

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Pájecí slitiny v elektrotechnice

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Filip ZRUBECKÝ**
Osobní číslo: **E12B0355P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Pájecí slitiny v elektrotechnice**
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 :

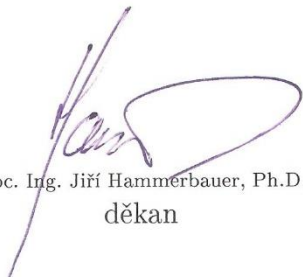
1. Seznamte se s jednotlivými druhy pájecích slitin používaných v elektrotechnice.
2. Vypracujte přehled používaných druhů pájecích slitin.
3. Porovnejte jednotlivé pájecí slitiny, popište jejich výhody a nevýhody a možnosti uplatnění těchto slitin v praxi.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


- 1. P. Mach, V. Skočil, J. Urbánek Montáž v elektronice**
- 2. R. J. Klein Wassink Soldering in electronics**
- 3. Internetové zdroje**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Hirman**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace

Tato práce pojednává o pájecích slitinách využitelných pro elektrotechniku, popisuje jejich chování, vlastnosti a využitelnost pro různé technologické procesy pájení. Dále je v práci zmíněna legislativa týkající se pájení a problémy přechodu z olovnatých slitin na neolovnaté.

Klíčová slova

Pájení, slitina, pájitelnost, smáčení, teplota, eutektium, teplota tání, kompozice, cín, olovo, stříbro, měď, bismut, fázový diagram, bezolovnaté slitiny, olovnaté slitiny.

Abstract

This work aims to describe solder alloys used for electrical engineering, their behavior, properties and usability for various technological soldering processes. This study also mentions legislation regarding soldering and problems of transition from lead solder alloys to lead free alloys.

Key words

Soldering, alloy, solderability, wetting, temperature, eutetic, melting temperature, composition, tin, lead, silver, copper, bismuth, phase diagram, lead free solders, lead solders.

Prohlášení

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

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

.....

V Plzni dne 24.5.2015

Filip Zrubecký

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Hirmanovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD.....	10
1 PÁJENÍ	11
1.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	11
1.2 TAVIDLA	12
1.2.1 Tavidla rozpustná v rozpouštědle	12
Typ R.....	12
Typ RMA	12
Typ RA.....	12
1.2.2 Tavidla rozpustná vodou.....	13
1.2.3 Tavidla bez čištění	13
1.3 PÁJITELNOST	13
1.4 RUČNÍ PÁJENÍ	14
1.5 PÁJENÍ VLNOU	15
1.5.1 Jednoduchá vlna	16
1.5.2 Dvojitá vlna.....	17
1.5.3 Dutá vlna.....	17
1.6 PÁJENÍ PŘETAVENÍM	17
1.6.1 Přetavení v horkých parách.....	17
1.6.2 Pájení infračerveným zářením	18
1.6.3 Pájení laserem	18
Plynové lasery.....	20
Pevnolátkové lasery	20
Polovodičové lasery.....	20
2 PÁJECÍ SLITINY	21
2.1 ČISTÉ KOVY	21
2.1.1 Olovo (Pb).....	21
2.1.2 Cín (Sn).....	21
2.1.3 Měď (Cu).....	22

2.1.4	Nikl (Ni)	22
2.1.5	Zinek (Zn).....	22
2.1.6	Stříbro (Ag).....	23
2.1.7	Bismut (Bi).....	23
2.1.8	Hliník (Al)	23
2.2	MĚKKÉ SLITINY	23
2.2.1	Olovnaté slitiny.....	24
2.2.2	Bezolvnaté slitiny.....	26
	Slitina Sn/Ag	27
	Slitina Sn/Cu.....	29
	Slitina Sn/Sb.....	29
	Slitina Sn/Bi	30
	Slitina Sn/Ag/Cu.....	31
	Slitina Sn/Ag/Bi.....	34
	Slitina Sn/Ag/Cu/Sb.....	35
	Slitina Sn/Zn a Sn/Zn/Bi.....	35
	Slitina Sn/Ag/Bi/X.....	36
2.2.3	Legislativa.....	36
2.2.4	Pájecí pasty.....	38
2.3	TVRDÉ SLITINY	38
ZÁVĚR		40
POUŽITÁ LITERATURA.....		42
SEZNAM OBRÁZKŮ		52
SEZNAM TABULEK.....		52

