

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Mechanické vlastnosti pájeného spoje

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jaroslav HARANT**
Osobní číslo: **E10B0027P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Mechanické vlastnosti pájeného spoje**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou měkkého pájení a měření mechanické pevnosti spojů.
2. Vypracujte přehled používaných zkoušek mechanických vlastností pájeného spoje.
3. Navrhněte a proveďte experiment měření mechanické pevnosti pájeného spoje v závislosti na pájecím profilu.
4. Proveďte vyhodnocení získaných dat.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. R. J. Klein Wassink Soldering in electronics
2. P. Mach, V. Skočil, J. Urbánek Montáž v elektronice
3. M. Abel, V. Cimburek Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Václav Wirth

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013

Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na používané zkoušky pro zjištění mechanických vlastností pájeného spoje. Dále v této práci jsou popsány nejčastěji používané testy pájených spojů. Hlavní částí této bakalářské práce je návrh a realizace experimentu pro změření mechanické pevnosti pájeného spoje v závislosti na pájecím profilu.

Klíčová slova

Mechanické zkoušky, teplotní profil, pájený spoj, pájení, pájka, bezolovnaté pájky, pevnost ve smyku.

Abstract

Presented bachelor's thesis is focused on tests being used to determine mechanical qualities of solder joint. This thesis also describes the most commonly used tests of solder joints. Crucial part of this bachelor's thesis is proposal and implementation of experiment for measuring solder joint's mechanical strength according to solder profile.

Key words

Mechanical testing, temperature profile, solder joint, soldering, solder, lead-free solder, shear strength.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2014

Jaroslav Harant

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Wirthovi za cenné profesionální rady, komentáře a především za pomoc při měření praktické části této práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 ZÁKLADY PÁJENÍ	12
1.1 ROZDĚLENÍ PÁJEK.....	12
1.1.1 <i>Bezolovnaté pájky</i>	12
1.2 TAVIDLA.....	13
2 PÁJECÍ SLITINY, POVRCHOVÉ ÚPRAVY DPS A INTERMETALICKÁ VRSTVA	14
2.1 PÁJECÍ SLITINY	14
2.1.1 <i>Pájecí slitina SAC</i>	15
2.1.2 <i>Pájecí slitina SC</i>	15
2.1.3 <i>Pájecí slitina SA</i>	15
2.1.4 <i>Pájecí slitina SB</i>	16
2.2 POVRCHOVÉ ÚPRAVY DPS	16
2.2.1 <i>HASL (Hot Air Solder Leveling)</i>	16
2.2.2 <i>ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)</i>	16
2.2.3 <i>OSP (Organic Solder Protectives)</i>	16
2.2.4 <i>Imersní stříbro a cín</i>	17
2.3 INTERMETALICKÁ VRSTVA.....	17
3 ZKOUŠKY PRO ZJIŠTĚNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PÁJENÉHO SPOJE	18
3.1 PŘEHLED NOREM	18
3.1.1 <i>České normy</i>	18
3.1.2 <i>Zahraniční normy</i>	20
3.2 MECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ	21
3.3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY PÁJENÉHO SPOJE	21
3.3.1 <i>Zkouška stříhem</i>	21
3.3.2 <i>Zkouška odolnosti proti odtržení</i>	24
3.3.3 <i>Zkouška cyklickým padáním</i>	25
3.3.4 <i>Zkouška cyklickým ohybem</i>	25
3.3.5 <i>Mechanická únavová zkouška smykem</i>	26
4 STROJNÍ PÁJENÍ PŘETALENÍM	28
4.1 POUŽÍVANÉ METODY PRO PÁJENÍ PŘETALENÍM.....	28
4.1.1 <i>Konvekční pájení</i>	28
4.1.2 <i>Kondenzační pájení (pájení v parách)</i>	29
4.1.3 <i>Pájení infračerveným zářením</i>	30
4.1.4 <i>Pájení laserem</i>	31
4.1.5 <i>Pájení vyhříváním nástrojem (impulsní)</i>	31
4.1.6 <i>Pájení ohřevem horké desky nebo pásu</i>	31
4.2 TEPLOTNÍ PROFIL PRO PÁJENÍ PŘETALENÍM.....	31
5 PRAKTICKÁ ČÁST	35
5.1 NÁVRH VZORKŮ PRO MĚŘENÍ.....	35
5.2 MĚŘENÍ VZORKŮ.....	38
5.3 ZMĚŘENÉ A ZPRACOVANÉ HODNOTY	39
5.4 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	41
5.4.1 <i>Vyhodnocení vzorků DPS - Cu</i>	41
5.4.2 <i>Vyhodnocení vzorků DPS - Sn</i>	42
ZÁVĚR	44
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45

SEZNAM PŘÍLOH	1
PŘÍLOHY	2
PŘÍLOHA A: PŘETAVENÉ VZORKY.	2
PŘÍLOHA B: NAMĚŘENÉ A ZPRACOVANÉ HODNOTY PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	3

Seznam symbolů a zkratk

IR infračervený

DPS deska plošných spojů

Pb chemická značka olova

Sn chemická značka cínu

Ag..... chemická značka stříbra

Bi..... chemická značka bismutu

Au..... chemická značka zlata

Ge..... chemická značka germania

Zn..... chemická značka zinku

HASL..... Hot Air Solder Leveling

ENIG..... Electroless Nickel Immersion Gold

OSP Organic Solder Protectives

SMD..... Surface mount device

ČSN..... Česká technická norma

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na problematiku měkkého pájení a především na mechanické vlastnosti pájeného spoje.

Text je rozdělen do pěti částí a závěru, první se zabývá základy pájení, ve druhé je uveden přehled základních slitin, povrchových úprav DPS a úvod do problému intermetalických vrtev. Třetí část se zabývá přehledem českých a mezinárodních zkoušek a především popisem vybraných jednotlivých zkoušek. Čtvrtá část je zaměřena na strojní pájení, konkrétně přetavením. V poslední části (praktické části) se zabývám experimentem pro ověření mechanické pevnosti pájeného spoje v závislosti na pájecím profilu.

Cílem této práce je se seznámit s mechanickými zkouškami pájeného spoje, které jsou důležitými ukazateli v kvalitě a spolehlivosti celého spoje. Z tohoto důvodu je i vypracován přehled nejčastěji používaných zkoušek. Zabývat se těmito zkouškami je velmi důležité, především z bezpečnostního hlediska. Neboť nekvalitní spoj může způsobit například zkrat a i jiné technické komplikace v elektrickém obvodu.

Konkrétně v této práci se ověří mechanická pevnost pájeného spoje v závislosti na pájecím profilu pro pájení přetavením. Teplotní profil je jedna z věcí, která má vliv na celkovou kvalitu pájeného spoje a je tedy nutné se jim zabývat. Dále je možno díky dobře nastavenému teplotnímu profilu zefektivnit výrobní procesy a především zvýšit mechanické vlastnosti pájeného spoje.

1 Základy pájení

Pájení znamená spojování dvou kovů za pomoci snadno tavitelné slitiny (pájky), především na bázi cínu. S pájením se setkáme především v elektrotechnice, ale také při spojování např. měděných trubek nebo pozinkovaných plechů. [1]

1.1 Rozdělení pájek

Pájky obvykle dělíme dle teploty tavení na 2 skupiny:

1. měkké pájky:

Tyto pájky mají bod tavení do 450 °C. Jedná se o pájky, které mají menší mechanickou pevnost. Používají se především v elektrotechnice. Jako nízkotavitelný kov se využívá především cín a jeho slitiny. Dále se vyskytují příměsi mědi, stříbra, bismutu, zinku apod. [1]

2. tvrdé pájky:

Teplota tavení těchto pájek je nad 450 °C. Spoje vytvořené tvrdou pájkou se vyznačují vysokou mechanickou odolností pájeného spoje. Nejčastěji se používají slitiny stříbra, mědi a hliníku. [1]

1.1.1 Bezolovnaté pájky

S příchodem směrnice Evropského parlamentu a rady 2002/96/EC ze dne 27. ledna 2003 o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (OEEZ) bylo nutné nahradit olovnaté pájky za bezolovnaté. Do české legislativy byla tato změna zavedena novelou zákona č. 185/2001 Sb. [2]

Výhodou olovnatých pájek byla především jejich nízká teplota tání, která se pohybovala okolo 183 °C. U bezolovnatých pájek se tato teplota pohybuje v rozmezí 195 – 230 °C. Další velkou výhodou byla cena, která byla řádově nižší. U bezolovnatých pájek se cena zvýšila, a

to především při použití drahých kovů. Jako náhrada olova v pájce Sn/Pb se dnes používá bismut, měď, zlato, zinek, stříbro, antimon a další. [2]

1.2 Tavidla

Jedná se o látky, které nám usnadňují samotné pájení. Především podporují smáčivost pájky a odstraňují oxidy ze spojovaných materiálů. V některých případech se tavidlo odstraňuje různými rozpouštěcími kapalinami. Odstranění probíhá, až po pájení. Z tohoto hlediska se tavidla dělí na dvě skupiny [2]:

- rozpustná ve vodě,
- rozpustná rozpouštědlem.

Další dělení může být na tavidla použitelná pro měkké pájky a na tavidla použitelná pro tvrdé pájky. [1]

2 Pájecí slitiny, povrchové úpravy DPS a intermetalická vrstva

Důležitou součástí této práce je návržení a provedení experimentu, kde bude ověřena mechanická pevnost pájeného spoje v závislosti na pájecím profilu. Z tohoto důvodu je nezbytné uvést hlavní části ovlivňující mechanickou pevnost pájeného spoje. Mezi ně určitě patří výběr pájecí slitiny, povrchová úprava DPS, vznik intermetalických sloučenin a teplotní profil pájení. O teplotním profilu v kapitole 4.

2.1 Pájecí slitiny

Mezi nejpoužívanější bezolovnaté slitiny se řadí SAC (Sn-Ag-Cu), SC (Sn-Cu), SA (Sn-Ag) a SB (Sn-Bi). K vytvoření bezolovnatých pájek se využívají zmíněné slitiny nebo i jiné alternativy. Každý použitý prvek ovlivňuje vlastnosti celé slitiny. Pro lepší přehlednost je vytvořena tabulka 2.1, kde je uveden vliv jednotlivých prvků na vlastnosti pájecí slitiny. [3]

Tab. 2.1 Vlastnosti jednotlivých prvků vyskytujících se v bezolovnatých pájkách [4]

Chemický prvek	Vlastnosti	Chemický prvek	Vlastnosti
Měď (Cu)	zvyšuje pevnost	Nikl (Ni)	zabraňuje odsmáčení
	tvoří intermetalické sloučeniny		tvoří intermetalické sloučeniny
Stříbro (Ag)	snižuje bod tání,	Antimon (Sb)	zvyšuje pevnost
	zlepšuje smáčivost a pevnost		zvyšuje bod tání
	tvoří intermetalické sloučeniny		při 0,3 % výrazně zlepšuje smáčivost
Bismut (Bi)	snižuje bod tání	Zlato (Au)	vzácný prvek - drahý
	zlepšuje smáčivost		tvoří intermetalické sloučeniny
	těžký kov, vhodná náhrada za olovo		způsobuje křehkost
	mnohem méně toxický než olovo		vzniká mnoho strusky
Zinek (Zn)	nízký bod tání	Germanium (Ge)	zabraňuje oxidaci
	nízká cena		snižuje tvorbu odpadní strusky
	podporuje oxidaci pájky		zvyšuje pevnost v tahu
	zhoršuje smáčecí charakter.		snižuje vývoj mikrotrhlin

