přetavením můžeme použít různé druhy pájecích zařízení podle druhu přenosu tepla: [1]

- vedením (kondukcí),
- prouděním (konvekcí),
- zářením (radiací).

Pájení přetavením má vůči pájení vlnou následující výhody: [1]

- pájka a tavidlo se nanášejí pouze na definovaná místa,
 - úspora pájky a tavidla,
 - pájka a tavidlo se nanášejí v přesně definovaném poměru,
 - omezení nečistot,
- pájení probíhá bez teplotních rázů,
- vyšší hustota montáže,
- oboustranná montáž SMD.

Metody pájení přetavením: [7]

- konvekční pájení (horkým vzduchem nebo plynem),
- kondenzační pájení (pájení v kondenzovaných parách),
- pájení infračerveným zářením,
- pájení laserem,
- pájení vyhřívaným nástrojem (impulsní),
- pájení na horké desce nebo pásu.

V současné době je nejrozšířenější metodou konvekční pájení. Substrát s osazenými součástkami v pájecí pastě je přetaven horkým vzduchem nebo plynem. Tento způsob přetavení se osvědčil při pájení různě velkých součástek umístěných na substrátu. Do budoucna by se mohlo rozšířit pájení v kondenzovaných parách, kde hlavní výhodou je přesně

definovaná teplota, nebo také pájení laserem (především pro součástky Fine Pitch a malé rozměry vývodů). [1], [7]

Konvekční pájení může probíhat jak s přirozenou nebo také s rozšířenější nucenou konvekcí. Konvekční pece jsou obvykle rozděleny na 3 až 4 oddělené zóny. Horký vzduch nebo plyn proudí z trysek umístěných pod nebo i nad procházejícím substrátem. Trysky jsou konstruovány jako „dvojité“, kde horký vzduch je vháněn vnitřními tryskami do prostoru pece a současně je štěrbinami kolem nich odsáván. Tím je tak zabráněno příčnému proudění a ovlivňování jednotlivých zón. Optimální podélný teplotní profil se nastavuje buď pomocí změny rychlosti dopravníku, nebo změnou teploty v jednotlivých zónách.

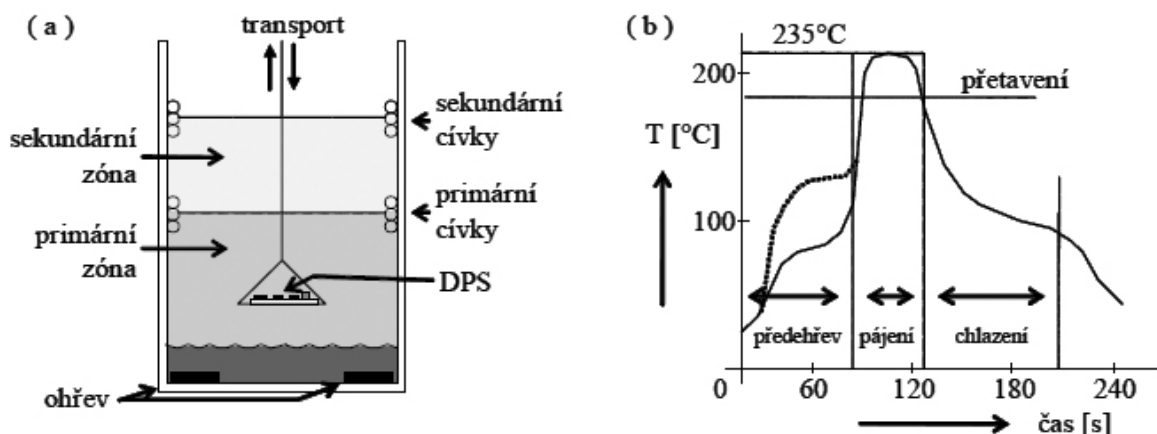
Výhody: Vyhovují pájení vícevrstvých DPS s vyšší zástavbovou hustotou, jednodušší nastavení teplotního profilu, malý příčný teplotní gradient ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Nevýhody: Na vzduchu více oxiduje. To se dá vyřešit ochrannou atmosférou, což je ale spojeno s vyššími náklady. Dále má menší účinnost (20 až 30 %) a větší energetickou spotřebu. [1], [7]



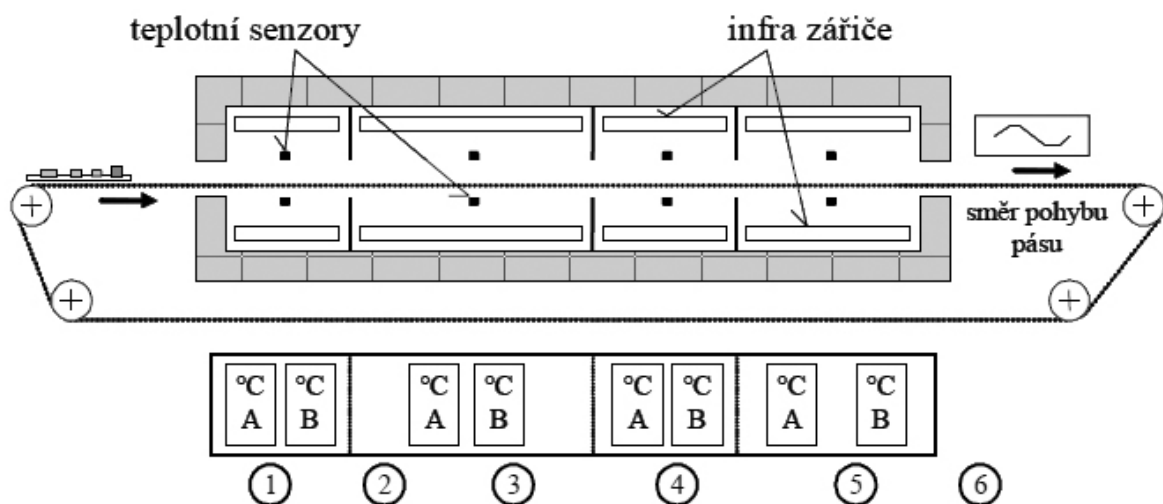
Obr. 3.3 : Konvekční pec ERSA a detail trysek [11].

Kondenzační pájení (tzv. pájení v parách) probíhá v uzavřené nádobě obsahující inertní kapalinu s přesně definovaným bodem varu. To zaručuje konstantní teplotu v celém prostoru. Nasycené páry inertní kapaliny neobsahují kyslík, proto nedochází k oxidaci pájených spojů. Kondenzační pece se skládají z nádoby, která má vyhřívané dno, inertní kapaliny a vertikálně pohyblivého roštu na kterém je umístěn substrát. Substrát se součástkami je umístěn nad kapalinou v kondenzovaných parách. Nasycené horké páry jim předávají teplotu (kondenzují na nich), dokud nedosáhnou teploty par. Po přetavení pájecí pasty je spuštěno chlazení a pára se změní na kapalinu. Pece mohou být konstruovány jako vsázkové nebo v provedení in-line. Hlavní výhody pájení v parách je přesně definovaný bod varu kapaliny, který určuje mezní hodnotu teploty přetavení. Nevýhodou pájení v parách je delší pájecí proces a vysoká cena kapaliny. Pro různé teplotní profily musí být odlišná kapalina. [1], [7]



Obr. 3.4 : Kondenzační pájení, a) princip pájení přetavením kondenzací par, b) teplotní profil při pájení v parách dle [11].

Pájení infračerveným zářením probíhá v pecích, které obsahují infra zářiče umístěné pod i nad procházející deskou umístěnou na pohyblivém pásu. Zářiče jsou umístěny v jednotlivých sekcích, jež zajišťují požadovaný teplotní profil. Nevýhodou infraohřevu je nehomogenita ohřevu, kdy tmavší součástky absorbují teplo lépe než pájené spoje. Na substrátu dochází k teplotním rozdílům, které mohou ovlivnit jakost pájeného spoje. Teplotní rozdíly jsou také způsobovány různými velikostmi součástek. Výhodou je vysoká účinnost (60 až 70 %). Pro svoji relativní jednoduchost a snadnou obsluhu se u některých zařízení kombinují s ohřevem nucenou konvekcí. [1], [7]



Obr. 3.5 : Přetavovací pec s infračerveným ohřevem [11].

Pájení laserem se provádí řízeným laserovým paprskem, který je přes optický systém směřován na požadované místo pod úhlem 30 % od kolmice na substrát. Jako zdroje paprsku se užívá YAG laseru vhodného pro pájení vývodů součástek Fine Pitch. Pájení laserem se používá pro selektivní pájení součástek s malými roztečemi vývodů. Výhodou je minimální teplotní ovlivňování sousedních součástek. Nevýhodou je nízká produktivita a vysoká cena. [1], [7]

Pájení vyhříváním nástrojem se používá zejména při opravách. Používá se pro pájení pouzder s páskovými vývody (QFP, SOIC). Nástroj je přizpůsoben tvaru součástky a je vyhříván krátkými proudovými impulsy. Po roztavení pájky je součástka přidržena buď vakuovou pipetou nebo povrchovým napětím k vyhřívávanému nástroji. Nevýhodou této metody je malá produktivita. [1], [7]

Pájení na horké desce nebo pásu je rozšířené pro opravy v laboratorním prostředí. Používá se zejména pro keramické substráty, protože mají dobrou tepelnou vodivost. Výhodou je rovnoměrné rozložení teploty na substrátu, jednoduchá obsluha a optická kontrola během přetavení pájky. [7]

3.1 Ochranná atmosféra

Ochranná atmosféra zamezuje přístupu kyslíku, který způsobuje oxidaci kovových povrchů. Jako ochranný plyn můžeme použít např.: dusík (N_2) nebo argon (Ar). Častěji se používá dusík, protože je levnější a nehoří. Dusík je bezbarvý plyn bez zápachu s malou reaktivitou. Použití ochranné dusíkové atmosféry je dále výhodné v tom, že obsahuje velmi malé množství vodních par, proto také dobře vysušuje. Pro zajištění co nejmenší oxidace pájeného spoje je potřeba redukovat obsah kyslíku na minimum. Při nízkém obsahu kyslíku můžeme také snížit objem tavidla, což je hlavní důvod při použití ochranné atmosféry. Pozorovatelné zlepšení u pájení přetavením je již od hladiny kyslíku 1000 ppm.

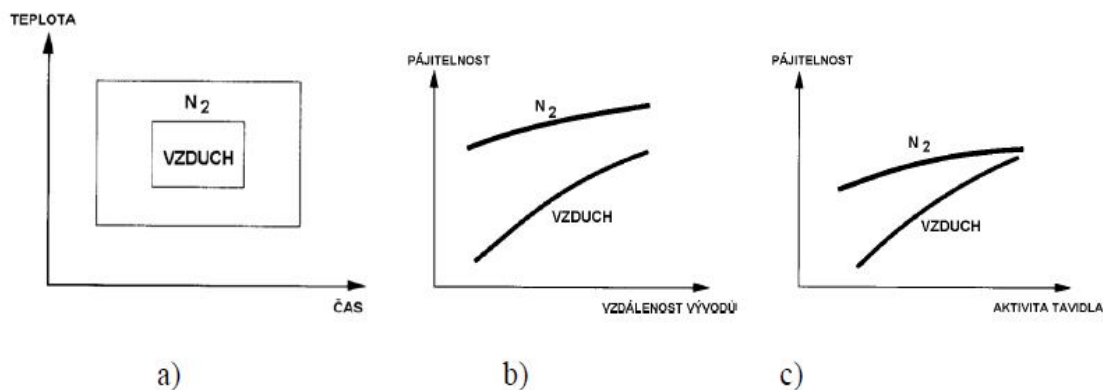
Hlavní výhody použití ochranné atmosféry: [15]

- omezení množství tavidla (ochrana životního prostředí),
- lepší smáčivost,
- vzhlednost pájeného spoje,
- lze pájet na nepocínované povrchy.

Nevýhodou použití ochranné atmosféry při pájení přetavením jsou provozní a pořizovací náklady. [5], [15]

Přednosti dusíkové ochranné atmosféry: [1]

- širší technologické okno (obr.3.6 a),
- lepší pájitelnost při menší vzdálenosti vývodů (obr.3.6 b),
- lepší smáčivost při menší aktivitě tavidla než u vzduchu (obr.3.6 c).