Seznam symbolů a zkratk

BGA.....	Ball grid array
CBGA	Ceramic ball grid array
CSP	Chip-scale package
DPS	Deska plošného spoje
HB	Brinel hardness
IACS	International Annealed Copper Standard
J.....	Joule
K.....	Kelvin
Kgf.....	Kilogram-force
m	metr
ND:YAG.....	Neodymium-doped yttrium aluminium garnet
Pa	Pascal
R.....	Rosin
RA.....	Rosin fully activated
RMA	Rosin mildly activated
RoHS.....	Restriction of Hazardous Substances
S	Simens
SAC.....	SnAgCu slitina
SMD.....	Surface mount device
THT.....	Through-hole technology
V	Volt
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment Directive
°C	Stupeň Celsia
Ω	Ohm

Úvod

Tato práce se zaměřuje na pájecí slitiny, které se v dnešní době využívají v elektrotechnickém průmyslu. Technologie pájení se využívá nejčastěji, proto je tato oblast elektrotechniky velmi důležitá a je nutné ji dále rozvíjet a zdokonalovat, aby úroveň kvality spojování držela krok s neustále se zdokonalujícími technologiemi v elektrotechnice.

Práce je rozdělena na dvě základní části. První část má za úkol čtenáře uvést do problematiky pájení, pájecího procesu a různých způsobů pájení. Mezi tyto způsoby patří ruční pájení, pájení vlnou a pájení přetavením.

Druhá část práce se zabývá pájecími slitinami. Nejprve jsou obecně rozděleny, pak jsou dále uvedeny nejdůležitější měkké slitiny v současnosti, které jsou podrobněji rozebrány. V této části je probrána také legislativa týkající se pájecích slitin v průmyslu. Na závěr jsou nastíněny pájecí pasty a tvrdé pájecí slitiny.

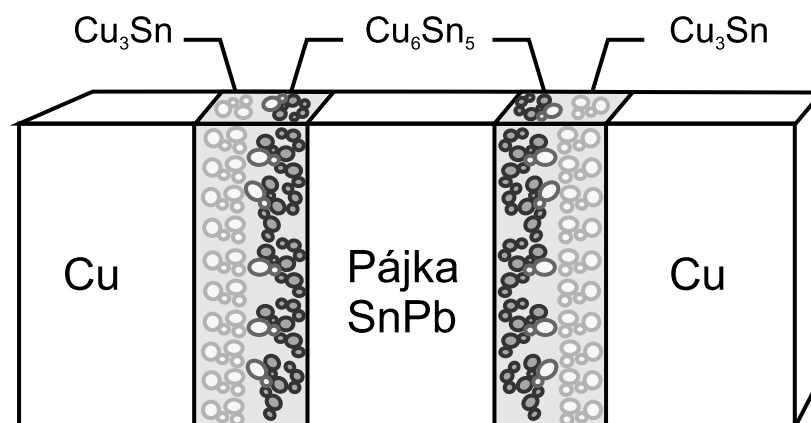
Úkolem této práce je vypracovat přehled pájecích slitin využívaných v elektrotechnice, popsat jejich výhody a nevýhody a možnosti uplatnění těchto slitin v praxi pro různé technologické procesy pájení.

1 Pájení

1.1 Úvod do problematiky

Pájení je velmi důležitým aspektem montáže v elektrotechnice, jedná se o vodivé spojování dvou kovů třetím roztaveným kovem, který se nazývá pájecí slitina. Na pájený spoj se v elektrotechnice kladou velké požadavky ve smyslu chemické, tepelné a mechanické odolnosti a co nejlepší vodivosti.