2.1.1 Pájecí slitina SAC

Jak již bylo uvedeno, jedná se o pájecí slitinu, která je složená z cínu, stříbra a mědi. Poměr jednotlivých složek se může měnit a určuje nám mechanické vlastnosti pájky. Přibližná teplota tavení je 217 °C. Hlavním zástupcem této slitiny je pájka s označením SAC 305 (96,5 % Sn, 3 % Ag a 0,5 % Cu). Výhodou této pájky je možnost při využití ve vyšších pracovních teplotách. Všechny pájecí slitiny SAC jsou schopny odolávat teplotě okolo 175 °C bez větší degradace pájeného spoje. Dále v těchto slitinách dochází ke vzniku intermetalických sloučenin, které mají vliv na životnost pájeného spoje. Konkrétně se jedná o sloučeniny Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn a Ag_3Sn . Tato pájka je ideální náhrada za zakázanou olovnatou pájku Sn/Pb, v případě mechanických vlastností se jí plně vyrovná. [3] [6]

2.1.2 Pájecí slitina SC

Je to slitina cínu a mědi. Opět se jedná o pájecí slitinu, která má dobré mechanické vlastnosti. Oproti pájce SAC je rozdíl především v jiné teplotě tání (227 °C) a horší smáčivosti. Tzn., že se slitinami SAC se lépe pracuje. Nejpoužívanější slitina pájky je při složení 99,3 % Sn a 0,7 % Cu. Ke vzniku intermetalických sloučenin zde dochází taky, konkrétně se jedná o sloučeninu Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn . [3] [5]

Dále existuje například SN100C, která oproti pájce SC obsahuje nepatrné množství (0,01 % Ni a 0,005 % Ge) niklu a germania. Tyto prvky ovlivňují vlastnosti pájky jako např. smáčivost. Velkou výhodou je menší agresivita vůči nerezové oceli a dalším materiálům pájecí lázně.

2.1.3 Pájecí slitina SA

Slitina cínu a stříbra. Nejpoužívanější pájecí slitina SA je při složení 96 % Sn a 4 % Ag. Teplota tání se udává 221 °C. Jedná se opět o slitinu pájky, která má díky obsaženému stříbru dobré mechanické vlastnosti. U těchto pájek vzniká intermetalická sloučenina, konkrétně se jedná o sloučeninu Ag_3Sn . [3]

2.1.4 Pájecí slitina SB

Slitina cínu a bismutu. Jedná se o pájecí slitinu s velmi nízkým bodem tavení. Jejich velká výhoda je nízká cena, proto se těchto pájek používá u spotřební elektroniky. Naopak jejich mechanické vlastnosti jsou horší, než u výše zmíněných slitin pájek. Zástupcem této pájky je např. Sn42-Bi58. Teplota tavení je 139 °C. U těchto pájek nedochází ke vzniku intermetalických sloučenin. [3]

2.2 Povrchové úpravy DPS

Pomocí povrchových úprav DPS můžeme změnit vlastnosti pájeného spoje. Především se jedná o zlepšení pájitelnosti a ochranou před oxidací. Další výhodou může být zajištění dlouhodobé skladovatelnosti. Používané povrchové úpravy jsou popsány níže.

2.2.1 HASL (Hot Air Solder Leveling)

Při této metodě se deska ponořuje do roztavené pájky, poté se pomocí proudu horkého vzduchu odstraňuje přebytečná pájka. Takto povrchově upravená deska je velmi odolná proti oxidaci. Nevýhodou této metody je velké teplotní zatěžování samotné desky a výsledná rovinnost desky není dobrá. [7] [8]

2.2.2 ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)

Jedná se o chemické nanášení zlata přes vrstvu niklu. Nejprve se chemicky nanese vrstva niklu, a poté se imersně nanáší zlato bez přítomnosti redukčních činidel a elektrického proudu. [7] [8]

2.2.3 OSP (Organic Solder Protectives)

Před samotným nanesením povrchové úpravy se nejprve měděný povrch pomocí ultrazvuku zbaví všech nečistot. Následně jsou desky ponořené do lázně organických inhibitorů. Při této metodě nejsou desky vystaveny velké teplotní zátěži jako u HASL. Nevýhodou je krátká skladovací doba. [7] [8]

2.2.4 Imersní stříbro a cín

Jedná se o chemické nanášení cínu nebo stříbra. Takto upravené desky jsou vhodné pro bezolovnaté pájky. Nevýhodou je pozdější vytváření intermetalické vrstvy. [7] [8]

2.3 Intermetalická vrstva

Intermetalická vrstva vzniká sloučením minimálně dvou různých kovů a formuje se vždy na rozhraní dvou spojovaných materiálů. Tato vrstva má velký vliv na životnost a spolehlivost pájeného spoje. Tedy i na mechanické vlastnosti spoje. Vznik intermetalické vrstvy je způsoben rozpouštěním, ale i difúzí. Po ztuhnutí se zastaví vytváření pomocí rozpouštění a pokračuje difúzí v pevné fázi. Nárůst intermetalické vrstvy může dále pokračovat i při pokojové teplotě. Vzhledem k tomu, že nejpoužívanějším materiálem DPS je měď, tak nejvíce se vyskytující intermetalickou sloučeninou (IMC) je Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn . [8] [9]

U bezolovnatých pájek se vytváří větší IMC, než tomu bylo u olovnatých pájek. Je to způsobeno především velkým obsahem cínu, vyšší pájecí teplotou a i delší dobou pájení. Dále dle [10] je patrné, že na růst IMC má vliv povrchová úprava DPS, ale i použitá pájecí pasta. Růst IMC může být způsoben také vyšší teplotou přetavení, ale především pozdějším teplotním namáháním. Tento nárůst IMC má vliv na mechanické vlastnosti pájeného spoje.

3 Zkoušky pro zjištění mechanických vlastností pájeného spoje

3.1 Přehled norem

V následujících kapitolách uvedu přehled používaných norem pro zkoušení mechanických vlastností pájeného spoje. Jsou uvedeny české (převzaté) a zahraniční, převážně japonské normy.

3.1.1 České normy

- **ČSN EN 62137 Zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti - Zkušební metody pro desky s plošnými spoji s povrchovou montáží pouzder FBGA, BGA, FLGA, LDA, SON a QFN s vývody typu plošné pole.** Tato norma stanovuje zkušební metody, pravidla pro vyhodnocování kvality a spolehlivosti desek, pájecích plošek, pájecích procesů a pájených spojů.
- **ČSN EN 62137 – 1 – 1. Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje: Zkouška odolnosti proti odtržení.** Je určena pro povrchově montované součástky, kde hodnotí mechanickou odolnost mezi součástkou a substrátem pomocí mechanického namáhání v tahu.
- **ČSN EN 62137 – 1 – 2. Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje: Zkouška pevnosti ve smyku.** Určeno pro povrchově montované součástky a konektory. Zkouší odolnost pájeného spoje ve smyku.
- **ČSN EN 62137 – 1 – 3. Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje: Zkouška cyklickým padáním.** Určeno pro povrchově montované součástky. Hodnotí pevnost pájených spojů větších součástek a dalších komponentů. Využití především u testování pro mobilní součástky (případ, kdy mobilní zařízení upadne).
- **ČSN EN 62137 – 1 – 4. Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje: Zkouška cyklickým**

- ohybem.** Určeno pro povrchově montované součástky. Pomocí cyklického ohýbání se hodnotí pevnost pájených spojů mezi vývody součástek a ploškami na substrátu.
- **ČSN EN 62137 – 1 – 5. Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje: Mechanická únavová zkouška smykem.** Určeno pro povrchově montované součástky. Po povrchové montáži součástky se provádí cyklická mechanická smyková deformace pájených spojů.
 - **ČSN EN 62137-3 Technologie montáže elektroniky - Část 3: Směrnice pro volbu metod zkoušek vlivu prostředí a zkoušek trvanlivosti pro pájené spoje.** Tato směrnice popisuje výběr metody pro zkoušení spolehlivosti pájených spojů.
 - **ČSN EN 60068-2-58 ed. 2 Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-58: Zkoušky - Zkouška Td: Metody zkoušení součástek pro povrchovou montáž (SMD) - pájitelnost, odolnost proti rozpouštění metalizace a proti teple při pájení.** Tato norma stanovuje odolnost bezolovnatých pájecích slitin proti teple při pájení a odolnost proti rozpouštění metalizace.
 - **ČSN EN 60068-2-69 ed. 2 Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-69: Zkoušky - Zkouška Te: Zkoušení pájitelnosti elektronických součástek pro technologii povrchové montáže (SMD) metodou smáčecích vah.** Pomocí metodou smáčecích vah určuje pájitelnost vývodů součástek pro povrchovou montáž.
 - **ČSN EN 60068-2-77. Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-77: Zkoušky - Zkouška 77: Pevnost těla součástky a zkouška úderem.** Cílem této zkoušky je zjistit mechanické namáhání SMD součástky během montáže a po ní.
 - **ČSN EN 60749 – 19 Polovodičové součástky - Mechanické a klimatické zkoušky - Část 19: Zkouška pevnosti čipu stříhem.** Není vhodná pro zkoušení čipové plochy větší než 10 mm². Metoda je založena na měření síly působící na čip a zaznamenání poruchy.
 - **ČSN EN 60749-22 Polovodičové součástky - Mechanické a klimatické zkoušky - Část 22: Pevnost spoje.** Cílem této zkoušky je změřit pevnost spoje, popřípadě stanovit požadavky na pevnost spojů.

3.1.2 Zahraniční normy

- **IPC/JEDEC-9703: Mechanical shock test guideline for solder joint reliability.** Mezinárodní norma pro povrchově montované spoje. Ověřuje se pomocí mechanického nárazového testu.
- **IPC SM-785 Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments.** Tato norma poskytuje informace pro zrychlené testování povrchově montovaných součástek. Dále se zabývá vyhodnocováním naměřených hodnot.
- **JEITA ET-7409/103 Surface mount technology -Environmental nd endurance test methodsfor solder joint of surface mount devicePart 103: Torque shear strength test.** Jedná se o mechanickou zkoušku krutem pro ověření mechanické vlastnosti pájeného spoje.
- **JIS Z 3198-2 Testing of Mechanical Characteristics for Lead-free Solder.** Jedná se o normu, která specifikuje metodu pro zjištění mechanických vlastností pájeného spoje. Konkrétně se jedná o zkoušku tahem.
- **JIS Z 3198-5 Tensile Tests and Shear Tests on Solder Joints For Lead-free Solder.** Zkouška pro testování pájeného spoje, výhradně pro bezolovnaté pájky. Specifikuje metody pro tahové a smykové zkoušky pájeného spoje.
- **JIS Z 3198-7 Test methods for lead-free solders -- Part 7: Methods for shear strength of solder joints on chip components.** Norma specifikuje zkušební metody pro ověření mechanických vlastností pájeného spoje ve smyku.
- **JEDEC JESD 22B109A Flip Chip Tensile Pull Test.** Zkušební metoda pro posouzení pevnosti pájeného spoje a určení jeho lomu. Určuje především pevnost připájení jednotlivých součástek. Jedná se o destruktivní metodu.
- **JEDEC JESD 22B115A Solder Ball Pull.** Norma k ověření mechanických vlastností kuličkových vývodů.
- **JEDEC JESD 22-B117A Solder Ball Shear.** Jedná se o normu, která testuje mechanickou odolnost ve smyku pro kuličkové vývody. Jedná se o destruktivní metodu.

3.2 Mechanické namáhání

Mechanické namáhání způsobuje únavu pájeného spoje. To se poté může projevit snížením jeho mechanických vlastností a i mechanickým narušením celého pájeného spoje [2].