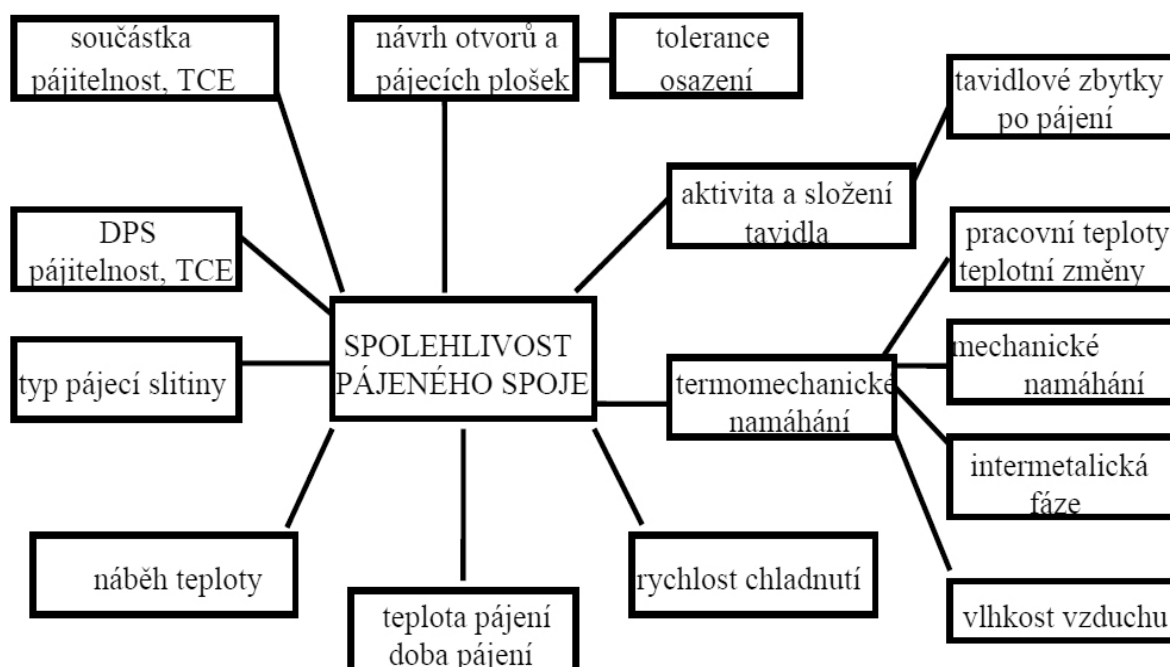


Obr. 3.6 : Srovnání dusíkové atmosféry se vzduchem [1].

4 Spolehlivost pájeného spoje

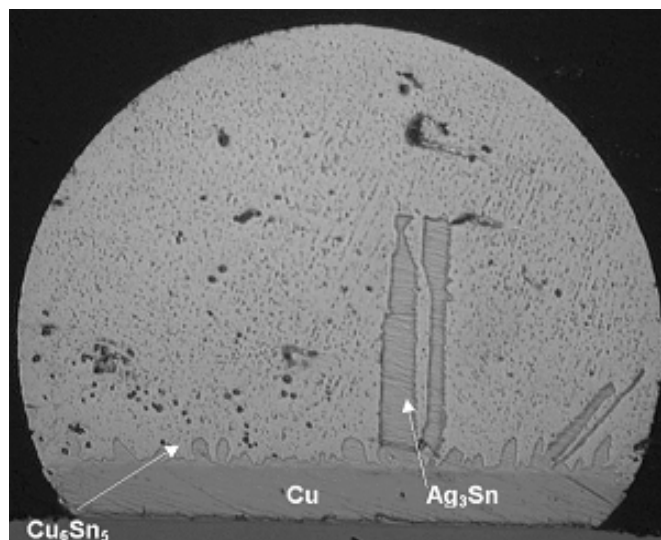
Spolehlivost je obecná vlastnost objektu spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce za daných technických podmínek po daný čas. [16]

Spolehlivost pájeného spoje je nejvíce závislá na pájce (75 %), dále na kontaktní ploše na substrátu (20 %) a nejméně závislá na vývodu součástky (5 %). Značně ji ovlivňuje intermetalická vrstva, která vzniká při nesprávném chlazení po přetavení a roste se stárnutím spoje, což ještě může být urychleno působením zvýšených teplot. Rostoucí intermetalická vrstva zhoršuje mechanické a elektrické vlastnosti pájeného spoje až do okamžiku, kdy pájený spoj přestane plnit svoji funkci. Spolehlivost pájeného spoje závisí na mnoha faktorech, které jsou znázorněny na obr.4.1. [7]



Obr. 4.1 : Faktory ovlivňující spolehlivost pájeného spoje [1].

Velký obsah stříbra v SAC pájkách může způsobovat problémy ve spolehlivosti v důsledku vzniku struktury Ag_3Sn , která rychle vzniká v průběhu kapalně fáze v přetavovacím teplotním profilu, před konečným tuhnutím pájeného spoje. Tato struktura se může rozrůst po celém průřezu pájeného spoje a může výrazně ovlivnit mechanické vlastnosti tohoto spoje, je-li vystaven termomechanickému namáhání. Studie prokázaly, že u SAC pájek s nízkým obsahem stříbra nevzniká struktura Ag_3Sn a tím může tato pájka představovat menší problémy při řešení spolehlivosti. Znázornění struktury Ag_3Sn je na obr. 4.2. [17]



Obr. 4.2 : Znázornění struktury Ag_3Sn [17].

4.1 Jakost pájeného spoje

V současné době je jakost povýšena nad spolehlivost. Jakost neboli kvalita je pro různé výroby odlišná (hračky, spotřební elektronika, vojenství, lékařství atd.). S rostoucí jakostí roste i cena. Spolupráce s jakostí má vliv na výslednou ekonomiku.

Jakost pájených spojů se posuzuje z různých hledisek. Tvar pájeného spoje je posuzován z optického a z funkčního hlediska, kde je rozhodující spolehlivost a životnost pájeného spoje.

Výsledná jakost je ovlivněna řadou faktorů, z nichž mezi ty nejzákladnější patří: [15]

- stárnutí materiálu,
- mechanické namáhání,
- teplotní namáhání.

Stárnutí materiálu

Na stárnutí materiálu má vliv okolní prostředí a chemické změny probíhající ve spoji. Zásadním způsobem je ovlivňováno tvorbou difúzní vrstvy, která na jedné straně potvrzuje vytvoření pájeného spoje, ale na straně druhé působí negativně, ať už zvyšováním odporu spoje, nebo mechanickým narušením. Tato difúzní vrstva je tvořena intermetalickými slitinami mezi mědí a cínem, která se s rostoucím časem rozšiřuje a růst je navíc urychlován působením zvýšených teplot.

Tloušťka difúzní vrstvy se pohybuje řádově v jednotkách mikrometrů, ale s rostoucím časem a zvýšeným tepelným namáháním může narůst až na desítky mikrometrů. Pájený spoj potom ztrácí své mechanické a elektrické vlastnosti, což může vést k nefunkčnosti pájeného spoje. [15]

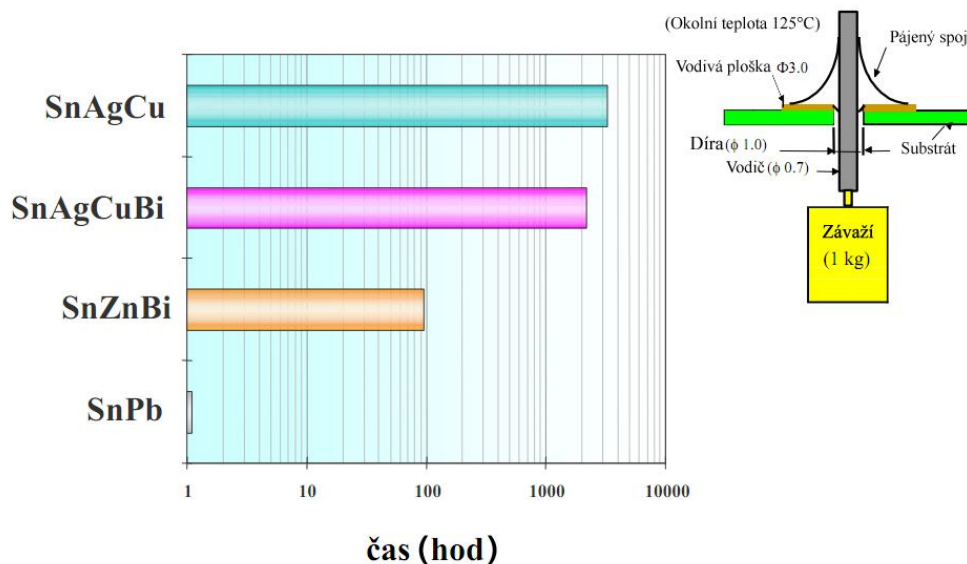
Mechanické namáhání

Rozlišujeme ho na dva typy: [15]

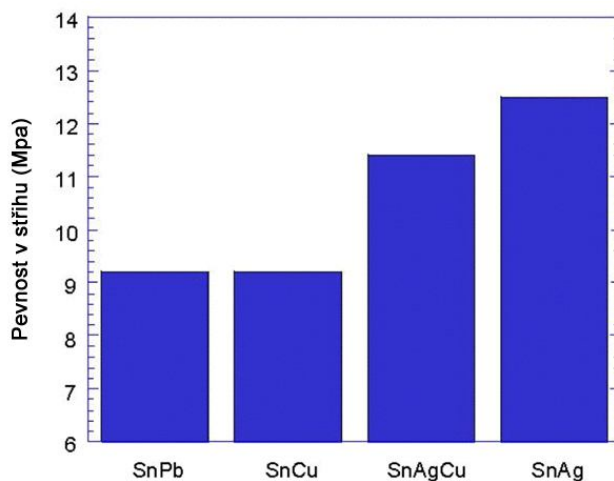
- externí (působením vnějších sil, např. vibrace, tlak),
- interní (rozdílná teplotní délková roztažnost spojovaných materiálů, součástka – spoj – substrát).

Pnutí vyvolané rozdílnou teplotní délkovou roztažností způsobuje únavu materiálu, což se projevuje zhoršením mechanických a elektrických vlastností a následným vznikem prasklin, trhlin apod. [15]

Na obr. 4.3 je srovnání pevnosti v tahu pro různé slitiny pájek, kde je vidět velmi výrazný rozdíl pevnosti v tahu mezi pájkou SAC a SnPb.



Obr. 4.3 : Srovnání pevnosti v tahu pro různé slitiny pájek dle [18].



Obr. 4.4 : Porovnání pevnosti v střihu dle [19].

Tab. 4.1 : Hodnoty pevnosti v tahu a protažení udávané výrobcem NIHON SUPERIOR dle [20].

	Sn100C	Sn95,2Ag3,8Cu1,0	Sn63Pb37	
Pevnost v tahu (MPa)	32	52	44	testováno zkouškou tahem 10 mm/min (25 °C)
Prodloužení (%)	48	27	25	

Tepelné namáhání

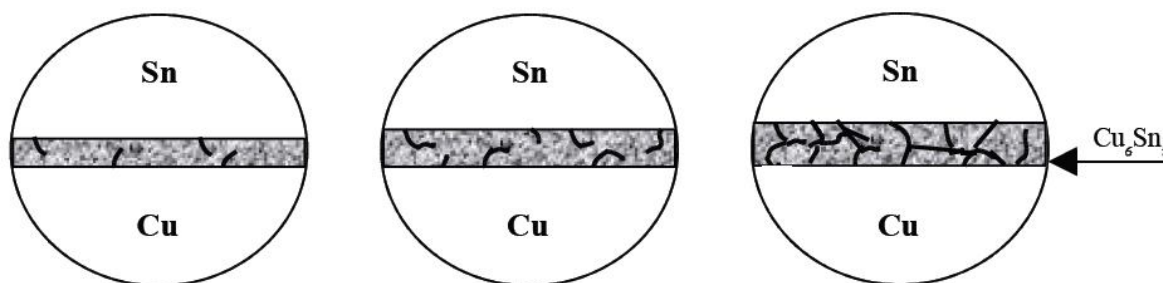
Tepelné namáhání je způsobeno působením tepla na pájený spoj. Může být vyvoláno okolím (umístěním obvodu v blízkosti zařízení vyzařujícího tepelné záření např. v automobilech nebo topných spotřebičích), nebo vzniká uvnitř obvodu důsledkem ztrátového výkonu (ztrátový výkon na danou plochu roste vlivem stále větší integrace). Působením tepla vznikají buď jevy nevratné (stárnutí materiálu v důsledku změny struktury, difúze apod.), nebo vratné (mechanické změny rozměrů, průhyby materiálu apod.). [15]

4.2 Životnost pájeného spoje

Životnost je obecně definována jako doba, za kterou se předmět opotřebuje natolik, že nemůže plnit svoji funkci. U většiny výrobků se provádí tzv. zrychlené zkoušky, protože jejich životnost se pohybuje v rozsahu několika let. Zrychlené zkoušky se provádí testováním výrobku při zvýšených teplotách, nebo v režimu střídání záporných a kladných teplot a navíc mohou být doprovázeny zvýšenou relativní vlhkostí. Tyto zkoušky urychlují stárnutí a degradaci pájených spojů, ke kterým by docházelo za běžného provozu. Degradaci způsobují fyzikální procesy difúze a elektrochemický proces koroze.