Princip pájení spočívá v tom, že natavená pájecí slitina smáčí kovový materiál, nastává difúze a vznikne pájený spoj, který má jiné vlastnosti, než základní materiály právě z důvodu difuze pájky a základního materiálu. Aby takový spoj mohl vzniknout, musí mít pájecí slitina nižší teplotu tání, než spojovaný materiál. Následující obrázek ilustruje pájený spoj, který vznikl při pájení dvou měděných součástí pomocí cín-olovnaté pájecí slitiny. [1],[2]



Obr. 1 Pájený spoj [2]

Na obrázku je vidět, že mezi pájecí slitinou a měděnými částmi vznikla přechodová vrstva, kde se nacházejí sloučeniny spojovaných kovů tzv. Intermetalické sloučeniny, jmenovitě Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 . Tato část pájeného spoje má, na základě jiné struktury materiálu, jiné mechanické, tepelné a vodivé vlastnosti, než základní materiál. Mění se i elektrický odpor této vrstvy, Cu_3Sn má odpor $8,9 \mu\Omega \cdot cm$ a Cu_6Sn_5 má odpor $17,5 \mu\Omega \cdot cm$, jenž je značně zvýšený oproti mědi, která má odpor $1,7 \mu\Omega \cdot cm$. Tloušťka této vzniklé intermetalické vrstvy je typicky desetiný mikrometru a jejímu vzniku není možno zabránit. Bez Cu_6Sn_5 by spoj nevznikl, zajišťuje mechanickou pevnost prolnutí materiálu, Cu_3Sn je problematická při opravě pájeného spoje, neboť je nepájitelná, protože nesmáčí. Při opravě je nutné tuto vrstvu chemicky, nebo mechanicky odstranit. [3], [4]

1.2 Tavidla

Tavidla jsou nezbytnou součástí pájecího procesu, jsou určena pro podporu smáčení a odstranění nečistot a oxidů, které se formují vždy, například když přijde horký kov do styku se vzduchem. U mědi vznikají oxidy i při pokojové teplotě. Tavidla je zpravidla nutno po pájení odstranit, protože jsou aktivní i za normálních teplot. [2], [5]

Tavidla můžeme dělit dle jejich rozpouštění:

1. Tavidla rozpustná rozpouštědlem
2. Tavidla rozpustná vodou

1.2.1 Tavidla rozpustná v rozpouštědle

Tyto tavidla je nutno po pájení odstranit využitím rozpouštědla na organické bázi. Tavidla jsou vyrobena z borovicové pryskyřice, které se říká kalafuna. Jedná se o organickou kyselinu, která je při vyšších teplotách velmi aktivní a je schopna odstranit z kovů nežádoucí oxidy. Samotná kalafuna nespĺňuje všechny kladené požadavky, proto se v různých objemech přidávají aktivátory, jenž jsou látky, které se při teplotách pájení rozkládají a vytvářejí kyselinu chlorovodíkovou a amoniak, a zvyšují aktivitu tavidla. [2], [5]

Tavidla na bázi kalafuny je možno dle aktivity rozlišit na:

Typ R

Jedná se o tavidlo na bázi kalafuny rozpuštěné v lihovém ředidle bez přidaných aktivátorů. Ze všech typů je nejméně aktivní a je doporučeno pouze pro velmi čisté povrchy, jako například zlato. Tavidlo typu R zanechává pouze nekorozivní a nevodivé zbytkové materiály. [2], [6]

Typ RMA

Tento typ tavidel je mírně aktivní, neobsahuje žádné chloridy a je vhodné pro měděné, zlaté a olověné povrchy. Tavidla RMA není nutné po pájení čistit. [2], [6]

Typ RA

Tyto tavidla jsou nejvíce aktivní, doporučují se proto pro povrchy, na které nelze využít tavidla typu R a RMA. Po dokončení pájení je nutno toto tavidlo kompletně odstranit, pokud se tak neučiní, mohlo by dojít ke zrychlené korozi materiálu. [2], [6]

1.2.2 Tavidla rozpustná vodou

Tavidla rozpustná vodou neobsahují kalafunu, ale jsou složena z organických kyselin, může se jednat například o kyselinu mléčnou, kyselinu citronovou, kyselinu stearovou apod. Tyto kyseliny jsou sloučeny s dalšími rozpouštědly. Tato tavidla je nutno odstranit krátce po pájení a již z názvu je možno vyčíst, že je lze snadno odstranit vodou. [2], [7]