Rozlišujeme dva typy mechanického namáhání [2]:

- externí (působí zvenčí na pájený spoj, např. vibrace),
- interní (jedná se např. o tepelné namáhání, spoj je namáhán v důsledku změn vnitřních poměrů).

3.3 Mechanické zkoušky pájeného spoje

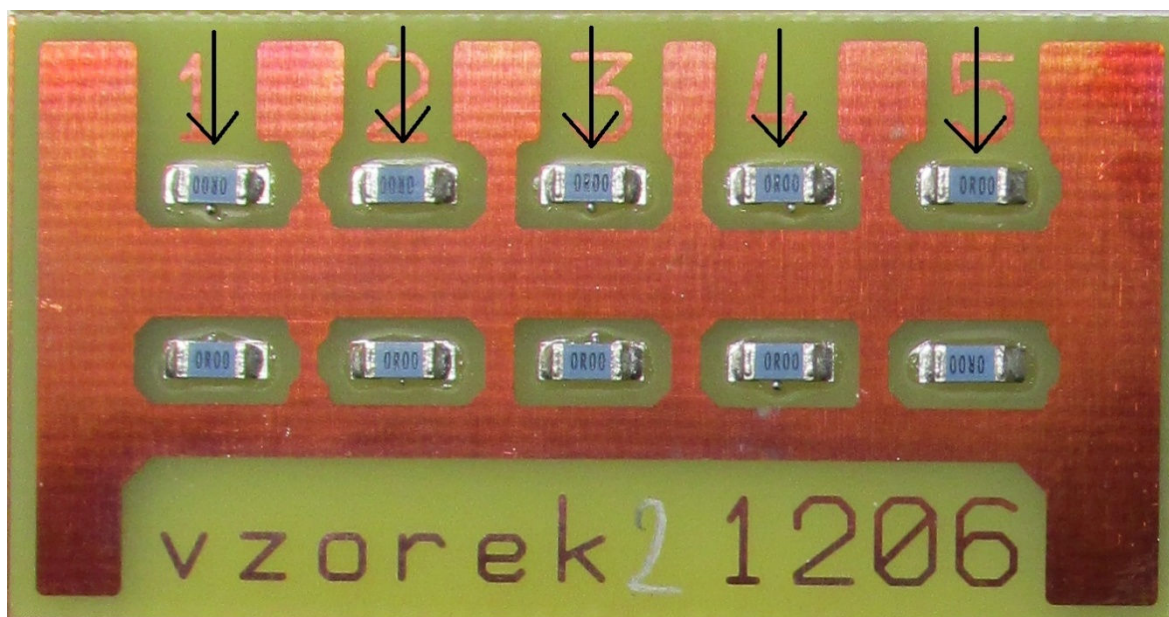
Mezi testy pájeného spoje se řadí mechanické, elektrické a optické [18]. Z důvodu zadání mé bakalářské práce se budu v následující kapitole zabývat pouze mechanickými zkouškami pájeného spoje. Především se budu zabývat mechanickou zkouškou ve stříhu (smyku), kterou dále využiji v praktické části této bakalářské práce.

Mechanické testování se provádí stříhem, vibracemi, krutem, ohybem, tahem atd. a snažíme se v nich znázornit mechanické namáhání pájeného spoje za působení vnějších sil v závislosti na čase. Veškeré testy vedou k analyzování mechanických vlastností pájeného spoje. Všechny mechanické zkoušky jsou destruktivní. [11]

3.3.1 Zkouška stříhem

Tato metoda je definována a popsána v normě ČSN EN 60749 – 19 jako zkouška pevnosti čipu stříhem nebo normou ČSN EN 62137 – 1 – 2 jako zkouška pevnosti ve smyku. Testování ve smyku je založeno na destruktivní metodě pro vyhodnocení trhlin, poškození pájeného spoje a zjištění potřebné síly k odtržení součástky od DPS. Slouží ke zjištění pevnosti pouze u povrchově montovaných součástek. Nehodí se pro testování vývodových součástek, flip – chip technologii, flexibilní substráty a pro velikost pájené

plochy větší než 10 mm^2 . Při použití tohoto testu se měří potřebná síla k odtrhnutí povrchově montované součástky. Potřebná síla je především závislá na druhu použité pájky a výskytu trhlin ve spoji vzniklých při přetavení. [12] [11] [14] Směr působení síly při zkoušce je znázorněn na obrázku 3.1.

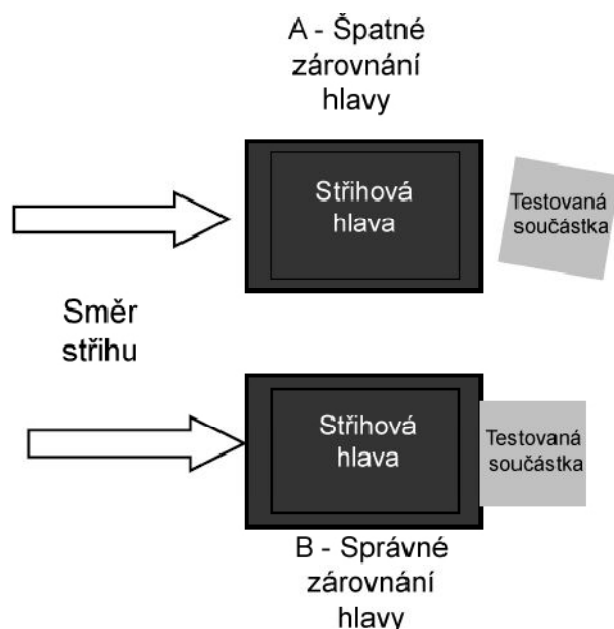


Obr. 3.1 Směr působení síly při zkoušce stříhem

Tento test se ve většině případů provádí za pokojové teploty (cca $21 \text{ }^\circ\text{C}$). Je ho možné provést i za zvýšených teplot nebo po teplotním cyklování. Teplotní cyklování je uvedeno také v normě ČSN EN 62137 – 1 – 2 a dle normy je doporučeno cyklování od $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ do $+125 \text{ }^\circ\text{C}$, kdy nárůst teploty od spodní hranice po horní je 30 minut. Jako střední počet cyklů je doporučeno 500 a maximální 1000. Desku je nutno po teplotním cyklování nechat temperovat v pokojové teplotě nejméně 4 hodiny. [11] [12] [14]

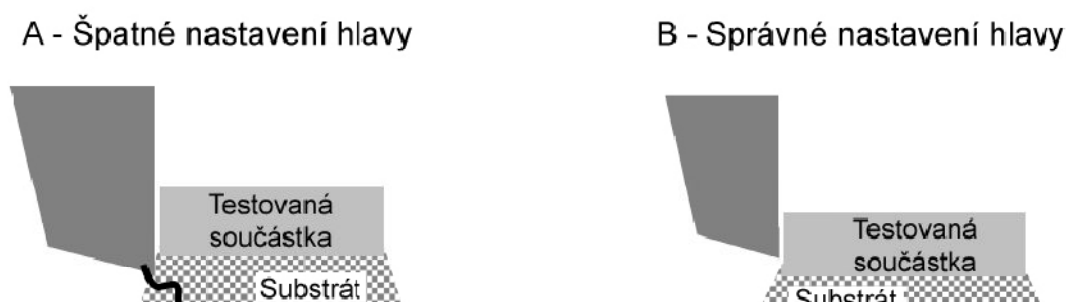
Při samotném testu (trhání součástky) je důležité správné nastavení trhací hlavy, to můžeme vidět na obrázku 3.2. Je velmi důležité, aby trhací hlava byla rovnoběžně s testovacím vzorkem (trhanou součástkou). Při nedodržení rovnoběžnosti bude trhací stroj

působit jinou silou na jiné místo a vyhodnocení pevnosti ve stříhu bude zcela zkreslené. Dále může dojít k předčasnému popraskání pájky → opět zkreslené vyhodnocení. [13] [14]



Obr. 3.2 Zárovnání stříhové hlavy (převzato z [21])

Další chyba, která může vést ke špatnému vyhodnocení pevnosti pájeného spoje je špatné nastavení výšky hlavy. Dle normy je nutné, aby stříhová hlava tlačila do $\frac{3}{4}$ výšky zkoušené součástky. Jen tak je možno zajistit, že stříhová hlava bude působit na co největší boční plochu součástky a přitom nenastane situace, aby hlava jela po desce. Tento problém je zachycen v obrázku 3.3. Před zahájením testu se nastavuje také rychlost stříhové hlavy. Doporučená rychlost posuvu je od 0,5 – 9 mm/min. V poslední řadě je taky nutné pečlivé upevnění desky, tak aby nedošlo k jejímu posunu. Jako výsledek tohoto testu je zaznamenání síly potřebné k odtržení povrchově montované součástky. [11] [8]



Obr. 3.3 Nastavení výšky stříhové hlavy (převzato z [21])

3.3.2 Zkouška odolnosti proti odtržení

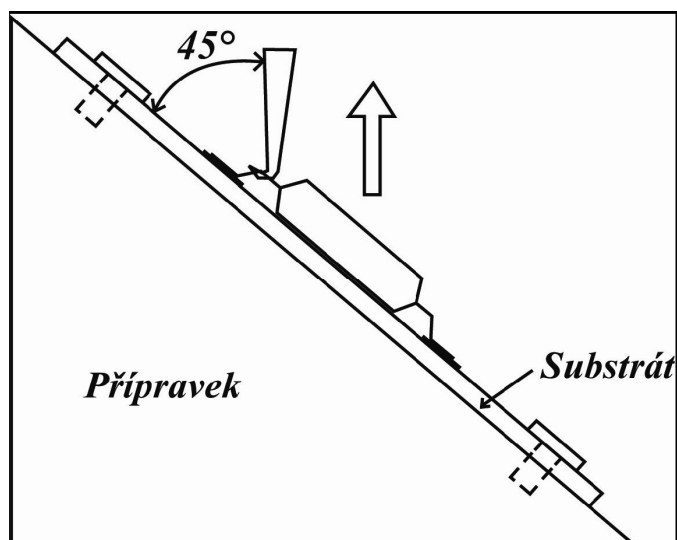
Metodu popisuje norma ČSN EN 62137 1 – 1. Opět je to zkouška pro povrchově montované součástky, kde se vyhodnocuje pevnost pájeného spoje v tahu a v případě potřeby i po teplotním cyklování. [15]

Při zkoušce součástku upevníme do přípravku, který nám zajistí, že tahová síla bude působit na desku se součástkou pod úhlem 45 °. [15]

V případě použití teplotního cyklování je postup stejný jako při zkoušce stříhem, tzn., je nutné dodržet doporučené cyklování od -40 °C do + 125 °C a nárůst teploty od dolní hranice po horní je opět 30 minut. Střední počet cyklů je 500 a maximální 1000. Po teplotním cyklu se nechá deska temperovat nejméně 4 hodiny na pokojovou teplotu. Rychlost tahu působící na součástku je doporučena na 0,5 mm/min. [15] Způsob odtržení součástky od desky je zachycen na obrázku 3.4.

Jedná se o destruktivní metodu a můžeme zjistit následující poruchy [15]:

- utržení pájeného spoje od kontaktní plochy nebo utržení pájeného spoje i s kontaktní plochou,
- utržení některé nožičky od součástky,
- utržení mezi intermetalickou vrstvou.