Difúze způsobuje nárůst intermetalických slitin, které způsobují zhoršení elektrických vlastností, především vodivosti a vedou k degradaci a následné nefunkčnosti spoje. Elektrochemická koroze narušuje homogenitu materiálu, zhoršuje adhezi a vede k destrukci pájeného spoje. Životnost pájeného spoje se testuje pomocí teplotního cyklování (od -50 do $+150$ °C) po určitou dobu (1000 h), nebo po určitý počet cyklů (10000). Navíc mohou být prováděny za zvýšené relativní vlhkosti (95 %). Uvedené hodnoty se mohou pro různé testy lišit. K testování mechanického namáhání se dají použít vibrace, což se uplatňuje např. v automobilovém průmyslu. Pomocí statických metod se vyhodnocuje vodivost spojů, jejich vzhled a mechanická pevnost, např. po každých 250 hodinách.

Pozitivním důsledkem difúzního jevu je zajištění pájitelnosti a zvláště smáčivosti, což vede k vytvoření pájeného spoje. Negativním důsledkem je, že zpřičňuje růst intermetalické vrstvy nejvíce struktury Cu_6Sn_5 . Tato vrstva tvoří bariéru mezi čistým cínem a kovem kontaktní plošky. Difúzní vrstva narůstá především do cínu a tím dochází k úbytku pájeného spoje. Účinky stárnutí a namáhání způsobují růst intermetalické vrstvy a trhlin, které mohou způsobit až nefunkčnost pájeného spoje. [15]



Obr. 4.5 : Vývoj růstu intermetalické vrstvy a prasklin [15].

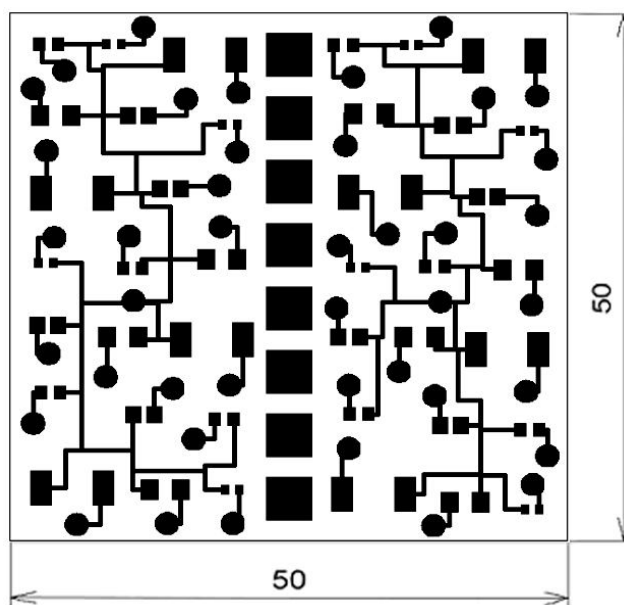
5 Praktická část

5.1 Návrh a výroba testovacích desek

Cílem praktické části bylo otestovat na vytvořeném testovacím motivu pevnost pájených spojů na střih pro různé typy pájecích past zapájených při různých koncentracích kyslíku. Testování bylo prováděno na keramickém substrátu. Desky byly pájeny v ochranné dusíkové atmosféře s různou koncentrací kyslíku. Při testování byly navíc zaznamenávány typy utržení, ke kterým docházelo v průběhu testování. Jako výsledek vlivů, jež se projevují na mechanické pevnosti pájených spojů na střih byl vytvořen Ishikawův diagram.

Testovací motiv byl navržen pro testování pájeného spoje pomocí zkoušky střihem a pro testování elektrických vlastností. Motiv byl vytvořen v programu EAGLE 5.11.0. Na jedné desce je pět druhů rezistorů typu 2512, 1206, 0805, 0603 a 0402. Dále jsou zde plošky pro testování smáčivosti o rozměrech 4 x 4 mm.

Plošky jednotlivých součástek jsou od sebe vzdáleny přibližně 5 mm. Tato vzdálenost je zvolena z důvodu, aby se mezi ně vešla střihová hlava. Součástky jsou rovnoměrně rozmístěny po celé desce, aby nedocházelo k nerovnoměrnému rozložení teploty. Navržený testovací motiv je na obr. 5.1.



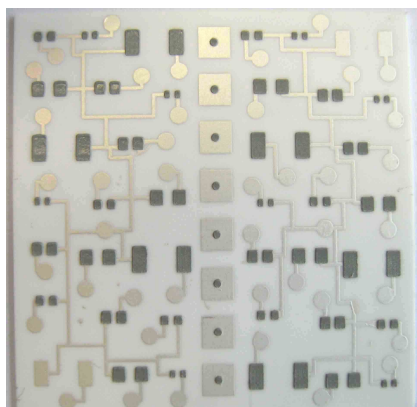
Obr. 5.1 : Testovací motiv.

Při výrobě testovacích desek byl nejprve vytvořen motiv na síti. Poté byl pomocí síťotiskového poloautomatu natisknut vodivý motiv na očištěnou keramickou destičku. Před natisknutím byl správně nastaven odtrh, tlak těrky a sesouhlasení motivu s keramikou. Po natisknutí byly testovací desky zasušeny a vypáleny.

Tab. 5.1 : Parametry testovacích desek.

Parametr	Hodnota
Základní materiál	Keramika
Tloušťka základního materiálu	0,635 mm
Rozměr základního materiálu	5 x 5 cm
Typ vodivé pasty	CSP - 1381
Tloušťka mokré vrstvy	32 μm
Tloušťka zasušené vrstvy	21 μm
Tloušťka vypálené vrstvy	20 μm

Tisk pájecích past byl proveden přes kovovou šablonu. Desky byly před natisknutím pájecí pasty očištěny isopropylalkoholem. Na obr. 5.2 je deska s natisknutou pájecí pastou. Po natisknutí pájecích past byly desky osazeny součástkami na SMT manipulátoru.



Obr. 5.2 : Natisknutá pájecí pasta.

Testované desky byly pájené v exsikátoru. Exsikátor se skládal z ohřevné desky, větráků, chlazení, termočlánků, přívodu dusíku a ventilu k odsávání vzduchu. Desky byly pájeny při různých koncentracích. Nejmenší dosažená koncentrace v exsikátoru byla 3 ppm. Menší hodnoty není možné dosáhnout, protože v tlakové dusíkové lahvi je koncentrace 3 ppm.

Teplotní profily jednotlivých pájecích past byly vytvořeny podle doporučených profilů od výrobců.

Tab. 5.2 : Použité pájecí pasty.

Typ	Výrobce	Složení
SAC - XF3	Cobar	Sn99,3Cu0,7Ni+Ge
LFM - 48W TM - HP(L)	Almit	Sn96,5Ag3Cu0,5
R256	Kester	Sn62Pb36Ag2
M40 - LS720 - PX - TYPE 4	Senju	Sn98,3Ag1Cu0,7Bi,In

5.2 Testování pájených spojů

Měření mechanické pevnosti na střih bylo provedeno na zařízení DAGE PC2400, které je zobrazeno na obr. 5.3. Pro odlišné typy součástek byly nastavovány různé parametry.

Pro součástky typu 2512 byly nastaveny tyto parametry:

- Rychlost hrotu při testování výšky od desky: 325 $\mu\text{m/s}$
- Výška hrotu od substrátu při testu: 250 μm
- Rychlost posuvu testovacího hrotu: 10 $\mu\text{m/s}$
- Vzdálenost kterou ujede hrot po utrnutí součástky: 500 μm
- Rozsah zatížení: 25 kg
- Procentní pokles z hodnoty rozsahu, kdy se test ukončí: 15 %
- Destruktivní test

Pro součástky typu 1206 byly upraveny:

- Rychlost posuvu testovacího hrotu: 50 $\mu\text{m/s}$
- Výška hrotu od substrátu při testu: 100 μm
- Rozsah zatížení: 15 kg

Pro součástky typu 0805 a 0603 byly upraveny:

- Rychlost posuvu testovacího hrotu: 50 $\mu\text{m/s}$
- Výška hrotu od substrátu při testu: 100 μm
- Rozsah zatížení: 10 kg

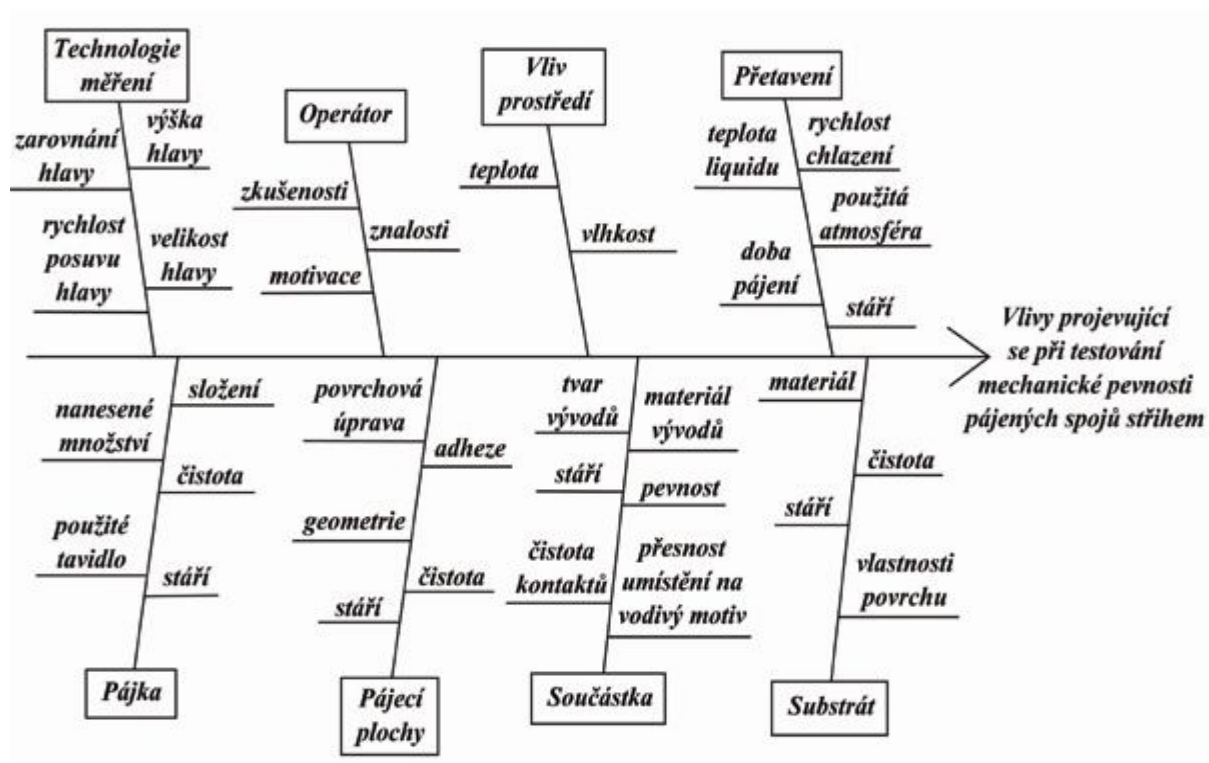
Pro součástky typu 0402 byly upraveny:

- Výška hrotu od substrátu při testu: 50 μm
- Procentní pokles z hodnoty rozsahu, kdy se test ukončí: 10%
- Rychlost posuvu testovacího hrotu: 50 $\mu\text{m/s}$
- Rozsah zatížení: 10 kg



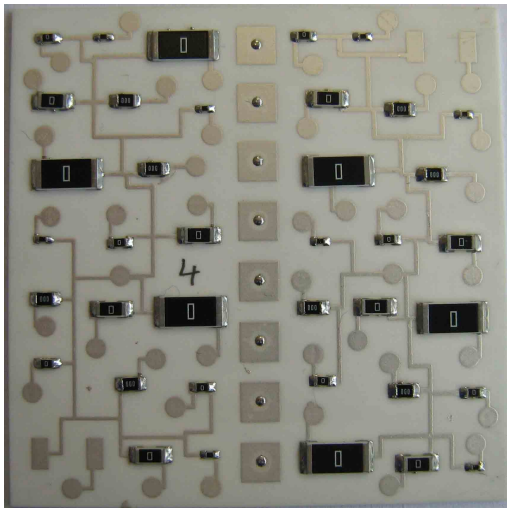
Obr. 5.3 : Zařízení DAGE PC2400.

Na výslednou mechanickou pevnost pájeného spoje na stříh má vliv mnoho faktorů. Pro zjištění nejdůležitějších faktorů byl navržen a vypracován Ishikawův diagram vlivů projevujících se při testování mechanické pevnosti pájených spojů stříhem, který je znázorněn na obr. 5.4.