1.2.3 Tavidla bez čištění

Tavidla bez čištění jsou nyní velmi populární při pájení v elektrotechnice, tavidla zanechávají na materiálu zbytky, ale jsou navržena tak, aby nebylo nutno je z plochy odstranit. Jelikož jsou tato tavidla takto navržena, jejich odstranění je obtížnější, než u ostatních tavidel. V některých odvětvích elektrotechniky je nutné tato tavidla odstranit, protože mohou zadržovat vlhkost a narušovat signály vyšších frekvencí. [8]

1.3 Pájitelnost

Pájitelnost vyjadřuje schopnost povrchu být smáčen pájecí slitinou během pájení. Následující tabulka ukazuje různé kovy a jejich pájitelnost:

Tab. 1 Základní kovy a jejich pájitelnost [9]

Pájitelnost	Výborná	Dobrá	Ucházející	Špatná	Velmi špatná
Základní kov	měď bronz mosaz olovo	cín kadmium zlato stříbro palladium rhodium	uhlíkové oceli zinek nikl	hliník nerezové oceli	lité železo chróm titan magnézium

Při pájení by se mělo přihlídnout k pájitelnosti kovů, díky různé struktuře kovů nemůžeme vytvářet pájený spoj na libovolném kovu. Kovy v kategorii dobré pájitelnosti vyžadují velké teploty při pájení, rychle oxidují a je nutné využít správný typ tavidla pro jejich očištění. Spoje u ucházejících kovů mohou být křehké, zejména v prostředí se zvýšenou koncentrací síry. Špatně pájitelné kovy jsou náchylné k oxidaci a je nutno využít tavidla s vysokou aktivitou, pokud se tak neučiní, hrozí koroze. Velmi špatně pájitelné kovy není možné pájet, pokud je nepokovíme vhodným pájitelným kovem. [9]

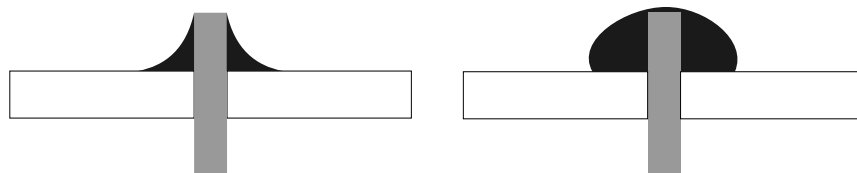
Úrovně smáčení můžeme rozdělit na:

1. **Nesmáčení:** nevytvoří se vazba mezi materiálem a pájecí slitinou, jelikož je příliš velký stupeň oxidace.
2. **Smáčení:** pájecí slitina bez problému smočí povrch, pájka vytvoří vazbu a vznikne intermetalická vrstva.
3. **Odsmačení:** v tomto případě smočí povrch, ale následně ustoupí a dojde k odsmačení. K tomuto případu dochází, když je cín vyjímán z pájky, která ztrácí svoji úroveň pájitelnosti. [2]

1.4 Ruční pájení

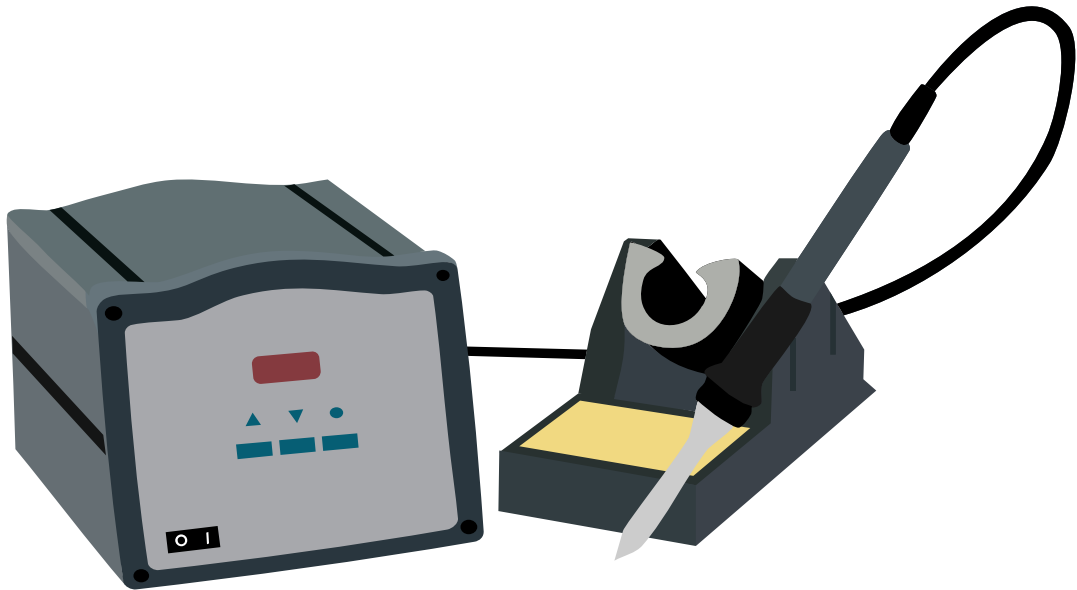
Ruční pájení je jeden z nejrozšířenějších způsobů pájení, jedná se o pájení pomocí pájedla. Nejprve je nutné očistit zahřátý pájecí hrot a odstranit předešlou pájecí slitinu např. navlhčenou houbou, do které se pájecí hrot otírá. Dále by se na hrot mělo nanést velmi malé množství pájky, aby hrot lépe vedl teplo a také neoxidoval, hrot je následně nutno otřít a je připraven k pájení. Samotný pájecí proces je založen na principu, kde pájecí hrot zahřeje základní materiály, pájka se roztaví a vytvoří pájený spoj. Tento proces by měl ideálně trvat v řádu několika vteřin. [10], [11]