Obr. 3.4 Zkouška odolnosti proti odtržení (převzato z [15])

3.3.3 Zkouška cyklickým padáním

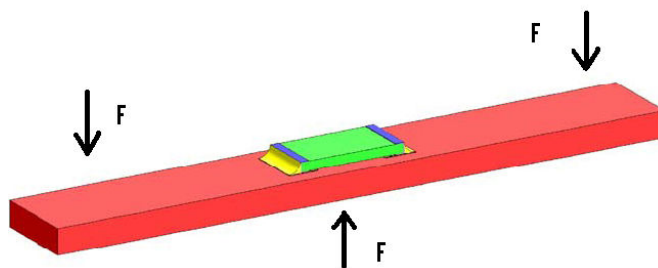
Podrobný popis této metody najdeme v normě ČSN EN 62137 1 – 3. Tato metoda je pro povrchově pájené součástky a určuje pevnost pájeného spoje. Využívá se především pro větší součástky s více vývody, které se uplatňují především u mobilních zařízení. [16]

Zkouška se provádí cyklickým padáním z výšky 1,5 m nebo 0,75 m. Zkoušený vzorek se umísťuje do mechanismu, který umožní nasimulovat opakovaný pád z dané výšky. Pomocí tenzometru, který se upevní na povrch desky, měříme tlak. Pomocí dalšího připojeného zařízení sledujeme přerušení elektrické vodivosti. Zařízení musí být schopno zaznamenat přerušení i na 100 μ s. Jakékoliv přerušení je bráno jako porucha a pájený spoj nevyhověl. Mezi nejčastější příčiny přerušení patří trhliny v pájce, přerušení povrchového pokovení nebo trhlina v pokoveném otvoru. [16]

3.3.4 Zkouška cyklickým ohybem

Popis této zkoušky pro povrchově montované součástky typu QFP a BGA najdeme v ČSN EN 62137 – 1 – 4. Vyhodnocuje mechanické vlastnosti pájeného spoje. Využívá se především pro sledování mechanického namáhání tlačítek mobilních zařízení. [17] [5]

K tomuto testu je potřeba speciálního přípravku, který se skládá ze dvou krajních hrotů působících stejně orientovanou silou a jednoho hrotu působící na střed testované desky, ale opačně orientovanou. Prostřední hrot působí na desku a způsobuje tak její ohyb. Dále během testu se měří pomocí připojených vodičů elektrický odpor a okamžik elektrického přerušení. Zařízení by mělo být schopné zaznamenat přerušení dlouhé 10 až 100 μ s. Doporučená rychlost prohýbání desky se volí 0,5 mm/s, maximální průhyb desky 1 až 4 mm (volí se dle předběžné zkoušky pro každou desku). Během testu se provádí několik tisíc cyklů. Záznamové zařízení nám zaznamenává posuv, sílu a počet cyklů. Způsob působení síly na testovanou součástku je zachycen na obrázku 3.5. [17] [5]

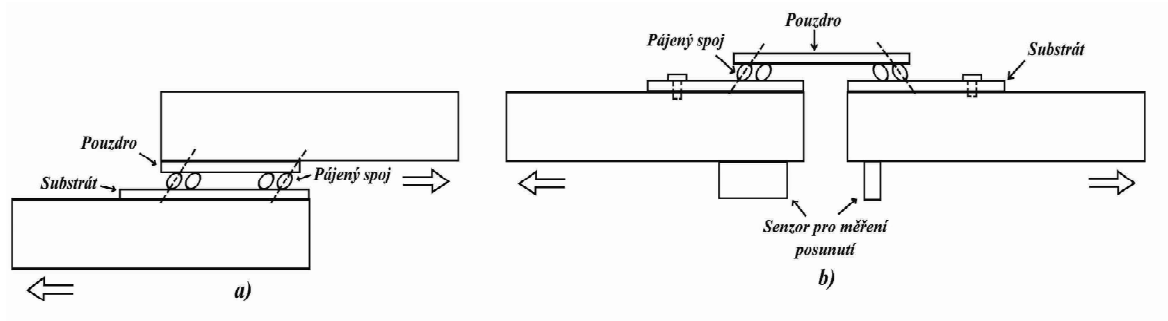


Obr.3.5 Zkouška ohybem [11]

3.3.5 Mechanická únavová zkouška smykem

Zkouška je pro povrchově montované součástky typu BGA a popisuje ji norma ČSN EN 62137 - 1 - 5. Zkouší se pomocí mechanického nebo teplotního cyklování. Během mechanického testování se zjišťuje mechanická odolnost pájeného spoje. K vykonání testu je opět potřeba speciálního přípravku. Na tomto přípravku musí být možnost nastavení rozsahu a rychlosti posunutí. Poté spoj je opakovaně zatěžován smykovou silou, dokud nedojde k jeho selhání. Rozsah posunutí se nastavuje na $\pm 0,001$ až $\pm 0,1$ mm. Rychlost posunu na 0,001 až 0,01 mm/s. Test je přerušen (ukončen) při určitém poklesu síly např. 20 %, nebo při elektrickém přerušení. Přístroj dále po ukončení testu zaznamená počet cyklů. Na obr. 3.5

jsou vidět dva způsoby únavové zkoušky smykem pro hotové sestavy s již zapájenou součástí. [18]



Obr. 3.5 Mechanická únavová zkouška smykem [18]

4 Strojní pájení přetavením

Tato metoda pájení se skládá ze dvou hlavních částí. Za prvé musíme nanést pájecí pastu na pájecí plochy a osadit součástky. Jako druhý krok následuje samotné přetavení. Pro získání kvalitního pájeného spoje je potřeba dodržet správnou metodu nanesení pájecí pasty a především teplotní profil. Dále je nutné zvolit vhodnou metodu přetavení, viz kapitola 4.1. Velkou výhodou je možnost pájení i opravdu malých roztečí (0,3 mm). [2]

4.1 Používané metody pro pájení přetavením

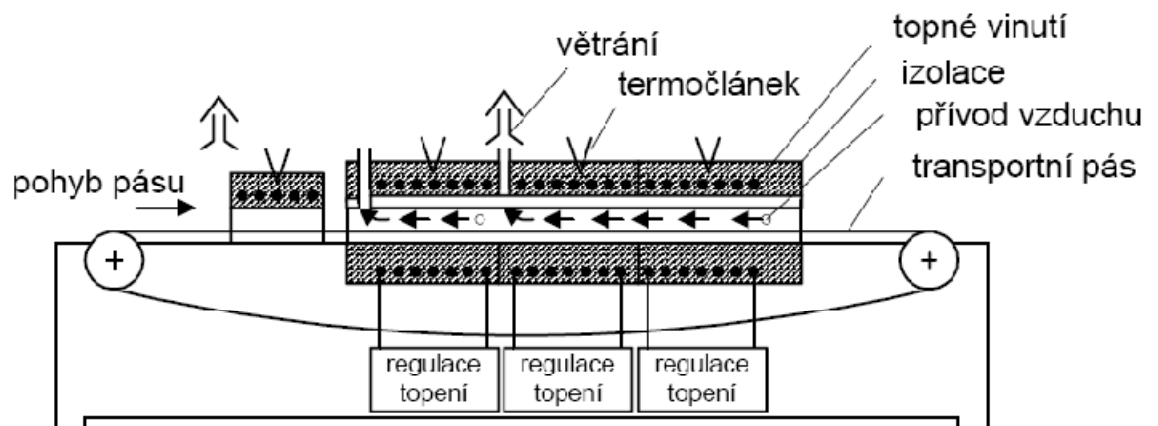
Metody pájení přetavením dělíme dle způsobu ohřevu [19]:

- pájení proudem horkého plynu (konvekční pájení),
- pájení kondenzační (v kondenzovaných parách),
- pájení zářením (infračerveným),
- pájení laserem,
- pájení vyhříváním nástrojem (impulsní),
- pájení ohřevem horké desky nebo pásu.

4.1.1 Konvekční pájení

Využívá se přirozené nebo také nucené konvekce. V dnešní době většina moderních pecí využívá nuceného proudění (konvekce). Teplo nutné k přetavení pájecí pasty se získá průchodem ohřátého plynu (vzduch, dusík nebo vodík) pájecím prostorem. [2] [20]

Dnešní pece se konstruují jako průběžné s dopravníkem. Jsou rozděleny do 3 až 4 nezávislých zón. Plyn nebo horký vzduch je přiváděn pomocí trysek. Dále je důležité zabránit šikmému proudění vzduchu, mohlo by dojít k posunu součástek. K dosažení optimálního teplotního profilu můžeme regulovat rychlost dopravníku nebo samotnou teplotou v jednotlivých zónách. [20] [21] Schéma průběžné pece s dopravníkem je na obrázku 4.1.



Obr.4.1 Průběžná pec s dopravníkem (převzato z [23])

Výhody konvekčního pájení [2]:

- velká citlivost řízení teploty,
- možnost pájení po obou stranách,
- vyšší výkon,
- necitlivost k barvám.

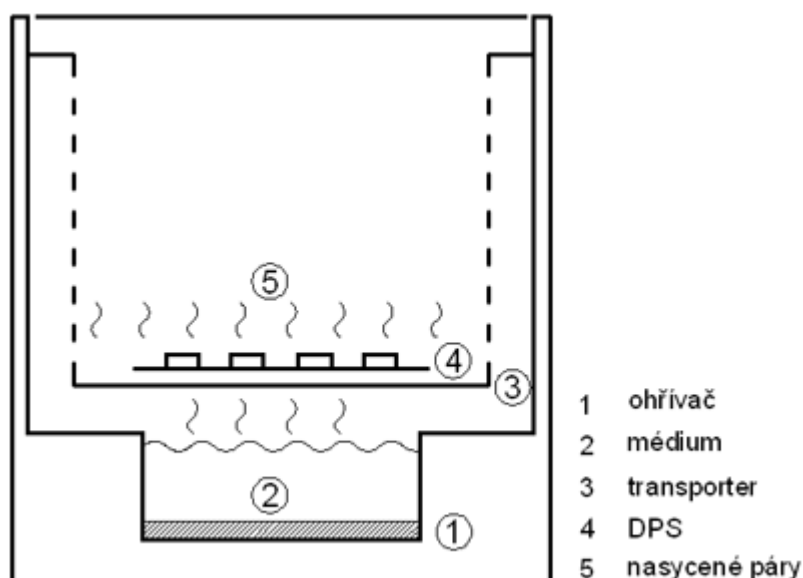
Nevýhody konvekčního pájení [2][20][21]:

- oproti jiným metodám jsou zapotřebí delší doby pájení,
- u přímého pájení bez ochranné atmosféry dochází k vyšší oxidaci,
- nižší účinnost (20 – 30 %).

4.1.2 Kondenzační pájení (pájení v parách)

Probíhá v uzavřené nádobě, kde je energie předávána na principu kondenzace nasycených par na chladnějším povrchu (deska, součástky). [19]

Uzavřená nádoba má vyhřívané dno, ve kterém je nutné zahřát inertní kapalinu na bod varu (je přesně definován). Dále je v nádobě vertikálně se pohybující rošt, na který se umísťuje substrát se součástkami. Substrát se umísťuje do předem přehřáté oblasti. Je důležité vložit substrát velmi pomalu, zamezíme tím vzniku tepelného šoku. Při umístění substrátu nad inertní kapalinou předávána pomocí nasycených par energie, dokud nedosáhne teploty páry a nedojde k přetavení. Po přetavení bývá substrát ochlazen a pára se změní na kapalinu. Mezi výhody tohoto způsobu pájení patří zejména přesně definovaný bod varu kapaliny a tím zaručenou konstantní teplotu. Dále při této metodě nedochází k oxidaci povrchu pájeného spoje, neboť kapalina neobsahuje volný kyslík. [19] [20] [21] Princip kondenzačního pájení je vidět na obrázku 4.2.