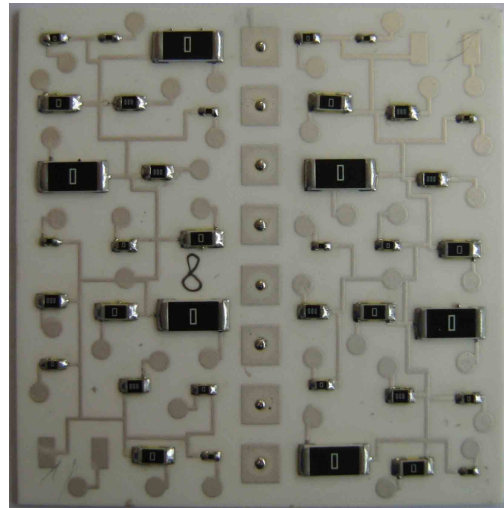


Obr. 5.4 : Ishikawův diagram pevnosti pájených spojů na stříh

Na obr. 5.5 je osazená a zapájená deska s použitou pájecí pastou Sn62Pb36Ag2 pro koncentraci kyslíku 5000 ppm. Pro srovnání je na obr. 5.6 deska se stejnou pastou, ale zapájená při koncentraci kyslíku menší než 10 ppm. Na ploškách pro testování smáčivosti je na druhém obrázku vidět více roztečené tavidlo.

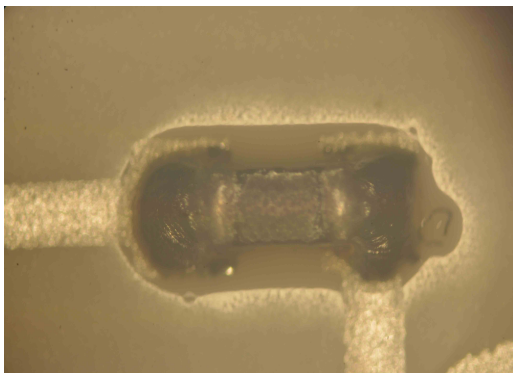


Obr. 5.5 : Zapájená testovací deska, pasta Sn62Pb36Ag2, $O_2 = 5000$ ppm.

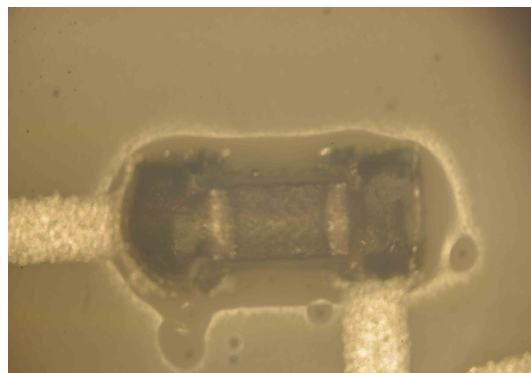


Obr. 5.6 : Zapájená testovací deska, pasta Sn62Pb36Ag2, $O_2 < 10$ ppm.

Na obr. 5.7 a 5.8 je detailní pohled na zapájený rezistor typu 0402. Oba jsou zapájeny na vzduchu. Na prvním je použita pasta Sn62Pb36Ag2 a na druhém SAC305. Při použití olovnaté pasty lze pozorovat vzhlednější pájený spoj oproti pastě SAC305.

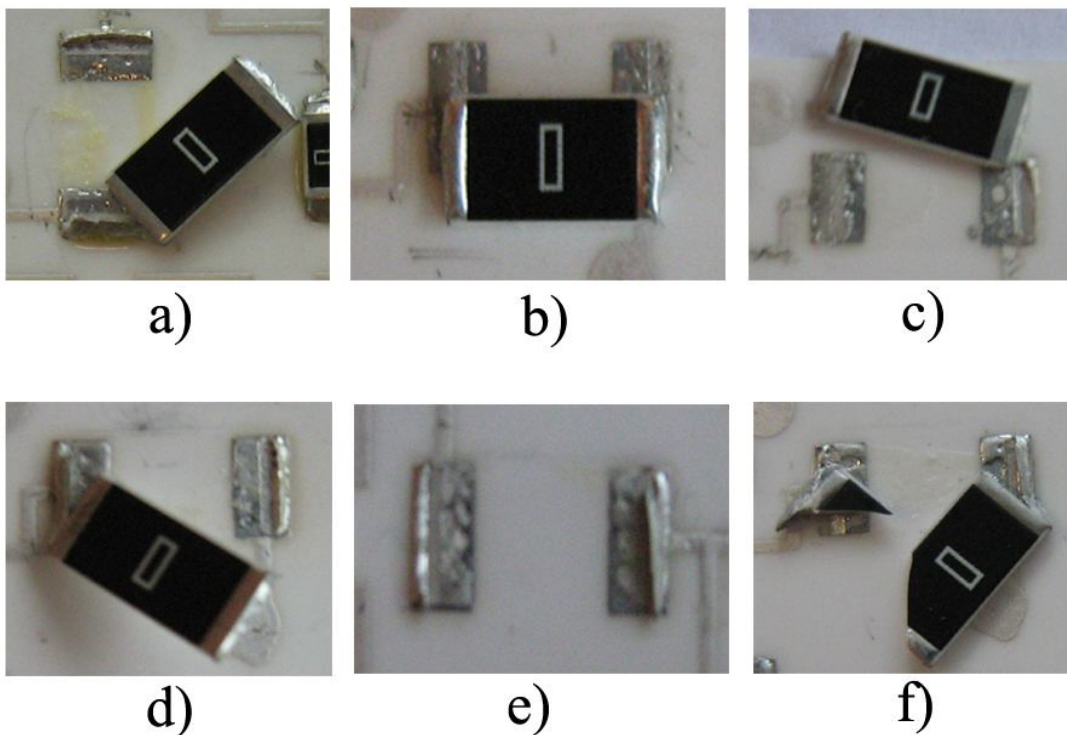


Obr. 5.7 : Detailní pohled na zapájený rezistor typu 0402, pájeno na vzduchu, pasta Sn62Pb36Ag2.



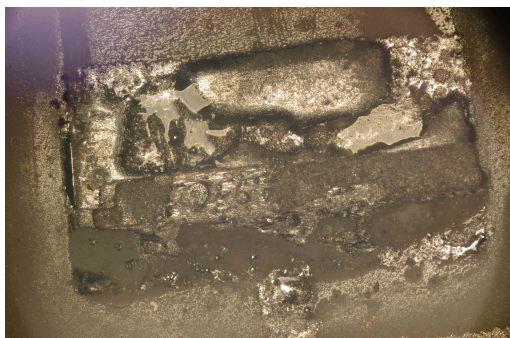
Obr. 5.8 : Detailní pohled na zapájený rezistor typu 0402, pájeno na vzduchu, pasta SAC305.

Na obr. 5.9 jsou různé případy utržení pájeného spoje a součástky. Na obrázku a) je vidět pod součástkou tavidlo. Toto tavidlo bylo velice lepkavé a dobře viditelné pouze při použití pájecí pasty R256 a M40. U pasty M40 nebylo tavidlo žluté jako u olovnaté pasty, ale průhledné. Na obrázku c) je možné pozorovat utržený celý pájený spoj od vodivého motivu. Na obrázcích b), d) a e) jsou znázorněny možné způsoby jak vypadal pájený spoj po utržení součástky. Na obrázku f) došlo při utržení pájeného spoje i k prasknutí součástky. Při této poruše se pokaždé utrhl větší nebo menší kus rohu součástky.

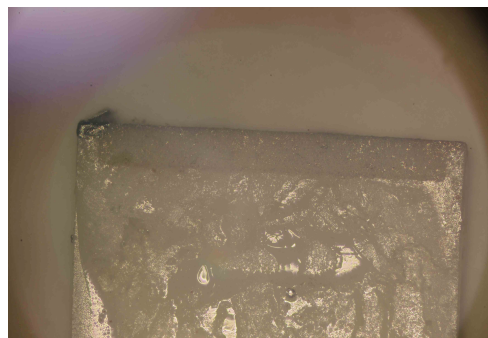


Obr. 5.9 : Pohled na některé otrhané součástky.

Na obr. 5.10 je zobrazen utržený celý pájený spoj. Zbytek přetavené pájecí pasty je pouze na zbytku vodivé plošky, která byla pod nevodivou částí součástky. Na obr. 5.11 je zobrazena součástka s utrženou kontaktní ploškou. V některých případech docházelo k utržení kontaktní plošky součástky a ne pájeného spoje.



Obr. 5.10 : Detailní pohled na utržený pájený spoj.



Obr. 5.11 : Detailní pohled na utrženou kontaktní plošku součástky.

5.3 Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů na střih

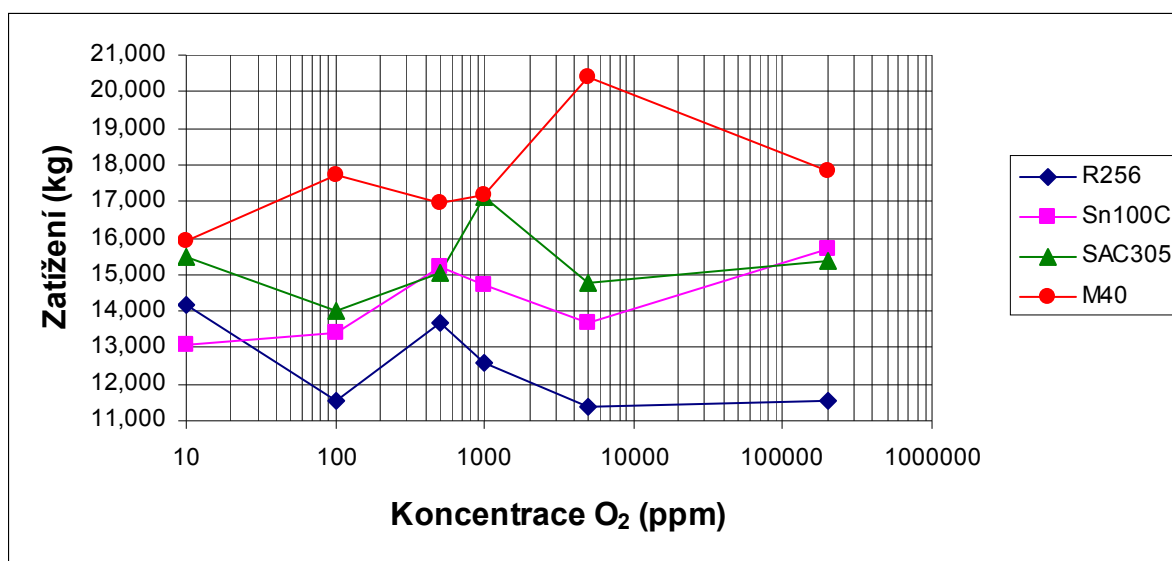
5.3.1 Velikost součástek 2512

Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 2512 jsou uvedeny v tab. 5.3, která je zkrácenou verzí tabulky A.1 uvedené v příloze. Z naměřených hodnot byl sestrojen graf, který je na obr. 5.12.

Tab. 5.3 : Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 2512.

Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	R256					
Průměr (kg)	11,533	11,376	12,602	13,677	11,56	14,151
Směrodatná odchylka (kg)	1,738	1,764	1,353	1,673	1,811	0,374
Pájka	Sn100C					
Průměr (kg)	15,723	13,692	14,74	15,188	13,394	13,067
Směrodatná odchylka (kg)	1,49	1,051	0,847	2,617	0,648	1,136
Pájka	SAC305					
Průměr (kg)	15,35	14,779	17,14	15,06	14,031	15,481
Směrodatná odchylka (kg)	0,784	1,086	1,585	1,204	1,331	0,469
Pájka	M40					
Průměr (kg)	17,852	20,423	17,198	16,96	17,698	15,927
Směrodatná odchylka (kg)	0,996	1,261	1,161	1,173	1,485	1,904

Z grafu naměřených hodnot pro typ součástky 2512 (obr. 5.12) lze pozorovat, že nejvyšší mechanickou pevnost má při všech koncentracích pasta M40. Nejvyšší hodnotu pevnosti má pro koncentraci kyslíku 5000 ppm. Pasta SAC305 má nejvyšší hodnotu pro koncentraci kyslíku 1000 ppm a pasta Sn100C má nejvyšší hodnotu na vzduchu. Nejmenší pevnost má olovnatá pasta R256. Při koncentraci kyslíku 10 ppm její pevnost narůstá a je vyšší než u pasty Sn100C.



Obr. 5.12 : Graf naměřených hodnot pevnosti pájených spojů na střih pro součástku typu 2512.