Při ručním pájení kvalitu pájeného spoje velmi ovlivňuje kvalita obsluhy, proto je nutné se vyvarovat častým chybám. Při pájení by měl být dostatečně prohřátý spoj, aby se pájka hladce rozlila, pájecí hrot by se neměl často vzdalovat a znovu přikládat na spoj. Dalším problémem je mnoho pájecí slitiny, která má po špatném pájení tvar polokoule. Součástky, případně deska s pájeným spojem by měly být upevněny a při pájení se nehýbat, hrozí vysunutí součástky. Spoj je poté vodivě i mechanicky nekvalitní. Vývody součástky by měli být vysunuty 2–3 mm. [12]



Obr. 2 Správně (vlevo) a nesprávně (vpravo) pájený spoj

Pro ruční pájení se dnes využívají v průmyslu pájecí stanice s odporovým, tepelným tělískem, které je napájeno 12 V nebo 24 V. U těchto stanic lze regulovat teplotu hrotu. [2]



Obr. 3 Pájecí stanice Quick 203H ESD 90W s regulací teploty

Jako pájedlo lze využít i transformátorovou páječku, která ale není vhodná pro využití v průmyslu, protože nelze regulovat teplotu a vhodně měnit pájecí hrot.

Za výhody ručního pájení můžeme považovat poměrně nízkou cenu v porovnání např. s pájení vlnou. Nevýhoda ručního pájení je velká závislost na zručnosti a zkušenosti osoby, která pájení provádí. Ruční pájení se využívá zejména pro opravy.

1.5 Pájení vlnou

Tento způsob pájení se využívá ve strojním průmyslu pro hromadné pájení plošných spojů. Princip pájení vlnou spočívá v tom, že deska plošného spoje přechází přes vlnu roztavené pájecí slitiny, která se neustále pohybuje, tento pohyb způsobuje, že pájecí slitina méně oxiduje. Pro úplné odstranění oxidace se ještě využívá dusíkový zákryt, nebo olej, který se přidává do pájky. [2], [13], [14]