Obr. 4.2 Schéma kondenzační pece (převzato z [23])

4.1.3 Pájení infračerveným zářením

V tomto pájení získáváme energii potřebnou k přetavení z IR zářičů, které jsou umístěny nad, ale i pod deskou. Deska je umístěna na pohyblivém pásu. Velká nevýhoda této metody je nerovnoměrný ohřev. Tmavé součástky absorbují lépe vyzářenou energii z IR zářičů a dochází k nerovnoměrnému přetavení. Tím se velmi ovlivňuje samotná jakost pájeného spoje.

Další teplotní rozdíl nastává s velikostí součástek. Jako výhodu této metody můžeme uvést vysokou účinnost, která se pohybuje kolem 60 až 70 %. [20]

4.1.4 Pájení laserem

Je realizováno pomocí optického laseru, který prochází přes optické zařízení a je směřován pod úhlem 30 ° od kolmice substrátu na požadované místo. Využití najde v případě selektivního pájení součástek s velmi malými roztečemi vývodů. Velká výhoda této metody je v minimálním teplotním namáhání okolních součástek při samotném pájení. Mezi nevýhody jednoznačně patří nízká produktivita a vysoká cena. [20]

4.1.5 Pájení vyhřívaným nástrojem (impulsní)

Jedná se o metodu, která se využívá především při opravách jednotlivých součástek. Dále je využívána pro selektivní pájení součástek, které nemohou být pájeny společně na DPS s ostatními součástkami. Jedná se především o velmi citlivé součástky na teplotu. Nevýhoda této metody je nízká produktivita. [20] [21]

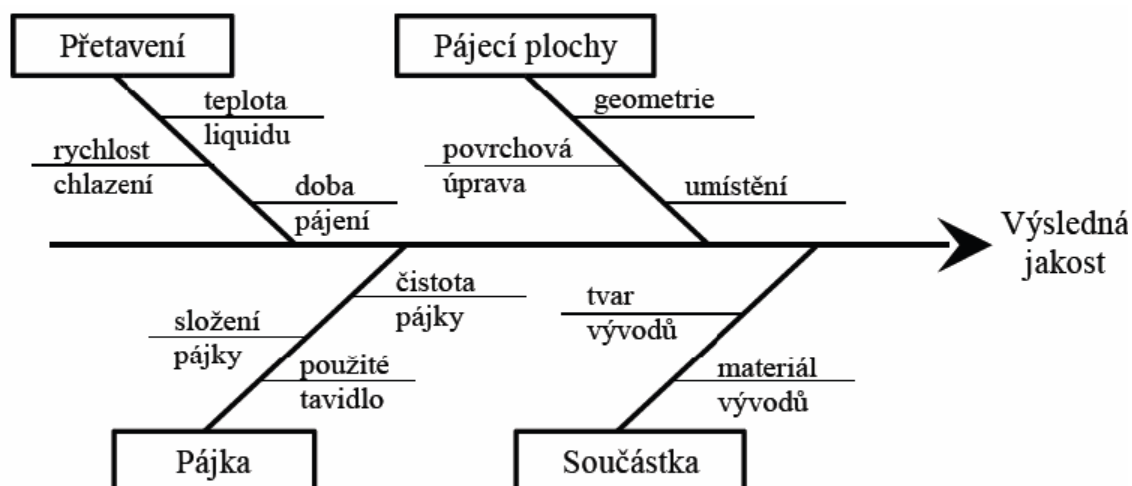
4.1.6 Pájení ohřevem horké desky nebo pásu

Využití se najde zejména pro keramické substráty, které mají výbornou tepelnou vodivost. Velmi rozšířený je zejména pro opravy v laboratorním prostředí. Jako výhodu této metody můžeme uvést rovnoměrné rozložení teploty na substrátu a optickou kontrolu během přetavení pájky. [21]

4.2 Teplotní profil pro pájení přetavením

Při pájení přetavením je nutné vždy vyzkoušet pájecí profil. Většina výrobců pájecí pasty uvádí doporučený teplotní profil, ten je ale nutno nejdříve odzkoušet a popřípadě upravit. Důvodů ke změně teplotního profilu může být několik. Mezi ty hlavní patří např. různé povrchy DPS, velikost povrchu nebo i barevné provedení. To vše ovlivňuje působení tepla na desku. Pro ověření správného přetavení můžeme využít některou z mechanických zkoušek pájeného spoje. V mnoha případech postačí i optická zkouška pájeného spoje. [2]

Teplotní profil, jak již bylo zmíněno, je u každé pájecí pasty jiný. Musí být vytvořen takový teplotní profil, aby byla zaručena maximální jakost a životnost pájeného spoje. Během pájení působí na životnost čtyři technologické procesy, které jsou zachyceny v Ishikawově diagramu, obr. 4.3. [6]



Obr. 4.3 Ishikawův diagram pro proces pájení (převzato z [22])

Všechny působící faktory na životnost spoje jsou pro lepší přehlednost uvedeny v tab. 4.1.

Tab. 4.1 Faktory působící na životnost spoje [22]

Faktory působící na životnost spoje	
Teplotní profil	Náběh teploty likvidu
	Teplota nad likvidem
	Doba likvidu
	Rychlost chlazení
Geometrie pájecích ploch	Tvar
	Velikost
	Umístění na substrátu
Materiál pájecích ploch	Čistota
	Složení
Pájka	Složení
	Čistota

Jelikož nám dnešní legislativa neumožňuje použití olovnatých pájek, budu se v následujících odstavcích zabývat teplotním profilem pro pájky bez olova. Seznam vhodných pájek pro pájení přetavením je v tabulce 4.2.

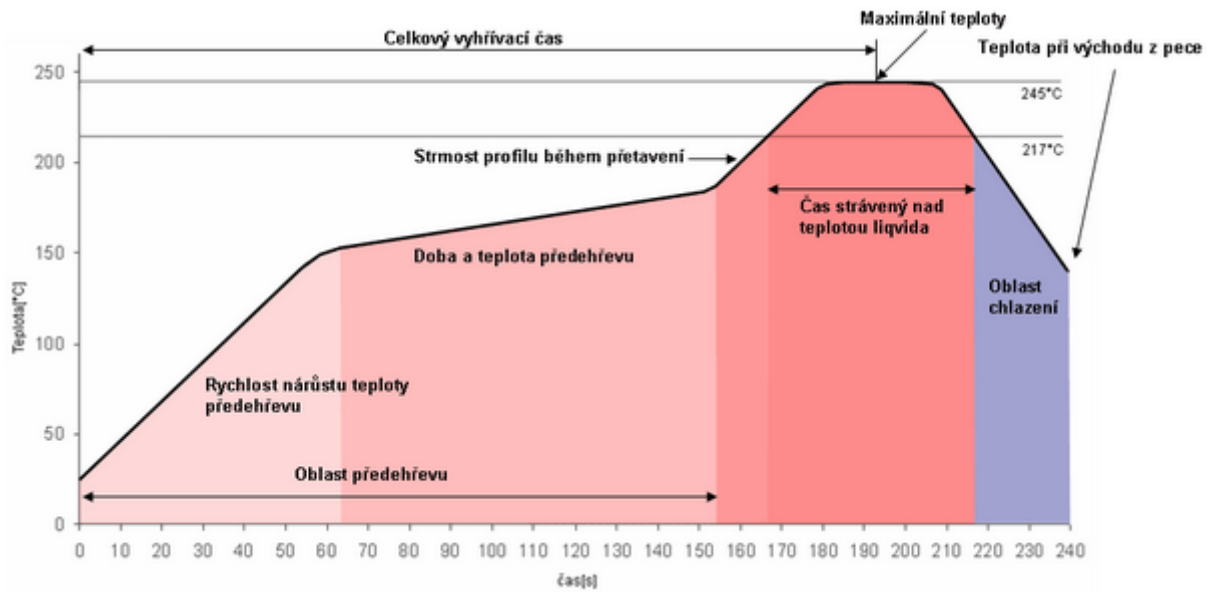
Tab. 4.2 Bezolovnaté pájky vhodné pro pájení přetavením [19]

Pájky bez olova	Teplota likvidu	Interval teplot tavení [°C]	Interval pracovních teplot pro přetavení [°C]
98Sn-2Ag		221 - 226	
96,5Sn-3,5Ag	221		240 - 250
99,3Sn-0,7Cu	227		245 - 255
96,5Sn-3Ag-0,5Cu	220		238 - 248
96,3Sn-3,2Ag-0,5Cu	218	217 - 218	238 - 248
95,5Sn-3,8Ag-0,7Cu	220	217 - 220	237 - 248
95Sn-4Ag-1Cu	220	217 - 220	238 - 248
97Sn-0,2Ag-2Cu-0,8Sb	228	226 - 228	246 - 256
96,2Sn-2,5Ag-0,8Cu-0,5Sb	225	233 - 243	
90,5Sn-2Ag-7,5Bi	216		220 - 230

Obvyklé teploty pro tání u bezolovnatých pájek jsou okolo 220 °C. Pracovní teploty pro přetavení jsou asi o 10 až 15 °C vyšší.

Dále použití bezolovnatých pájecích past vyžaduje delší samotné přetavení. Většinou 60 až 90 sekund. U olovnatých pájek to je 40 až 60 sekund. Protože při použití bezolovnatých pájek je potřeba vyšší teploty, ale i času pro přetavení, musí se počítat i s větším teplotním namáháním osazených součástek a desky plošných spojů. Ta je ve většině případů stavěna na teplotu 240 až 250 °C. Z toho vyplývá důležitý požadavek na pece, a to že musí být výborně regulovatelné a umožňovat přesné dávkování energie. [19] [22]

Na Obr. 4.4 je uveden příklad doporučeného teplotního profilu pro použití bezolovnatých pájek (konkrétně pro pájecí slitinu SAC).



Obr. 4.4 Doporučený teplotní profil pro pájecí slitinu SAC (převzato z [23])

5 Praktická část

Cílem této bakalářské práce je zjištění mechanické pevnosti pájeného spoje v závislosti na pájecím profilu. Během měření se bude hodnotit mechanická pevnost vzorků ve smyku.

5.1 Návrh vzorků pro měření

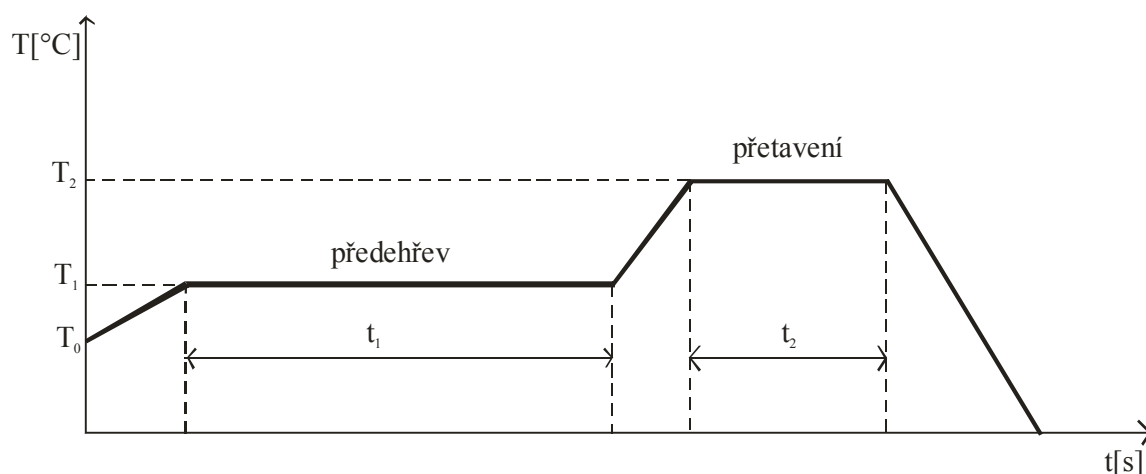
Pro experiment se celkově vyrobilo 12 DPS. Každá DPS byla navržena pro 10 SMD součástek velikosti 1206. Z těchto dvanácti desek bylo šest desek použito s vrstvou Cu a šest desek s povrchovou úpravou Sn, který byl nanesen galvanickou cestou.