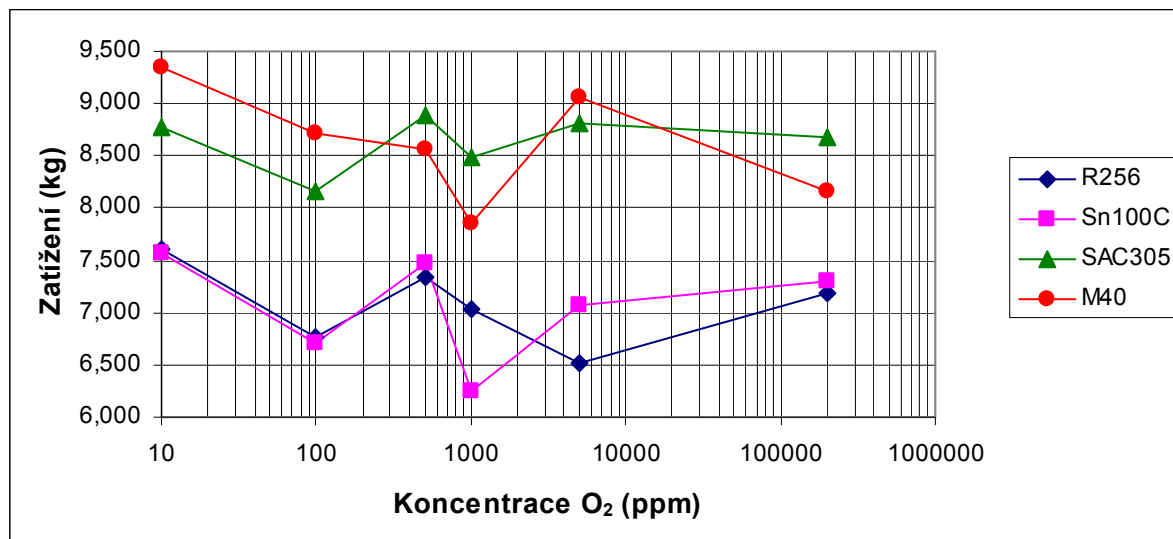
5.3.2 Velikost součástek 1206

Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 1206 jsou uvedeny v tab. 5.4, která je zkrácenou verzí tabulky A.2 uvedené v příloze. Z naměřených hodnot byl sestaven graf, který je na obr. 5.13.

Tab. 5.4 : Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 1206.

Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	R256					
Průměr (kg)	7,190	6,518	7,035	7,332	6,769	7,600
Směrodatná odchylka (kg)	0,901	0,283	0,582	0,467	0,717	0,554
Pájka	Sn100C					
Průměr (kg)	7,309	7,071	6,256	7,467	6,710	7,565
Směrodatná odchylka (kg)	1,149	0,910	0,952	1,352	1,094	1,040
Pájka	SAC305					
Průměr (kg)	8,676	8,810	8,485	8,896	8,160	8,770
Směrodatná odchylka (kg)	1,212	0,807	1,221	1,379	1,565	0,896
Pájka	M40					
Průměr (kg)	8,155	9,067	7,859	8,555	8,709	9,338
Směrodatná odchylka (kg)	1,212	1,393	1,295	0,594	1,152	0,938

Z grafu naměřených hodnot pro typ součástky 1206 (obr. 5.13) lze pozorovat, že pro tento typ součástky se mechanická pevnost pájecí pasty SAC305 téměř vyrovnává pastě M40. Nejvyšší pevnost má opět pasta M40, nyní ale při koncentraci 10 ppm. Pasta Sn100C je téměř vyrovnaná s olovnatou pastou R256. Nejmenší hodnotu zatížení má pro tento typ součástky pasta Sn100C při koncentraci kyslíku 1000 ppm.



Obr. 5.13 : Graf naměřených hodnot pevnosti pájených spojů na střih pro součástku typu 1206.

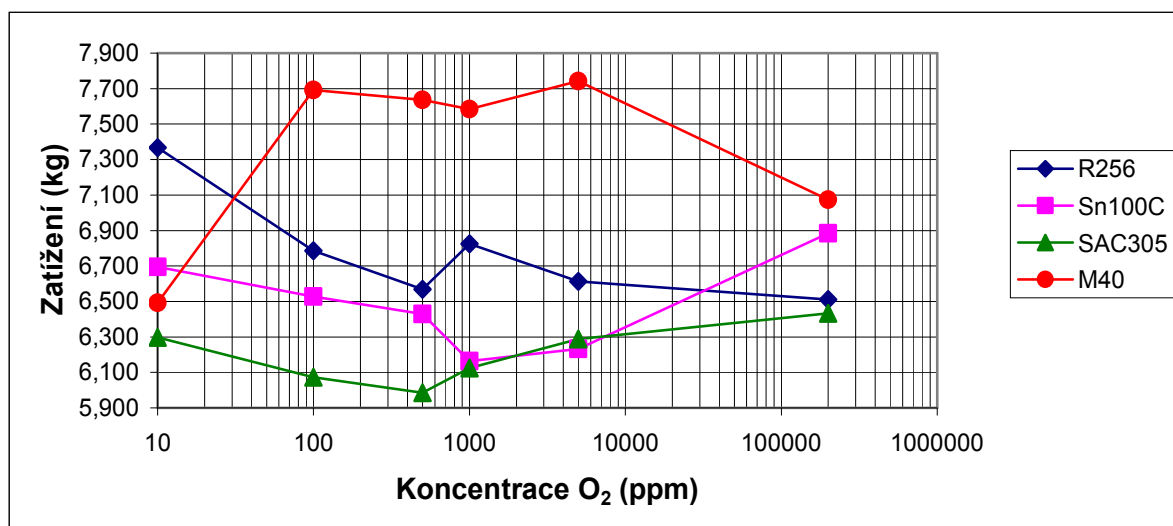
5.3.3 Velikost součástek 0805

Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 0805 jsou uvedeny v tab. 5.5, která je zkrácenou verzí tabulky A.3 uvedené v příloze. Z naměřených hodnot byl sestrojen graf, který je na obr. 5.14.

Tab. 5.5 : Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 0805.

Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	R256					
Průměr (kg)	6,511	6,613	6,825	6,568	6,786	7,367
Směrodatná odchylka (kg)	0,856	0,484	0,606	1,173	0,685	0,824
Pájka	Sn100C					
Průměr (kg)	6,884	6,266	6,164	6,429	6,528	6,694
Směrodatná odchylka (kg)	0,671	0,884	1,170	0,492	0,675	0,831
Pájka	SAC305					
Průměr (kg)	6,432	6,288	6,125	5,985	6,073	6,298
Směrodatná odchylka (kg)	0,343	0,596	0,541	1,028	0,495	0,725
Pájka	M40					
Průměr (kg)	7,074	7,741	7,585	7,637	7,692	6,493
Směrodatná odchylka (kg)	0,505	0,915	1,056	0,727	1,161	1,288

Z grafu naměřených hodnot pro typ součástky 0805 (obr. 5.14) lze pozorovat, že nejvyšší pevnost má opět pasta M40 při koncentraci 5000 ppm. Při této koncentraci byla nejvyšší hodnota pasty M40 i u součástky typu 2512 a 0603. Při koncentraci 10 ppm dochází u pasty M40 k výraznému poklesu hodnoty zatížení, což může být způsobenou chybou. Olovnatá pasta má u tohoto typu součástky vyšší pevnost, než pasta SAC305 a Sn100C. Při poklesu koncentrace kyslíku na 10 ppm dochází u olovnaté pasty R256 k nárůstu pevnosti o 11,6 % oproti pevnosti na vzduchu. Nejmenší pevnost má pro tento typ součástky pasta SAC305 při koncentraci 500 ppm.



Obr. 5.14 : Graf naměřených hodnot pevnosti pájených spojů na střih pro součástku typu 0805.

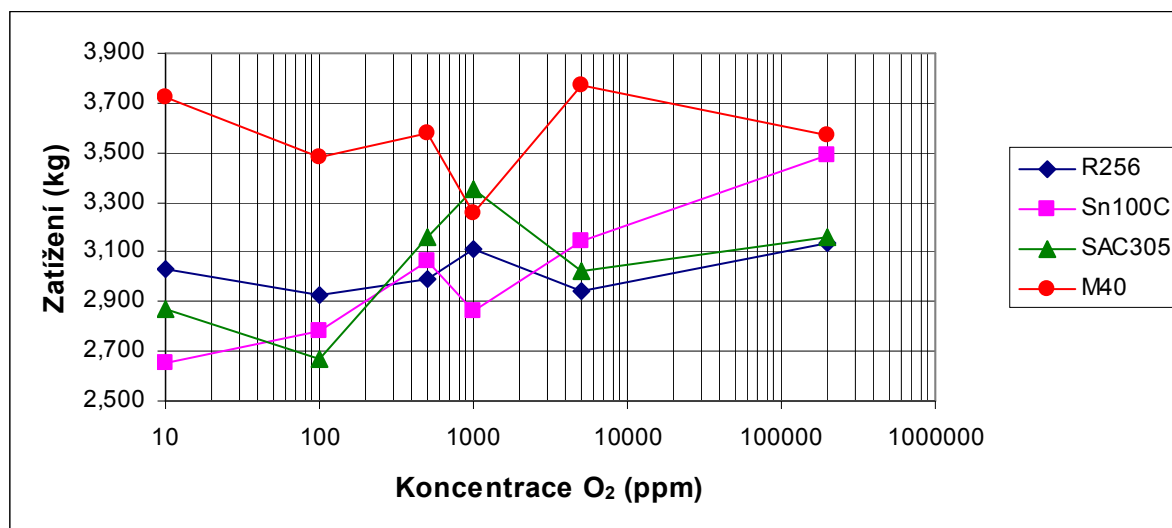
5.3.4 Velikost součástek 0603

Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 0603 jsou uvedeny v tab. 5.6, která je zkrácenou verzí tabulky A.4 uvedené v příloze. Z naměřených hodnot byl sestaven graf, který je na obr. 5.15.

Tab. 5.6 : Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 0603.

Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	R256					
Průměr (kg)	3,139	2,940	3,108	2,990	2,925	3,032
Směrodatná odchylka (kg)	0,469	0,305	0,351	0,396	0,602	0,396
Pájka	Sn100C					
Průměr (kg)	3,490	3,143	2,859	3,059	2,779	2,652
Směrodatná odchylka (kg)	0,297	0,304	0,248	0,317	0,276	0,480
Pájka	SAC305					
Průměr (kg)	3,161	3,021	3,351	3,158	2,673	2,866
Směrodatná odchylka (kg)	0,273	0,163	0,296	0,401	0,261	0,350
Pájka	M40					
Průměr (kg)	3,573	3,775	3,259	3,581	3,484	3,720
Směrodatná odchylka (kg)	0,629	0,394	0,443	0,514	0,394	0,193

Z grafu naměřených hodnot pro typ součástky 0603 (obr. 5.15) lze opět pozorovat nejvyšší pevnost pro pastu M40 při koncentraci 5000 ppm. U pasty Sn100C dochází při poklesu koncentrace kyslíku na hodnotu 10 ppm k poklesu hodnoty zatížení o 24 % oproti pevnosti na vzduchu. U tohoto typu součástky mají srovnatelnou nejnižší hodnotu pevnosti pasta Sn100C pro koncentraci 10 ppm a pasta SAC305 pro koncentraci 100 ppm.



Obr. 5.15 : Graf naměřených hodnot pevnosti pájených spojů na střih pro součástku typu 0603.

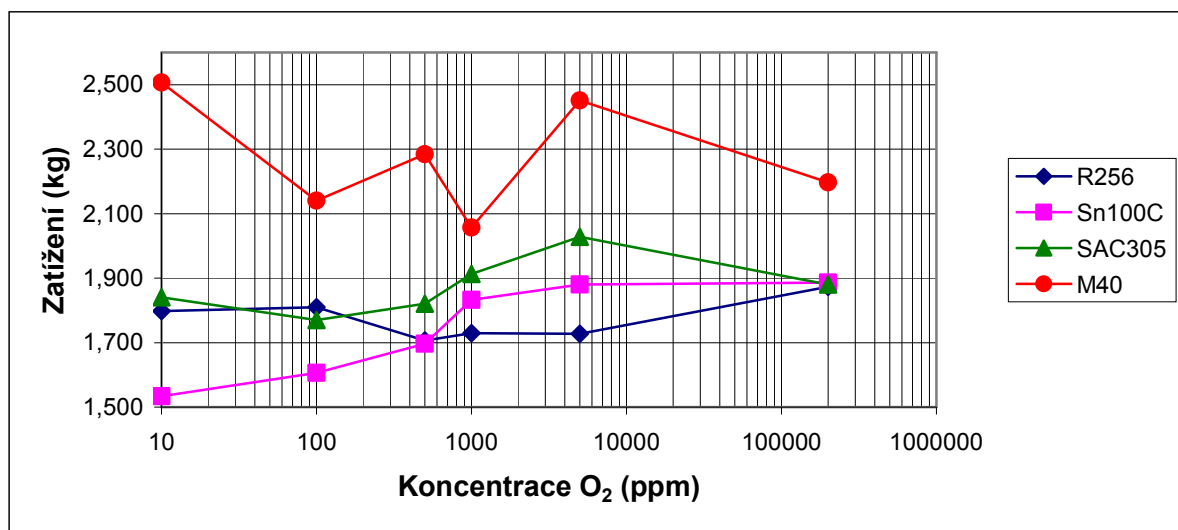
5.3.5 Velikost součástek 0402

Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 0402 jsou uvedeny v tab. 5.7, která je zkrácenou verzí tabulky A.5 uvedené v příloze. Z naměřených hodnot byl sestaven graf, který je na obr. 5.16.

Tab. 5.7 : Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 0402.

Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	R256					
Průměr (kg)	1,874	1,727	1,730	1,707	1,810	1,798
Směrodatná odchylka (kg)	0,120	0,127	0,294	0,241	0,225	0,177
Pájka	Sn100C					
Průměr (kg)	1,886	1,880	1,832	1,697	1,606	1,534
Směrodatná odchylka (kg)	0,221	0,192	0,146	0,173	0,239	0,125
Pájka	SAC305					
Průměr (kg)	1,880	2,029	1,913	1,821	1,770	1,841
Směrodatná odchylka (kg)	0,169	0,075	0,244	0,155	0,144	0,107
Pájka	M40					
Průměr (kg)	2,197	2,451	2,057	2,284	2,140	2,507
Směrodatná odchylka (kg)	0,274	0,217	0,345	0,222	0,206	0,283

Z grafu naměřených hodnot pro typ součástky 0402 (obr. 5.16) lze opět pozorovat nejvyšší hodnotu pevnosti pro pastu M40, nyní ale při koncentraci 10 ppm. Při této koncentraci byla nejvyšší hodnota pasty M40 i u součástky typu 1206. U pasty Sn100C dochází při poklesu koncentrace na hodnotu 10 ppm k poklesu hodnoty zatížení o 18,7 % oproti pevnosti na vzduchu. Olovnatá pasta se u tohoto typu součástky při změně koncentrace kyslíku téměř nemění. U pasty SAC305 je pozorovatelný nárůst pevnosti pro koncentraci 5000 ppm, poté opět dochází k poklesu hodnoty pevnosti pájeného spoje.



Obr. 5.16 : Graf naměřených hodnot pevnosti pájených spojů na střih pro součástku typu 0402.

5.3.6 Pájecí pasta R256 tepelně vystárnutá

Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro tepelně vystárnutou pájecí pastu R256 jsou uvedeny v tab. 5.8, která je zkrácenou verzí tabulky A.6 uvedené v příloze.

Tab. 5.8 : Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro tepelně vystárnutou pájecí pastu R256.

Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Součástka	1206					
Průměr (kg)	7,206	7,974	7,521	8,138	7,599	7,854
Směrodatná odchylka (kg)	0,606	1,137	1,033	1,603	1,423	1,108
Součástka	0805					
Průměr (kg)	6,917	7,001	6,104	6,345	6,326	6,687
Směrodatná odchylka (kg)	0,551	0,502	0,670	0,885	0,517	0,775
Součástka	0603					
Průměr (kg)	3,645	4,114	3,493	2,995	3,062	3,413
Směrodatná odchylka (kg)	0,247	0,515	0,863	0,892	0,886	0,174
Součástka	0402					
Průměr (kg)	2,070	1,999	1,947	1,841	1,937	1,947
Směrodatná odchylka (kg)	0,194	0,178	0,342	0,161	0,504	0,259

5.4 Zhodnocení výsledků

Mechanická pevnost pájených spojů na střih byla měřena na 30 testovacích deskách, z nichž na 24 deskách bylo testováno cca 910 pájených spojů. Na zbylých 6 deskách byla testována pevnost pájených spojů na střih po teplotním stárnutí. Po teplotním stárnutí bylo testováno cca 96 pájených spojů. Teplotní stárnutí bylo prováděno při 100 °C po dobu 60 hodin (hodina nárůst teploty, hodina pokles teploty).

Naměřené výsledky naznačují, že ochranná dusíková atmosféra má na pevnost pájených spojů na střih vliv podle typu použité testované součástky. Směrnice mechanické pevnosti v závislosti na koncentraci klesá s klesající velikostí součástek. Například u součástek typu 1206 je pozorovatelný vzrůst mechanické pevnosti na střih mezi koncentrací kyslíku 200000 a 10 ppm. Naopak u součástek 0402 je pozorovatelný pokles mechanické pevnosti mimo pasty M40. Pasta M40 se chová odlišně. U pasty M40 dochází například u všech typů součástek při použití ochranné dusíkové atmosféry s koncentrací kyslíku 5000 ppm ke vzrůstu mechanické pevnosti oproti pájeným spojům pájených na vzduchu. Součástky typu 2512, 0805 a 0603 mají pro pastu M40 nejvyšší mechanickou pevnost na střih při koncentraci kyslíku 5000 ppm. Zbylé součástky typu 1206 a 0402 mají pro pastu M40 nejvyšší mechanickou pevnost při koncentraci kyslíku 10 ppm. Rozkmit naměřených hodnot mohlo způsobovat různé množství nanesené pájecí pasty, která se nanášela přes šablonu. Při testování mechanické pevnosti na střih, nebylo v této práci otestováno více vzorků z důvodu velké časové náročnosti.

Naměřené hodnoty dále naznačují, že největší mechanickou pevnost na střih má pasta M40. Další je po pastě M40 pájecí pasta SAC305, dále Sn100C a jako nejmenší hodnotu mechanické pevnosti má olovnatá pasta R256. Průměrná hodnota mechanické pevnosti pro součástku typu 2512 byla pro pastu M40 17,676 kg, pro pastu SAC305 15,307 kg, pro pastu

Sn100C 14,301 kg a pro olovnatou pastu R256 12,483 kg. Procentuálně lze vyjádřit, že naproti olovnaté pastě R256 má pasta Sn100C o 14,6 % větší mechanickou pevnost na stříh, pasta SAC305 o 22,6 % a pasta M40 o 41,6 %.

Při trhání testovacích součástek typu 2512 docházelo přibližně ve 25 % k utržení vodivého kontaktu součástky a ne k utržení v pájeném spoji. Při testování byly dále zaznamenávány místa, kde došlo k utržení pájeného spoje. Na obr. 5.17 jsou procentuálně znázorněny typy utržení pájeného spoje pro jednotlivé pájecí pasty, při kterých došlo při testu stříhem.

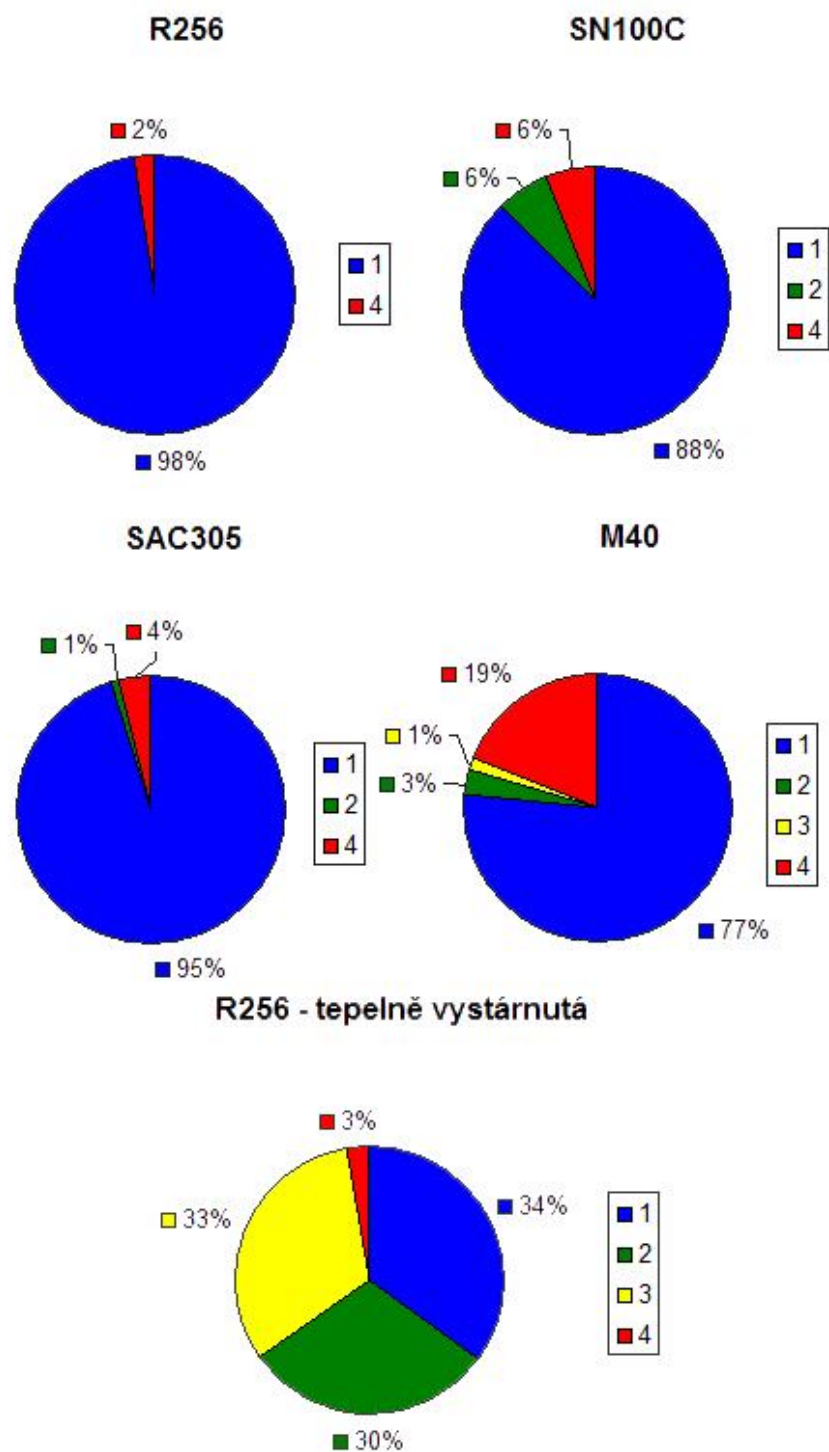
Typy utržení pájeného spoje:

- 1 – normální utržení v pájeném spoji
- 2 – jeden spoj utržený ze substrátu ve vodivém motivu a druhý v pájeném spoji
- 3 – oba spoje utržené ve vodivém motivu ze substrátu
- 4 – prasklý roh součástky

V převážné většině případů docházelo k utržení pájeného spoje ve spoji. U pasty R256 došlo ve 2 % k prasknutí součástky. U pasty Sn100C došlo v 6 % k typu utržení číslo 2 (jeden spoj utržený ze substrátu ve vodivém motivu a druhý v pájeném spoji) a v 6 % k prasknutí součástky. U pasty SAC305 došlo v 1 % k typu utržení číslo 2 a ve 4 % k prasknutí součástky. U pasty M40 došlo vlivem její větší pevnosti v 19 % k prasknutí součástky. Ve 3 % došlo k typu utržení číslo 2 a v 1 % došlo k typu utržení číslo 3.

Po teplotním stárnutí pájecí pasty R256 došlo k výraznému zvýšení typů utržení číslo 2 a 3. Typ utržení číslo 2 vzrostl na 30 % a typ utržení číslo 3 (oba spoje utržené ve vodivém motivu ze substrátu) na 33 %. Prasklá součástka byla ve 3 %. V návaznosti na tuto práci by bylo dále vhodné otestovat mechanickou pevnost na stříh po teplotním stárnutí i pro další pájecí pasty.

Přechod z olovnatých pájecích past na bezolovnaté s sebou přináší řadu nevýhod. Proto je dobré, že alespoň mechanická pevnost patří mezi jednu z výhod.



Obr. 5.17 : Grafy procentuálního výskytu typů utržení pájeného spoje pro jednotlivé pájecí pasty.

6 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo porovnání různých typů pájecích past pomocí testu stříhem na keramickém substrátu. V teoretické části jsou popsány bezolovnaté pájky a jejich složení, různé druhy mechanických zkoušek, metody pájení přetavením a spolehlivost pájených spojů. Bezolovnaté pájecí pasty jsou rozděleny do základních skupin podle použitých příměsí. Mezi základní pasty patří např. Sn/Ag/Cu, Sn/Ag, Sn/Cu a Sn/Sb. Jednotlivé příměsi se přidávají v různých množstvích podle toho, jakých vlastností je požadováno dosáhnout. Každá nepatrná změna množství příměsí přispívá ke změně vlastností výsledné pájecí pasty. Důležitou složkou pájecí pasty při pájení přetavením je také tavídko, jež zlepšuje výslednou kvalitu pájeného spoje. Pro mechanické testování existuje řada různých druhů mechanických zkoušek, kterými jsou např. zkouška stříhem, tahem, krutem, ohybem a vibracemi. Existuje ale i řada různých modifikací, kterými jsou např. zkouška odolnosti proti odtržení, zkouška cyklickým padáním, zkouška cyklickým ohybem, mechanická únavová zkouška smykem, tří bodový a čtyř bodový ohybový test atd. Mezi nejrozšířenější mechanickou zkoušku patří testování pomocí vibrací, jež se používá především v automobilovém a leteckém průmyslu. Problematika bezolovnatého pájení je stále aktuální, protože se neustále hledají nové možné ekonomické náhrady za olovnaté pájky. Důkazem je rostoucí počet článků a další literatury na toto téma.

V praktické části bakalářské práce byl navrhnut testovací motiv a z něj byly dále vyrobeny testovací desky. Testovací motiv byl natištěn na keramickém substrátu. Tloušťka vypálené vodivé vrstvy byla 20 μm . Následně byla testována mechanická pevnost pájených spojů na stříh pro různé pájecí pasty a pro různé koncentrace kyslíku. Testování bylo prováděné na zařízení DAGE PC2400. Před testováním se musely nejprve správně nastavit parametry testovacího zařízení. Pro různé typy součástek se musela měnit např. výška hrotu od substrátu, aby byla zajištěna podmínka, že testovací hrot tlačí minimálně do $\frac{3}{4}$ výšky testované součástky. Dále například rozsah zatížení, ze kterého se vypočítával pokles hodnoty zatížení, při němž se test přerušil.