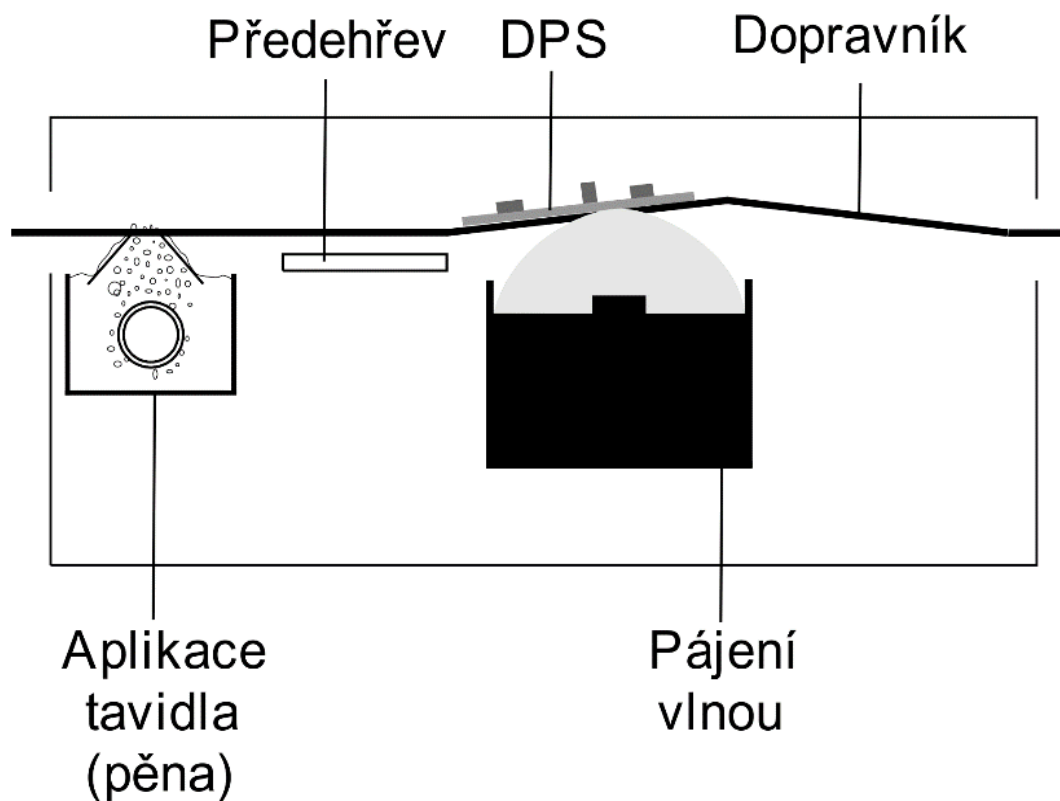
Před samotným procesem pájení je nutné odstranit tavidlem oxidy ze spojů. Tavidlo se na stranu desky nanáší nasprejováním, pěnnou formou, nebo ve formě vlny. Dále je nutné desku plošného spoje předeřhřát vysokou teplotu. Činí se tak, protože samotné pájení vystavuje desku vysokým teplotám, proto je nutné zabránit náhlému teplotnímu šoku, dalším důvodem pro předeřhřívání desky je aktivace přítomného tavidla. Desky se obvykle předeřhřívají na teplotu nad 100 °C, přesná teplota závisí na využívaném

tavidle. Pro předehtání se využívá horký vzduch, aby se deska pozvolna zahřála na požadovanou teplotu. Nakonec nastává samotný pájecí proces. [2], [13], [14]

Mezi výhody pájení vlnou patří zejména rychlost pájení, během krátké doby lze zapájet celou desku plošného spoje a je možné pájet všechny typy desek. Jako každá metoda, i metoda pájení vlnou má své nevýhody např. se musí dbát na to, aby součástky, které deska obsahuje, nebyly příliš blízko u sebe, pájka by pak mohla zasahovat i do jiného spoje a způsobit tak zkrat. Tento problém se řeší kombinací různých vln. Pájení vlnou se využívá spíše pro THT součástky, SMD se pájí méně často a je nutno je před pájením přilepit lepidlem. [2], [13], [14], [15]

1.5.1 Jednoduchá vlna

Princip jednoduché vlny je popsán výše. Na této vlně je možné pájet běžné vývody i vyšších integrací na desce. SMD součástky je možno pájet pouze, pokud je jejich integrace na desce nižší a nemohou mít příliš malé rozměry. Místa, která nemají být zapájena, jsou chráněna nepájivou maskou. [13], [14], [15]



Obr. 4 Schéma pájení jednoduchou vlnou

1.5.2 Dvojitá vlna

Tento proces je podobný jednoduché vlně s tím rozdílem, že se skládá ze dvou vln. Dvojitá vlna je konstruována pro pájení desek, jejíž součástky jsou SMD i THT. První vlna, která teče ve směru pohybu desky, má za úkol zapájet všechny kontakty (turbulentní vlna zajistí dobrý kontakt s okraji SMD součástek). U turbulentní vlny není důležitý vznik zkratu, ale musí součástky dokonale prohřát. Úkolem druhé, laminární vlny je dokončit proces pájení tak, aby byly všechny součástky zapájeny bez zkratu. [2], [16]