K pokusu byla použita bezolovnatá pasta Sn95,5-Ag3,8-Cu0,7, která byla na desky nanesena přes šablonu. Tloušťka šablony byla změřena pomocí mikrometru a hodnota činila 120 μm . Šablona byla k tomuto pokusu použita z důvodu udržení přesného množství nanesené pájecí pasty.

Pro přetavení byla použita přetavovací pec SMT HR – 21 od firmy Elpro s.r.o. Tato pec je vybavena čtyřmi halogenovými zářiči (4 x 1500 W) a jednou topnou spirálou (800 W). Bohužel lze nastavovat pouze čtyři hodnoty a to:

- T_1 – teplota předehřevu,
- t_1 – doba předehřevu,
- T_2 – teplota přetavení,
- t_2 – doba přetavení.

Teplotní profil, který lze nastavit na peci HR - 21 je vidět na obrázku 5.1. Velkou nevýhodou dané pece je nemožnost přesného kopírování doporučeného teplotního profilu pro danou pájecí slitinu.



Obr. 5.1 Teplotní profil pece HR – 21

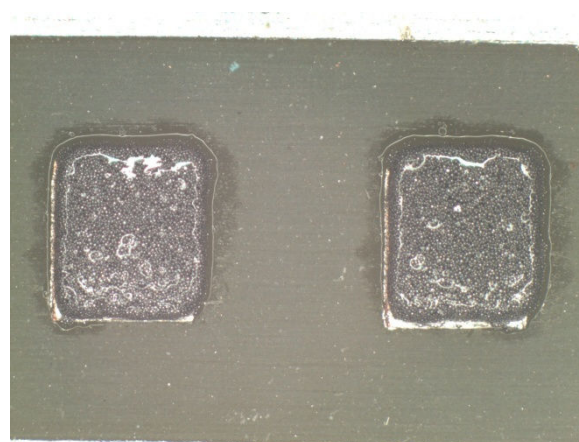
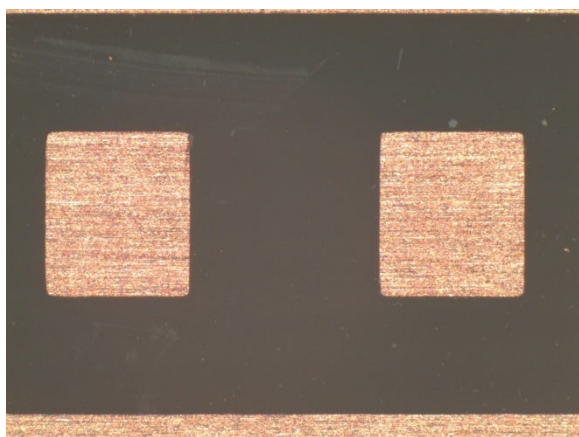
Při experimentu byly přetavovány vždy dva vzorky. Jeden s vrstvou Cu a druhý s povrchovou úpravou Sn. Pro pokus bylo regulováno s teplotou přetavení T_2 vždy pro dva vzorky od teploty 220 °C do 245 °C s krokem 5 °C.

V tabulce 5.1 jsou zpracovány hodnoty, které byly při experimentu nastavovány na peci.

Tab. 5.1 Použité teplotní profily při experimentu

Použité teplotní profily		
Číslo vzorku	DPS - Cu	DPS - Sn
1.	$T_1=130\text{ °C}$, $t_1=120\text{s}$ $T_2=220\text{ °C}$, $t_1=10\text{s}$	$T_1=130\text{ °C}$, $t_1=120\text{s}$ $T_2=220\text{ °C}$, $t_1=10\text{s}$
2.	$T_1=130\text{ °C}$, $t_1=120\text{s}$ $T_2=225\text{ °C}$, $t_1=10\text{s}$	$T_1=130\text{ °C}$, $t_1=120\text{s}$ $T_2=225\text{ °C}$, $t_1=10\text{s}$
3.	$T_1=130\text{ °C}$, $t_1=120\text{s}$ $T_2=230\text{ °C}$, $t_1=10\text{s}$	$T_1=130\text{ °C}$, $t_1=120\text{s}$ $T_2=230\text{ °C}$, $t_1=10\text{s}$
4.	$T_1=130\text{ °C}$, $t_1=120\text{s}$ $T_2=235\text{ °C}$, $t_1=10\text{s}$	$T_1=130\text{ °C}$, $t_1=120\text{s}$ $T_2=235\text{ °C}$, $t_1=10\text{s}$
5.	$T_1=130\text{ °C}$, $t_1=120\text{s}$ $T_2=240\text{ °C}$, $t_1=10\text{s}$	$T_1=130\text{ °C}$, $t_1=120\text{s}$ $T_2=240\text{ °C}$, $t_1=10\text{s}$
6.	$T_1=130\text{ °C}$, $t_1=120\text{s}$ $T_2=245\text{ °C}$, $t_1=10\text{s}$	$T_1=130\text{ °C}$, $t_1=120\text{s}$ $T_2=245\text{ °C}$, $t_1=10\text{s}$

V tomto měření byla snaha vytvořit velmi vyrovnané (stejně) vzorky. Proto, jak již bylo zmíněno, byla použita k nanesení pájecí pasty šablona. Tím bylo zaručeno rovnoměrné a přesné nanesení pasty. Pro nanesení pasty bylo nutné každou zkušební desku pevně zafixovat. Poté byla přiložena šablona a zarovnána. Samotná pájecí pasta, která byla nejprve temperována na pokojovou teplotu, byla nanesena pomocí třerky přes šablonu. Na obrázku 5.2 jsou vidět čisté pájecí plošky DPS (před nanesením pasty), na obrázku 5.3 je již nanesena pasta a vzhledem k použití šablony lze vidět její rovnoměrné a přesné nanesení na ploškách.



Obr. 5.2 Pájecí plošky před nanesením pasty. Obr. 5.3 Pájecí plošky po nanesení pasty.

Osazení zkušebních desek součástkami bylo provedeno ručně pomocí pinzety s velmi jemnými čelistmi. Byl kladen důraz na to, aby součástka byla posazena na desku na první pokus a nebylo se součástkou dodatečně hýbáno.

Na obrázku 5.4 je vidět detail DPS, která je již osazená SMD součástkou.



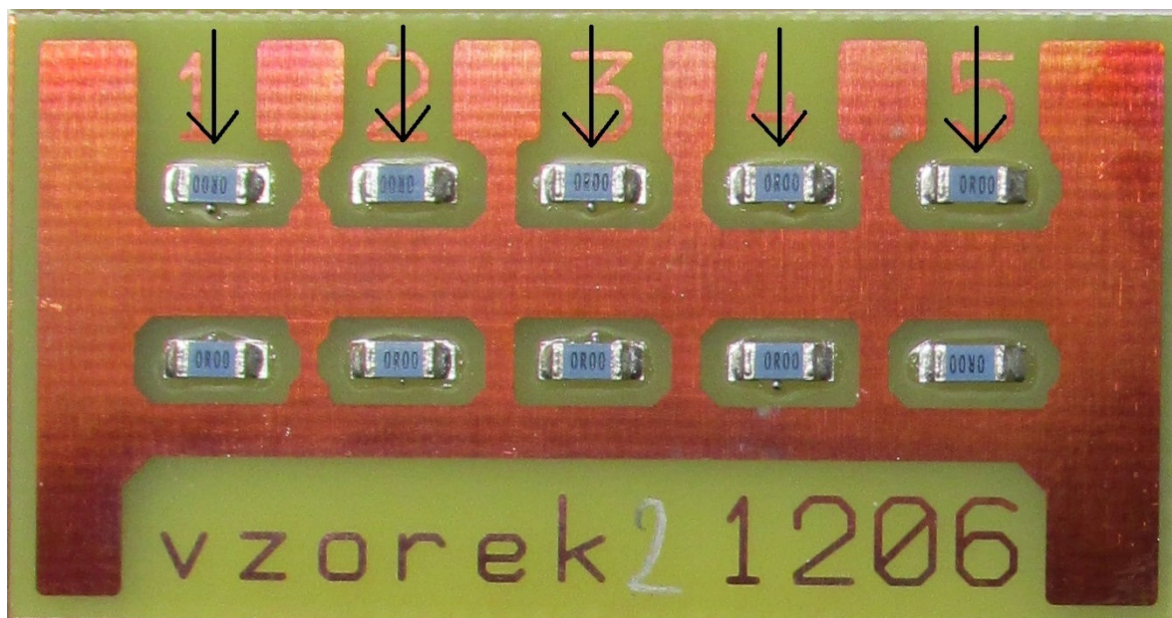
Obr. 5.4 Zkušební DPS po osazení SMD součástkou

V příloze A můžeme vidět celkový pohled na všechny přetavené vzorky. V levé části obrázku jsou vzorky, kde zkušební DPS jsou s vrstvou Cu, v pravé části je povrchová úprava Sn. Vzorky jsou v obrázku A sestupně seřazeny od nejnižší teploty přetavení (225 °C) do nejvyšší (245 °C). Dále můžeme na obrázku pozorovat vliv teploty na DPS a její povrchovou úpravu.

5.2 Měření vzorků

Samotné měření mechanické pevnosti pájeného spoje probíhalo na přístroji od firmy Labor Tech s.r.o. Konkrétní typ stroje byl použit Lab Test 3.030 s maximálním zatížením 3 kN. Pomocí tohoto stroje bylo možno určit mechanickou pevnost daných vzorků ve smyku. Pomocí dodávaného softwaru k trhacímu přístroji bylo možno zaznamenat maximální sílu

potřebnou k odtržení dané součástky od DPS. Síla působila na vzorky od shora dolů. Směr působící síly je znázorněn pomocí šipek na obrázku 5.5.



Obr. 5.5 Směr působení síly při zkoušce mechanické pevnosti ve smyku pájených spojů

5.3 Změřené a zpracované hodnoty

Změřené hodnoty maximální síly potřebné pro odtržení součástky od DPS byly dále zpracovány pomocí programu Microsoft Excel. Byl spočítán aritmetický průměr hodnot pro každou desku a medián. Zpracované hodnoty jsou v tabulce 5.2 pro DPS s vrstvou Cu a v tabulce 5.3 pro DPS s povrchovou úpravou Sn. V příloze B jsou uvedeny všechny naměřené a zpracované hodnoty. K vyloučení odlehlých výsledků byl využit Grubbsův test (T-test). Pro každý vzorek byla vypočtena směrodatná odchylka (S), aritmetický průměr a testovací kritéria T_1 pro nejmenší hodnoty a T_2 pro největší hodnoty. Tyto byly poté porovnány s kritickou hodnotou T_{krit} , která je pro Grubbsův test při 10 naměřených hodnot 0,294. Je-li T_1 (T_2) $\geq T_{krit}$, výsledek je odlehlý a je nutné jej vyloučit z testovaných hodnot [24].

Tab. 5.2 Zpracované hodnoty pro DPS s vrstvou Cu.