Pro zjištění nejdůležitějších faktorů, jež působí na výslednou mechanickou pevnost, byl navržen a vypracován Ishikawův diagram vlivů projevujících se při testování mechanické pevnosti pájených spojů stříhem.

Pro testování byla vybrána referenční olovnatá pájecí pasta R256 (Kester) a bezolovnaté pájecí pasty Sn100C (Cobar), SAC305 (Almit) a M40 (Senju). Naměřené výsledky naznačují, že nejvyšší mechanickou pevnost pájených spojů na stříh má pájecí pasta M40, po ní pájecí pasta SAC305, poté Sn100C a nejmenší referenční olovnatá pasta R256. Mechanická pevnost se pro pasty R256, Sn100C a SAC305 s použitím ochranné dusíkové atmosféry mění podle typu použité součástky. Při klesající velikosti součástek klesá i směrnice mechanické pevnosti. Odlišně se chová pájecí pasta M40, u které je pro všechny typy součástek pozorovatelný vzrůst mechanické pevnosti na stříh již při přechodu z koncentrace 200000 ppm (vzduch) na 5000 ppm. V další části grafu není možné popsat směrnici křivky jednoznačným charakterem vývoje. U velikosti součástek 1206 a 0402 byla pevnost spoje větší u koncentrace kyslíku 10 ppm než u ostatních velikostí součástek pájených pájecí pastou M40. Naměřené výsledky ukazují, že vzhledem k pevnosti spoje u této pasty není nutné snižovat koncentraci kyslíku pod 5000 ppm. U ostatních typů bezolovnatých pájecích past naměřené výsledky nevykazují výrazný vzrůst pevnosti se snižováním koncentrace kyslíku v pájecí atmosféře.

Při testování se zaznamenávaly i typy utržení pájeného spoje. Nejčastější typ utržení byl v pájeném spoji. U pasty M40 z důvodu její vysoké pevnosti v 19 % došlo k prasknutí součástky a k lomu jejího rohu. Výrazný vzrůst typů utržení číslo 2 (jeden spoj utržený ze substrátu ve vodivém motivu a druhý v pájeném spoji) a číslo 3 (oba spoje utržené ve

vodivém motivu ze substrátu) je pozorovatelný u olovnaté pájecí pasty R256 s tepelným stárnutím. U těchto typů utržení byla pevnost vodivé cesty a spoje vyšší než pevnost vazby vodivé cesty k substrátu.

Bakalářská práce předkládá experimentální výsledky testů pevnosti bezolovnatých pájených spojů na keramických substrátech a pokládá základ pro další výzkum a vývoj se zaměřením na tepelné stárnutí spojů i pro další pájecí pasty a pozorování, zda dochází k zvýšení typů utržení číslo 2 a 3. Dále je navrhováno provést testování mechanické pevnosti pájených spojů na stříh pro více testovacích desek, aby byly hodnoty více ověřitelné. Důvodem neotestování většího počtu pájených spojů na stříh je velká časová náročnost testů.

Přechod z olovnatých pájecích past na bezolovnaté s sebou přináší řadu nevýhod, ať už je to vyšší cena, vyšší teplota tavení, nižší spolehlivost, užší teplotní pracovní okno a řadu dalších. Přes vypsání nedostatků je dobré, že alespoň mechanická pevnost patří mezi jednu z výhod.

7 Použitá literatura

- [1] Starý, Jiří.; Kahle, Petr. Plošné spoje a povrchová montáž [online]. Skriptum. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=21618>.
- [2] Co je pájení [online]. [citováno 2011-03-24]. Dostupné z: <www.ped.muni.cz/wtech/elearning/PEL/Teorie_pajeni.doc>.
- [3] KELLER, J.; BAITHER, D.; Wilke, U. aj. Mechanical properties of Pb-free SnAg solder joints [online]. Vydáno: 5.2.2011, [citováno 2011-10-31]. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645411000188>>.
- [4] RoHS. Neznalost direktivy RoHS se nevyplácí [online]. [citováno 2011-12-14] Dostupné z: <<http://www.rohs.cz/>>.
- [5] SZENDIUCH, Ivan. Problém přechodu na bezolovnaté pájky [online]. [citováno 2011-12-13]. Dostupné z: <<http://www.marpos.cz/leadfree.htm>>.
- [6] Lead-free soldering guide [online]. [citováno 2011-11-19]. Dostupné z: <http://www.pisma.com/ul_files/forums/leadfree/aim_lead_free_guide.pdf>.
- [7] SZENDIUCH, Ivan. Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. 1.vyd. VUTUM, 2006. ISBN 80-214-3292-6.
- [8] MIRIC, A. Z.; GRUSD, Angela. Lead – free alloys [online]. [citováno 2011-11-20]. Dostupné z: <http://tersted.home.xs4all.nl/PDF_files/Heraeus/AM_AG_PBFREE.pdf>.
- [9] SMT centrum. Srovnání pájecích slitin SAC a Sn100 [online]. Vydáno: 31.12.2009 [citováno 2011-11-21]. Dostupné z: <<http://www.smtcentrum.cz/vyber-pajecich-slitin/srovnani-pajecich-slitin-sac-a-sn100>>.
- [10] SZENDIUCH, Ivan. Technologie elektronických obvodů a systémů. VUTUM, 2002. ISBN 80-214-2072-3.
- [11] SZENDIUCH, Ivan. Povrchová montáž SMT [online]. [citováno 2011-11-06]. Dostupné z: <<http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2009-BMTS-7-8-smt.pdf>>.
- [12] SOPER, A.; POZZA, G.; IGNAT, M. aj. Mechanical response of solder joints in flip-chip type structures [online]. Vydáno: 9.3.1998, [citováno 2011-11-21]. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271497001595>>.
- [13] DUSEK, Miloš.; HUNT, Christopher. Crack detection methods for lead – free solder joints [online]. 3/2004, [citováno 2011-11-21]. Dostupné z: <http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/matl64.pdf>.
- [14] ENTEGGART, Ian. The role of micromechanical testing in microelectronics [online]. [citováno 2011-12-14]. Dostupné z: <<http://www.instron.com/wa/library/StreamFile.aspx?doc=47>>.
- [15] SZENDIUCH, Ivan. Pájení a bezolovnaté pájky [online]. [citováno 2011-11-03]. Dostupné z: <<http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>>.
- [16] POLSTEROVÁ, Helena. Spolehlivost v elektrotechnice. Skriptum. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [17] SEELIG, Karl.; SURASKI, David. A comparison of tin-silver-copper lead-free solder alloys [online]. [citováno 2011-11-19]. Dostupné z: <http://www.pisma.com/ul_files/forums/leadfree/aim_lead_free_guide.pdf>.
- [18] DRLÍK, Miloš. Použití bezolovnatých pájecích slitin [online]. [citováno 2011-11-09]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/cv_bezolovo.pdf>.
- [19] FREAR, D. R.; JANG, J.W.; LIN, J. K. aj. Pb – free solders for flip – chip interconnects [online]. [citováno 2011-11-26]. Dostupné z: <<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0106/Frear-0106.html>>.

- [20] NIHON SUPERIOR. Properties of lead – free solders [online]. [citováno 2011-11-29]. Dostupné z: <<http://www.nihonsuperior.co.jp/english/products/leadfree/tokusei.html>>.
- [21] ČSN EN 60749 – 19. Polovodičové součástky – Mechanické a klimatické zkoušky – část 19: Zkouška pevnosti čipu stříhem. 2003.
- [22] ČSN EN 62137 – 1 – 2. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 2: Zkouška pevnosti ve smyku. 2008.
- [23] ČSN EN 62137 – 1 – 1. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 1: Zkouška odolnosti proti odtržení. 2008.
- [24] ČSN EN 62137 – 1 – 3. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 3: Zkouška cyklickým padáním. 2009.
- [25] ČSN EN 62137 – 1 – 4. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 4: Zkouška cyklickým ohybem. 2009.
- [26] ČSN EN 62137 – 1 – 5. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 5: Mechanická únavová zkouška smykem. 2009.

Seznam použitých zkratek

Au	Zlato – chemická značka
BGA	Ball Grid Array – typ pouzdra součástky
Cu	Měď – chemická značka
Flip-chip	Typ pouzdra součástky
FR4	Fire Resistant 4 – organický substrát
Ge	Germanium – chemická značka
M40	Pájecí slitina Sn98,3Ag1Cu0,7Bi,In
Ni	Nikl – chemická značka
O	Kyslík – chemická značka
Pb	Olovo – chemická značka
ppm	Parts per million – výraz pro jednu miliontinu
QFP	Quad Flat Package – typ pouzdra součástky
RMA	Rosin Mildly Activated – mírně aktivovaná pryskyřice
R256	Pájecí slitina Sn62Pb36Ag2
SAC	Pájecí slitina na bázi cínu, stříbra a mědi
SAC305	Pájecí slitina Sn96,5Ag3Cu0,5
Sb	Antimon – chemická značka
SMD	Surface Mount Device – bezvývodová součástka určená pro povrchovou montáž
SMT	Surface Mount Technology – technologie povrchové montáže
Sn	Cín – chemická značka
SOIC	Small Outline Integrated Circuit – typ pouzdra součástky
TSOP	Thin Small Outline Package – typ pouzdra součástky
YAG	Yttrito hlinitý granát

Příloha A : Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů na střih

Tab. A.1 : Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů na střih pro typ součástky 2512.

Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	R256					
Součástka	Zatížení (kg)					
2512	14,177	13,105	13,983	15,860	14,048	14,783
	13,500	12,431	12,885	15,231	13,847	13,925
	11,551	10,371	13,755	13,617	9,155	13,873
	9,725	9,271	10,671	13,358	11,392	13,703
	10,143	13,669	13,492	13,385	10,332	14,486
	10,099	9,411	10,826	10,609	10,588	14,135
Průměr (kg)	11,533	11,376	12,602	13,677	11,560	14,151
Směrodatná odchylka (kg)	1,738	1,764	1,353	1,673	1,811	0,374
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	Sn100C					
Součástka	Zatížení (kg)					
2512	17,460	13,712	14,297	18,173	12,819	13,693
	15,954	13,562	13,555	19,064	12,508	11,844
	14,432	14,334	15,609	12,109	13,213	15,115
	13,186	15,239	16,072	12,985	13,535	13,374
	17,111	13,556	14,379	13,513	13,804	12,073
	16,196	11,746	14,526	15,282	14,482	12,305
Průměr (kg)	15,723	13,692	14,740	15,188	13,394	13,067
Směrodatná odchylka (kg)	1,490	1,051	0,847	2,617	0,648	1,136
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	SAC305					
Součástka	Zatížení (kg)					
2512	14,541	14,465	18,379	14,935	11,496	15,357
	15,975	16,609	15,652	15,606	14,101	15,630
	16,006	13,483	19,279	14,270	15,251	16,307
	15,678	13,658	17,340	13,385	15,623	14,751
	15,895	14,848	14,590	17,279	14,090	15,589
	14,007	15,610	17,597	14,884	13,626	15,249
Průměr (kg)	15,350	14,779	17,140	15,060	14,031	15,481
Směrodatná odchylka (kg)	0,784	1,086	1,585	1,204	1,331	0,469
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	M40					
Součástka	Zatížení (kg)					
2512	16,647	19,621	16,803	18,127	16,610	19,361
	17,180	19,901	15,363	15,395	17,914	14,886
	18,626	18,387	19,275	15,806	18,924	12,996
	16,829	22,204	17,491	16,403	19,000	15,893
	19,176	21,025	17,402	18,551	18,798	16,452
	18,656	21,398	16,852	17,475	14,943	15,973
Průměr (kg)	17,852	20,423	17,198	16,960	17,698	15,927
Směrodatná odchylka (kg)	0,996	1,261	1,161	1,173	1,485	1,904

Tab. A.2 : Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů na stříh pro typ součástky 1206.

Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	R256					
Součástka	Zatížení (kg)					
1206	6,612	6,599	6,514	6,690	6,398	7,005
	9,012	6,091	6,980	8,130	6,111	7,883
	7,088	6,367	7,242	7,329	7,404	8,484
	7,346	6,749	7,824	7,623	6,901	7,116
	7,508	6,477	7,537	7,646	7,787	7,360
	7,586	6,976	7,571	7,410	7,468	8,369
	5,673	6,166	6,013	6,631	5,521	7,000
	6,696	6,721	6,602	7,196	6,564	7,582
Průměr (kg)	7,190	6,518	7,035	7,332	6,769	7,600
Směrodatná odchylka (kg)	0,901	0,283	0,582	0,467	0,717	0,554
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	Sn100C					
Součástka	Zatížení (kg)					
1206	6,143	8,037	6,531	10,014	7,023	8,617
	6,492	7,107	6,649	7,294	7,112	7,846
	6,447	6,667	5,739	7,278	7,830	8,384
	9,832	8,211	7,930	8,343	8,231	7,924
	6,635	7,150	7,120	6,678	6,737	7,876
	8,294	5,230	4,790	7,534	5,724	6,294
	7,326	-	5,250	4,895	4,538	5,419
	7,301	7,092	6,038	7,701	6,484	8,158
Průměr (kg)	7,309	7,071	6,256	7,467	6,710	7,565
Směrodatná odchylka (kg)	1,149	0,910	0,952	1,352	1,094	1,040
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	SAC305					
Součástka	Zatížení (kg)					
1206	8,910	8,348	9,405	10,072	9,329	9,277
	10,571	9,167	8,415	9,813	10,177	8,066
	9,425	10,298	8,291	10,342	8,072	9,992
	10,006	9,525	10,579	10,442	9,603	9,208
	7,396	8,037	9,153	8,449	8,714	8,770
	7,193	7,787	6,827	7,487	6,237	8,736
	7,288	8,185	6,628	6,536	5,343	6,838
	8,619	9,135	8,580	8,029	7,806	9,274
Průměr (kg)	8,676	8,810	8,485	8,896	8,160	8,770
Směrodatná odchylka (kg)	1,212	0,807	1,221	1,379	1,565	0,896
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	M40					
Součástka	Zatížení (kg)					
1206	7,504	9,209	7,605	8,944	7,475	7,421
	10,933	7,656	9,430	9,275	8,603	10,049
	8,596	12,204	10,264	8,694	9,607	10,058
	7,591	8,093	6,313	7,724	7,857	8,520
	7,514	10,205	7,569	9,299	11,164	9,273
	6,605	8,329	6,457	8,304	9,161	9,036
	8,612	8,586	7,095	8,551	7,812	9,875
	7,883	8,253	8,138	7,648	7,994	10,471
Průměr (kg)	8,155	9,067	7,859	8,555	8,709	9,338
Směrodatná odchylka (kg)	1,212	1,393	1,295	0,594	1,152	0,938

Tab. A.3 : Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů na stříh pro typ součástky 0805.

Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	R256					
Součástka	Zatížení (kg)					
0805	7,316	7,151	8,072	7,734	7,848	8,551
	7,078	5,534	6,306	7,153	6,773	7,531
	6,327	6,682	6,892	7,233	5,951	8,613
	7,164	6,624	7,539	4,689	7,835	7,735
	6,546	6,798	6,474	7,508	5,936	6,614
	6,473	6,223	6,312	4,579	6,483	6,387
	6,761	6,876	6,475	6,401	6,792	6,631
	4,422	7,016	6,527	7,245	6,673	6,874
Průměr (kg)	6,511	6,613	6,825	6,568	6,786	7,367
Směrodatná odchylka (kg)	0,856	0,484	0,606	1,173	0,685	0,824
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	Sn100C					
Součástka	Zatížení (kg)					
0805	6,328	5,343	7,363	6,533	6,439	7,469
	7,797	5,473	6,939	6,562	6,993	6,190
	7,894	7,701	7,311	6,664	7,720	6,726
	7,089	7,065	5,360	7,339	6,656	7,913
	6,170	6,270	5,818	6,458	6,615	6,502
	6,597	5,547	3,821	6,251	5,275	5,056
	7,167	-	5,554	5,470	5,901	6,393
	6,032	-	7,147	6,156	6,624	7,305
Průměr (kg)	6,884	6,233	6,164	6,429	6,528	6,694
Směrodatná odchylka (kg)	0,671	0,884	1,170	0,492	0,675	0,831
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	SAC305					
Součástka	Zatížení (kg)					
0805	6,422	7,466	6,784	7,372	6,719	6,932
	6,879	6,791	6,542	7,556	5,633	7,825
	6,910	5,671	5,228	6,271	6,586	6,183
	6,395	6,131	6,698	4,962	6,420	5,597
	5,755	6,604	5,862	4,738	6,164	6,505
	6,531	6,171	6,508	4,824	5,722	5,790
	6,314	5,926	5,725	6,019	5,164	5,531
	6,253	5,543	5,649	6,137	6,179	6,018
Průměr (kg)	6,432	6,288	6,125	5,985	6,073	6,298
Směrodatná odchylka (kg)	0,343	0,596	0,541	1,028	0,495	0,725
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	M40					
Součástka	Zatížení (kg)					
0805	7,993	9,473	7,272	8,440	9,613	9,149
	6,648	7,443	8,836	7,256	7,323	6,182
	7,459	8,128	7,405	7,509	8,784	6,011
	7,183	8,533	9,745	9,151	8,730	5,208
	6,904	7,531	6,822	6,991	7,443	7,335
	6,349	7,218	6,931	7,517	5,979	7,235
	6,645	6,189	6,371	6,843	6,515	5,980
	7,409	7,416	7,298	7,385	7,146	4,846
Průměr (kg)	7,074	7,741	7,585	7,637	7,692	6,493
Směrodatná odchylka (kg)	0,505	0,915	1,056	0,727	1,161	1,288

Tab. A.4 : Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů na stříh pro typ součástky 0603.

Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	R256					
Součástka	Zatížení (kg)					
0603	3,959	3,078	3,559	3,390	3,250	3,353
	3,020	2,864	2,968	3,025	2,900	3,087
	3,407	3,380	3,268	3,253	2,837	2,688
	3,326	3,246	3,469	3,138	4,335	3,704
	3,533	2,877	3,351	3,351	2,658	2,783
	2,574	3,000	3,052	2,379	2,249	2,723
	2,657	2,315	2,486	2,290	2,443	2,504
	2,633	2,760	2,709	3,094	2,727	3,412
Průměr (kg)	3,139	2,940	3,108	2,990	2,925	3,032
Směrodatná odchylka (kg)	0,469	0,305	0,351	0,396	0,602	0,396
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	Sn100C					
Součástka	Zatížení (kg)					
0603	3,080	2,993	3,248	2,833	2,414	2,591
	3,509	3,354	2,434	2,844	3,113	2,592
	3,624	3,408	3,040	3,019	2,722	2,253
	3,683	2,945	2,940	3,743	3,199	3,883
	3,121	3,748	3,082	3,372	2,908	2,442
	3,992	3,011	2,716	2,868	2,781	2,341
	-	2,820	2,721	3,054	2,719	2,511
	3,421	2,866	2,687	2,741	2,373	2,604
Průměr (kg)	3,490	3,143	2,859	3,059	2,779	2,652
Směrodatná odchylka (kg)	0,297	0,304	0,248	0,317	0,276	0,480
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	SAC305					
Součástka	Zatížení (kg)					
0603	3,037	3,080	2,989	3,620	2,956	3,142
	3,293	3,150	3,558	2,469	3,032	2,481
	3,170	3,018	3,680	3,432	2,522	2,826
	3,766	3,234	3,868	3,721	2,119	3,529
	3,223	2,761	3,028	2,942	2,740	3,140
	2,939	3,001	3,212	2,876	2,671	2,704
	2,791	2,770	3,237	3,294	2,666	2,654
	3,069	3,151	3,232	2,908	2,676	2,455
Průměr (kg)	3,161	3,021	3,351	3,158	2,673	2,866
Směrodatná odchylka (kg)	0,273	0,163	0,296	0,401	0,261	0,350
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	M40					
Součástka	Zatížení (kg)					
0603	3,769	3,329	3,421	3,744	3,288	3,956
	3,109	4,172	2,941	3,333	3,489	3,496
	2,619	3,650	3,402	2,887	3,275	3,801
	4,789	4,384	4,018	4,772	4,149	3,543
	-	4,061	3,191	3,578	4,041	3,473
	3,322	3,490	2,481	3,498	2,893	3,631
	3,824	3,210	2,968	3,594	3,492	3,939
	3,579	3,900	3,649	3,238	3,243	3,917
Průměr (kg)	3,573	3,775	3,259	3,581	3,484	3,720
Směrodatná odchylka (kg)	0,629	0,394	0,443	0,514	0,394	0,193

Tab. A.5 : Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů na stříh pro typ součástky 0402.

Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	R256					
Součástka	Zatížení (kg)					
0402	1,777	1,981	2,036	1,842	2,089	2,063
	1,850	1,756	1,885	1,854	1,946	1,843
	2,161	1,658	1,861	2,089	2,091	1,475
	1,895	1,664	2,108	1,717	1,944	-
	1,729	1,873	1,723	1,867	1,456	1,875
	1,873	1,609	1,601	1,471	1,721	1,808
	1,872	1,684	1,464	1,316	1,660	1,629
	1,832	1,593	1,159	1,497	1,571	1,893
Průměr (kg)	1,874	1,727	1,730	1,707	1,810	1,798
Směrodatná odchylka (kg)	0,120	0,127	0,294	0,241	0,225	0,177
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	Sn100C					
Součástka	Zatížení (kg)					
0402	2,105	2,218	1,935	1,446	1,118	1,367
	1,967	1,960	2,047	1,930	1,791	1,492
	2,082	2,032	1,922	1,581	1,894	1,673
	2,012	1,793	1,840	1,861	1,471	1,608
	2,083	1,581	1,829	1,782	1,544	1,621
	1,638	-	-	1,855	-	1,489
	1,689	1,798	1,605	1,636	1,701	1,684
	1,510	1,780	1,649	1,483	1,723	1,337
Průměr (kg)	1,886	1,880	1,832	1,697	1,606	1,534
Směrodatná odchylka (kg)	0,221	0,192	0,146	0,173	0,239	0,125
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	SAC305					
Součástka	Zatížení (kg)					
0402	1,962	2,109	2,289	2,098	1,521	1,763
	2,016	1,952	1,396	1,760	1,999	1,958
	1,944	2,041	1,800	1,633	1,859	1,760
	1,724	-	2,007	1,668	1,655	2,066
	1,814	2,022	1,833	1,792	1,709	1,810
	2,175	1,928	2,025	1,717	-	1,778
	1,802	2,154	1,881	1,887	1,841	1,745
	1,603	1,994	2,075	2,013	1,804	1,846
Průměr (kg)	1,880	2,029	1,913	1,821	1,770	1,841
Směrodatná odchylka (kg)	0,169	0,075	0,244	0,155	0,144	0,107
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	M40					
Součástka	Zatížení (kg)					
0402	2,181	2,147	2,093	2,246	2,073	2,056
	2,150	2,325	2,791	1,856	2,128	2,731
	2,666	2,740	2,088	2,570	2,574	2,204
	2,440	2,304	1,825	2,445	1,813	2,851
	1,750	2,588	1,771	2,285	2,070	2,546
	2,259	2,662	2,299	2,261	2,243	2,772
	2,263	2,646	1,997	2,529	2,217	2,227
	1,866	2,199	1,593	2,079	2,004	2,669
Průměr (kg)	2,197	2,451	2,057	2,284	2,140	2,507
Směrodatná odchylka (kg)	0,274	0,217	0,345	0,222	0,206	0,283

Tab. A.6 : Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů na stříh pro tepelně vystárnutou pájecí pastu R256.

Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	R256					
Součástka	Zatížení (kg)					
1206	7,663	9,241	9,014	9,647	10,006	7,621
	7,476	8,075	7,57	9,801	7,236	7,323
	6,163	6,145	6,098	6,231	6,369	6,773
	7,521	8,435	7,402	6,874	6,786	9,699
Průměr (kg)	7,206	7,974	7,521	8,138	7,599	7,854
Směrodatná odchylka (kg)	0,606	1,137	1,033	1,603	1,423	1,108
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	R256					
Součástka	Zatížení (kg)					
0805	7,541	7,586	6,197	7,602	6,203	6,267
	7,385	6,275	5,366	5,124	5,581	7,882
	6,292	7,326	5,708	6,155	6,514	5,802
	6,451	6,816	7,145	6,497	7,007	6,798
Průměr (kg)	6,917	7,001	6,104	6,345	6,326	6,687
Směrodatná odchylka (kg)	0,551	0,502	0,670	0,885	0,517	0,775
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	R256					
Součástka	Zatížení (kg)					
0603	3,345	3,915	3,097	3,304	3,326	3,166
	3,474	3,735	2,457	3,414	2,446	3,333
	3,793	3,806	4,811	1,480	2,091	3,577
	3,967	4,999	3,608	3,781	4,385	3,575
Průměr (kg)	3,645	4,114	3,493	2,995	3,062	3,413
Směrodatná odchylka (kg)	0,247	0,515	0,863	0,892	0,886	0,174
Koncentrace O ₂ (ppm)	200000	5000	1000	500	100	10
Pájka	R256					
Součástka	Zatížení (kg)					
0402	2,114	2,089	2,275	1,74	2,076	1,986
	1,848	1,781	1,590	1,629	1,185	1,719
	2,363	1,885	1,622	2,009	2,592	1,727
	1,953	2,241	2,302	1,984	1,893	2,354
Průměr (kg)	2,070	1,999	1,947	1,841	1,937	1,947
Směrodatná odchylka (kg)	0,194	0,178	0,342	0,161	0,504	0,259