Mechanická pevnost [N]						
DPS - Cu						
Číslo vzorku	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Průměr	82,2	78,1	72,8	72,7	61,4	62
Medián	83,2	77,7	71,4	74,4	63,1	60,3

Tab. 5.3 Zpracované hodnoty pro DPS s povrchovou úpravou Sn.

Mechanická pevnost [N]						
DPS - Sn						
Číslo vzorku	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Průměr	57,5	60,6	59,8	63,4	54,9	56,8
Medián	60,2	58,5	63,2	60,7	53,3	58,1

Pro výpočet směrodatné odchylky byla použita následující rovnice:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (0.1)$$

Dále byla pomocí vzorců (0.2) a (0.3) vypočtena testovací kritéria T_1 pro nejmenší hodnoty a T_2 pro největší hodnoty.

$$T_1 = \frac{(\bar{x} - x_{min})}{s} \quad (0.2)$$

$$T_2 = \frac{(x_{max} - \bar{x})}{s} \quad (0.3)$$

V tabulkách 5.4 a 5.5 jsou červeně označeny hodnoty, které jsou vyšší než T_{krit} a na jejich základě byly vyřazeny hodnoty pro jejich extrémní odchylku od ostatních naměřených hodnot. Vyřazené hodnoty jsou vidět v příloze B, kde jsou v tabulkách B-1 a B-2 žlutě označeny.

Tab. 5.4 Test odlehlých hodnot pro desku s vrstvou Cu.

Grubbsův test - deska s vrstvou Cu						
vzorek	1.	2.	3.	4.	5.	6.
aritmetický průměr \bar{x}	82,2	78,1	72,9	72,7	61,4	62,0
směrodatná odchylka S	24,2	6,4	11,3	7,8	5,3	14,2
T_1 (min)	2,5	1,8	1,6	1,8	2,2	1,8
T_2 (max)	1,2	1,9	1,9	1,5	1,3	1,8

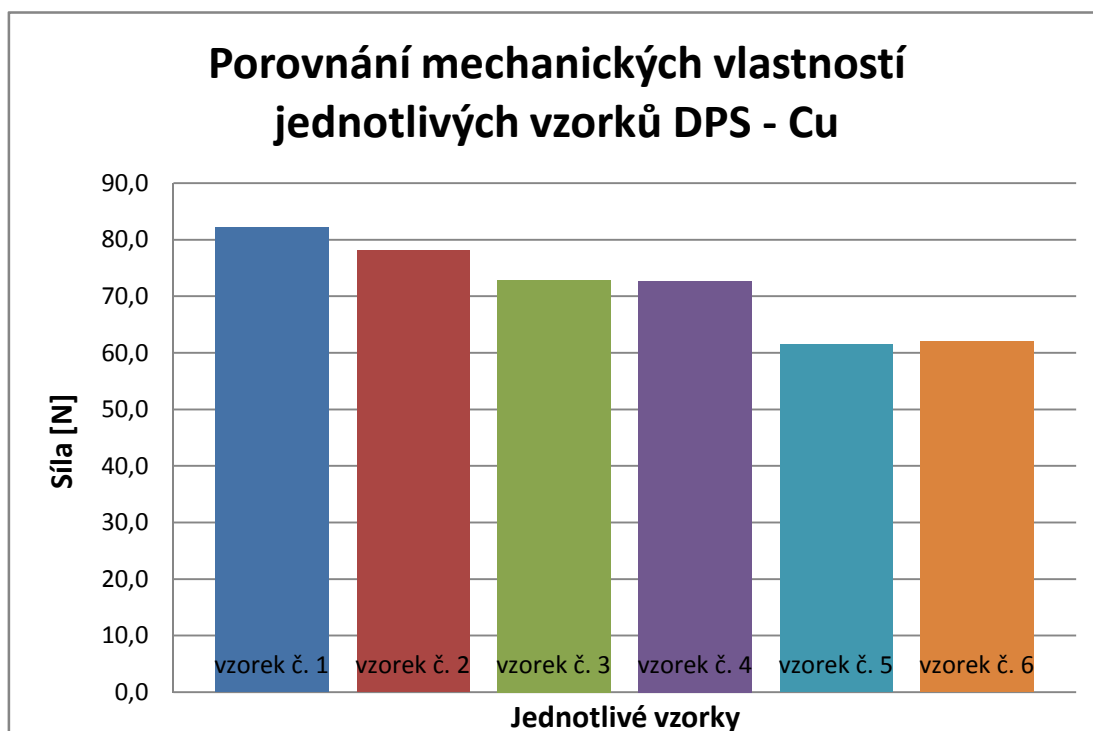
Tab. 5.5 Test odlehlých hodnot pro desku s povrchovou úpravou Sn.

Grubbsův test - deska s povrchovou úpravou Sn						
vzorek	1.	2.	3.	4.	5.	6.
aritmetický průměr \bar{x}	57,5	60,6	59,8	63,4	51,9	56,8
směrodatná odchylka S	8,7	8,6	14,5	9,2	10,5	4,3
T_1 (min)	2,0	1,6	0,4	1,3	2,3	2,2
T_2 (max)	1,2	1,9	0,9	2,2	1,3	0,9

5.4 Vyhodnocení naměřených hodnot

5.4.1 Vyhodnocení vzorků DPS - Cu

Pro srovnání mechanických pevností jednotlivých vzorků byl vytvořen sloupcový graf. Do grafu byla použita hodnota aritmetický průměr. V grafu 5.1 je vidět srovnání vzorků zkušebních desek s vrstvou Cu.

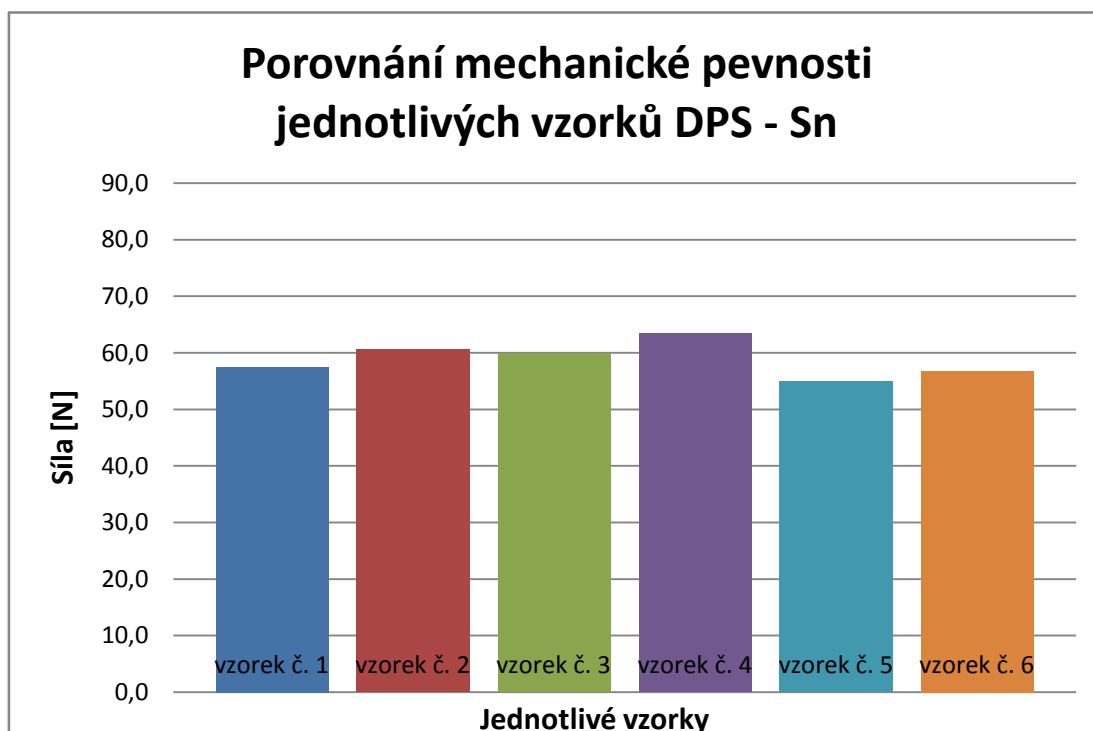


Graf. 5.1 Porovnání mechanické pevnosti jednotlivých vzorků – DPS – Cu

Z grafu 5.1 je názorně vidět, jak změna použité teploty při přetavení (deska s Cu) má vliv na mechanickou pevnost pájeného spoje. Je vidět, že desky s nižší teplotou při přetavení mají vyšší mechanickou pevnost než vzorky, u kterých byla použita vyšší teplota pro přetavení. Tento výsledek potvrzuje teoretický předpoklad. Pokles mechanické pevnosti je způsoben nárůstem intermetalické vrstvy. Její nárůst je způsoben vyšší teplotou přetavení. Další nárůst intermetalické vrstvy by následoval po vystavení vzorků zrychlenému stárnutí [10]. Největší rozdíl je vidět u vzorku číslo 1 a 5, kde rozdíl síly pro odtržení součástky od desky je 20,8 N.

5.4.2 Vyhodnocení vzorků DPS - Sn

Stejný typ grafů je vytvořen i ke vzorkům s povrchovou úpravou Sn. V grafu 5.2 je vidět srovnání vzorků s povrchovou úpravou Sn.



Graf. 5.2 Porovnání mechanické pevnosti jednotlivých vzorků – DPS – Sn

V případě použití desky s povrchovou úpravou Sn je vidět, že celková mechanická pevnost je nižší, než při použití desky s povrchovou úpravou Cu. To je dáno použitou povrchovou úpravou Sn na DPS. Dále je ale naopak patrné, že naměřené mechanické pevnosti jednotlivých vzorků jsou vyrovnanější. Z toho lze usoudit, že vzhledem k použité pájecí pastě SAC s velkým obsahem cínu a použité DPS s Sn úpravou vznikla větší intermetalická vrstva, než tomu bylo u vzorků, kde DPS byla použita s vrstvou mědi. Dále je vidět, že nárůst intermetalické sloučeniny byl u všech vzorků stejný, tedy nebyl závislý na teplotě přetavení. Jiná situace by nastala při vystavení vzorků zrychlenému stárnutí, tady již byl prokázán nárůst intermetalické vrstvy [10]. Mechanické vlastnosti vzorků s povrchovou úpravou Sn nejsou tolik závislé na teplotním profilu, jako tomu je u vzorků s vrstvou Cu. Největší rozdíl v pevnosti je u vzorků č. 4 a 5. Rozdíl síly potřebný k odtržení je 8,5 N.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo se seznámení s problematikou měkkého pájení a shrnutí různých zkoušek k ověření mechanických vlastností pájeného spoje. Pro ověření mechanické pevnosti pájeného spoje v závislosti na pájecím profilu byl v poslední kapitole navržen a proveden experiment.

V teoretické části jsem stručně shrnul základy pájení a věci ovlivňující mechanickou pevnost pájeného spoje. Zvláštní pozornost jsem věnoval mechanickým zkouškám. V práci je vypracován přehled nejpoužívanějších zkoušek, a to českých, ale i zahraničních. Dále jsem se v této práci zabýval způsoby pájení přetavením. Je zde uveden popis jednotlivých metod, a to i metoda, která byla použita v praktické části.

V praktické části byl navržen a proveden experiment pro změření mechanické pevnosti pájeného spoje v závislosti na pájecím profilu. Pro experiment bylo použito celkově 12 DPS, každá byla navržena pro 10 součástek 1206. Dále polovina DPS byla s povrchovou úpravou Sn a druhá polovina s vrstvou Cu. Pro zjištění závislosti mezi mechanickou pevností a pájecím profilem byla měněna teplota přetavení.

Díky tomuto experimentu bylo ověřeno, že pájecí profil má vliv na mechanickou pevnost a je potřeba se mu věnovat a vždy ověřovat. Ověření teplotního profilu v závislosti na pevnosti by mělo být samozřejmostí dnešních společností zaměřující se na danou problematiku. Teplotní profil musí být vždy odzkoušen pro danou desku a nelze spoléhat na doporučení výrobce pájecí pasty. Změnu teplotního profilu si může vyžádat např.: různé osazení desky, odlišné povrchy nebo různé barevné provedení. To vše ovlivňuje působení tepla na desku a i mechanické vlastnosti. Dále bylo zjištěno, že i povrchová úprava má značný vliv na mechanickou pevnost a je nutné ji vždy pečlivě vybírat pro dané potřeby.

Seznam použitých zdrojů

- [1] RUŽA a Jindřich KLŮNA. *Pájení*. 2. upravené a doplněné vydání. Praha: SNTL, 1988.
- [2] Abel, Martin: *Bezolovnaté pájení v legislativě a praxi*, ABETEC 2005, ISBN 80-903597-0-1.
- [3] PÍCHA, Jan. *Studium spolehlivosti bezolovnatého pájení* [online]. [cit. 2014-06-01]. Dostupné z:
https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/17107/DP_Spolehlivost_Bezolovnat%C3%A9ho_p%C3%A1jen%C3%AD_Jan_P%C3%ADcha.pdf?sequence=1 jan picha diplomová práce. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.
- [4] DRLÍK, Miloš. Užití bezolovnatých pájecích slitin. [online]. [cit. 2014-06-01]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/cv_bezolovo.pdf
- [5] Srovnání pájecích slitin SAC a Sn100. [online]. [cit. 2014-06-01]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/vyber-pajecich-slitin/srovnani-pajecich-slitin-sac-a-sn100/>
- [6] Jaké pájecí slitiny a jaká tavidla jsou vhodná pro bezolovnaté ruční pájení?. [online]. [cit. 2014-06-01]. Dostupné z: <http://www.pajeci-technika.cz/www-pajeci-technika-cz/5-CLANKY/10-SAC-versus-SnCu>
- [7] PELC, Miroslav. [online]. [cit. 2014-06-07]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40024. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.
- [8] PAŠKO, Martin. *Analýza změn v pájených spojích vzniklých vlivem stárnutí* [online]. [cit. 2014-06-07]. Dostupné z:
<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/3579/Diplomov%C3%A1%20pr%C3%A1ce.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Petr Stejskal.
- [9] DOSEDLA, Milan. *Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu spoje* [online]. [cit. 2014-06-07]. Dostupné z:
https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/25041/BP_Qn_mdosedla.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.

- [10] NOVÁK, Tomáš. [online]. [cit. 2014-06-07]. Dostupné z: http://www.fel.zcu.cz/uredni-desky/UD_PhD/Probihajici_SDZ_a_obhajoby/Autoreferaty/2166.pdf. Autorefeárt - Disertační práce. ZČU - Fel.
- [11] DUSEK, Milos a Christopher HUNT. Crack detection methods for lead- free solder joints. [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/mate164.pdf
- [12] LOMBERSKÝ, Filip. *Spolehlivost pájených spojů*. 2013. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/10482/BP-Spolehlivost%20pajenych%20spoju-Lomersky%20Filip.pdf?sequence=1>. Bakalářská práce. FEL, ZČU. Vedoucí práce Ing. Václav Wirth.
- [13] MCENTEGGARD, Ian. The role of micromechanical testing in microelectronics. [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: www.instron.com/wa/library/StreamFile.aspx?doc=47
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] ČSN EN 62137 – 1 – 3. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 3: Zkouška cyklickým padáním. 2009.
- [17] ČSN EN 62137 – 1 – 4. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 4: Zkouška cyklickým ohybem. 2009.
- [18] 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.
- [19] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice: Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.

- [20] JANSÁ, Vojtěch. *Pevnost pájených spojů na keramických substrátech* [online]. Brno, 2013 [cit. 2014-04-26]. 125149. Dostupné z:
<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/26947/Bakal%C3%A1%C5%99sk%C3%A1%20pr%C3%A1ce%20-%20Vojt%C4%9Bch%20Jansa.pdf?sequence=1>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Adámek, Ph.D.
- [21] LIPAŤSKÝ, Lubomír. *Porovnání vlastností pájených spojů na keramických substrátech pomocí zkoušky stříhem* [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z:
<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/12486/bakal%C3%A1%C5%99sk%C3%A1%20pr%C3%A1ce.pdf?sequence=1>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Adámek, Ph.D.
- [22] SCENDIUCH, Ivan. Pájení a bezolovnaté pájky. [online]. [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <<http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>>
- [23] Pájení v elektrotechnice. [online]. [cit. 2014-06-01]. Dostupné z:
<http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pajeni-v-elektrotechnice>
- [24] Vylučování extrémních hodnot souboru. [online]. [cit. 2014-06-07]. Dostupné z:
<http://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn2/extremy.htm>

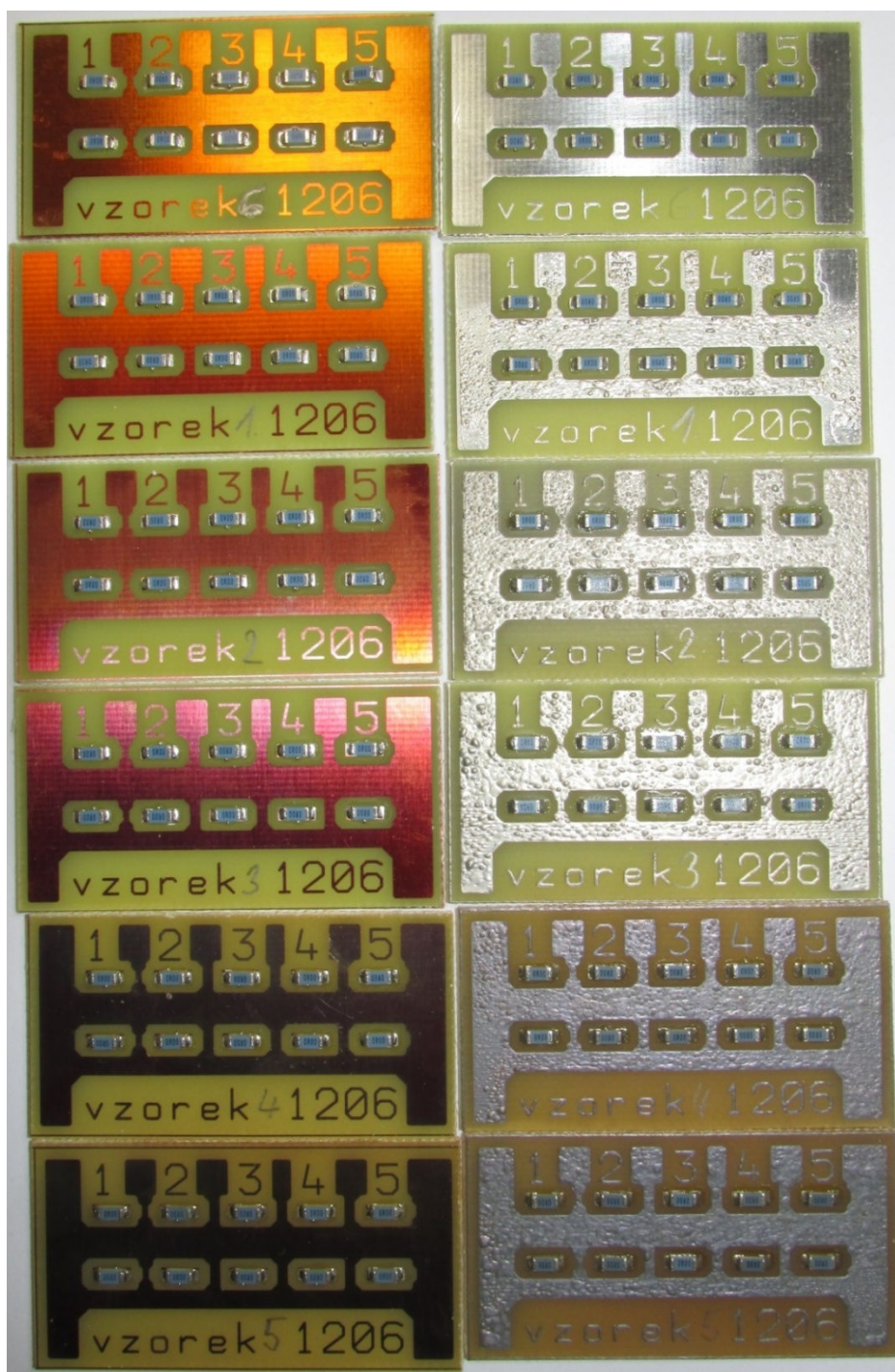
Seznam příloh

Příloha A Přetavené vzorky

Příloha B Naměřené a zpracované hodnoty praktické části

Přílohy

Příloha A: Přetavené vzorky.



Obr. A: Ukázka všech přetavených vzorků seřazených dle teploty.

Příloha B: Naměřené a zpracované hodnoty praktické části

Tab. B-1: Naměřené a zpracované hodnoty pro DPS s vrstvou Cu

Mechanická pevnost [N]							
DPS - Cu							
Číslo vzorku	Naměřené hodnoty	Průměr	Medián	Číslo vzorku	Naměřené hodnoty	Průměr	Medián
1.	83,8	82,2	83,8	4.	75,4	72,7	74,4
	16,4				70,4		
	75,0				73,4		
	85,7				79,6		
	93,5				78,2		
	56,9				58,9		
	71,0				59,4		
	99,3				84,5		
	105,5				71,9		
	69,2				75,4		
2.	90,0	78,1	77,7	5.	49,8	61,4	63,1
	79,2				62,7		
	82,4				65,2		
	81,8				56,3		
	76,3				63,6		
	83,3				68,4		
	73,1				62,0		
	75,8				56,4		
	72,3				63,9		
	66,4				65,9		
3.	62,0	72,8	71,4	6.	83,8	62,0	60,3
	93,8				53,5		
	74,8				61,8		
	77,8				66,8		
	67,2				61,7		
	77,8				36,6		
	87,5				55,5		
	65,4				58,9		
	67,9				53,5		
	54,3				87,9		

Tab. B-2: Naměřené a zpracované hodnoty pro DPS s povrchovou úpravou Sn

Mechanická pevnost [N]							
DPS - Sn							
Číslo vzorku	Naměřené hodnoty	Průměr	Medián	Číslo vzorku	Naměřené hodnoty	Průměr	Medián
1.	60,9	57,5	60,2	4.	68,5	63,4	60,7
	59,5				61,1		
	48,9				68,8		
	50,5				51,3		
	40,0				54,2		
	65,5				58,1		
	67,7				56,9		
	65,6				60,2		
	52,3				83,3		
	64,2				71,6		
2.	76,7	60,6	58,5	5.	47,3	54,9	53,3
	64,1				53,4		
	52,9				5,0		
	46,6				27,3		
	54,7				50,6		
	72,1				59,7		
	57,6				53,2		
	56,7				65,1		
	64,9				62,7		
	59,4				47,7		
3.	54,7	59,8	63,2	6.	53,6	56,8	58,1
	56,8				60,8		
	72,5				63,0		
	20,2				47,3		
	57,7				58,7		
	70,0				57,6		
	72,1				52,6		
	67,7				59,1		
	64,0				56,7		
	62,3				58,6		