1.5.3 Dutá vlna

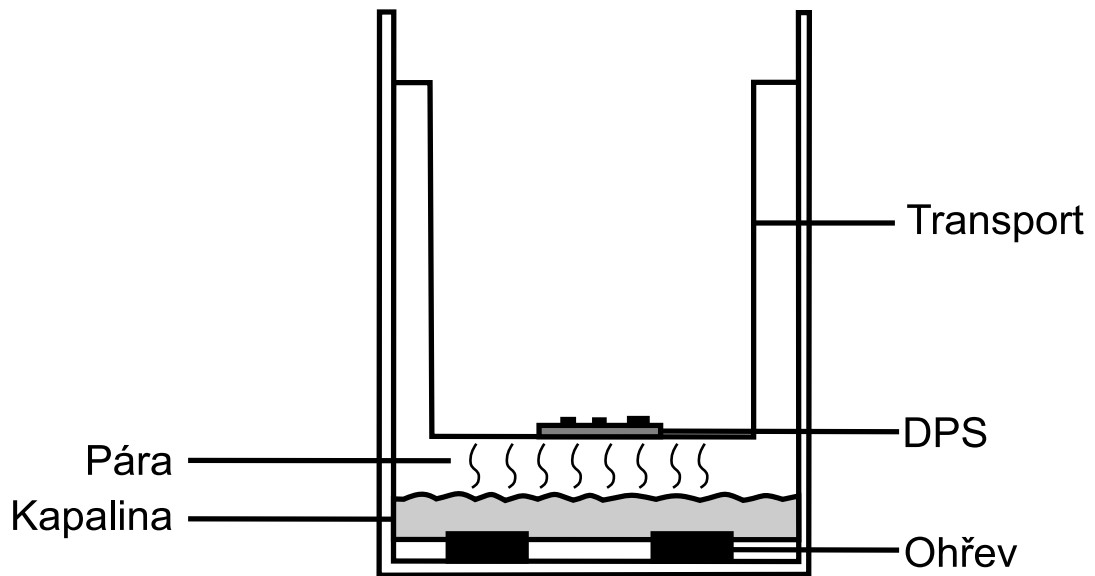
Tato metoda je využívána zejména v Japonsku. Lineární motor vytváří vlnu, která proudí v celém objemu pájecí vany, a proto celý systém vlny nemá žádnou pohyblivou část. Díky elektromagnetickému motoru je možno vytvořit vlnu z mnohem menšího množství pájecí slitiny, která plně obtéká součástky a tento proces pájení umožňuje pájet všechny druhy součástek. [2], [17]

1.6 Pájení přetavením

Významný rozdíl v principu pájení přetavením, oproti pájení vlnou, spočívá v tom, že se nejprve nanese pájecí pasta a poté působí teplo a materiál se přetaví. Pájecí pasty využívané pro toto pájení se skládají z kovové slitiny a směsi tavidel, kovová slitina je ve formě zrn o průměru nad 20 μm . Průměr zrn má velký dopad na obsah oxidů, se zmenšujícím se zrnem se zvyšuje obsah oxidů. Způsob zahřívání součástky může být pomocí par, nebo pomocí infračerveného záření a laseru. Deska plošného spoje musí být předeštěná ze stejných důvodů, jako u pájení vlnou. [2]

1.6.1 Přetavení v horkých parách

Tato metoda využívá princip vypařování tekutiny a kondenzaci páry. Tekutina se nejprve zahřeje na bod varu a začne se vypařovat, deska plošného spoje je umístěna v horké páře, která na povrchu desky začne kondenzovat a předá část své teploty pájecí pastě, která zapájí kontakty. V celém systému je stejná velikost teploty, rozdílné velikosti nejsou přípustné, součástky se pájí hromadně a všechny musí být zapájeny stejně. Pára neobsahuje kyslík, tudíž odpadá problematika oxidace. [2], [18]



Obr. 5 Zjednodušené schéma pájení přetavením [19]

1.6.2 Pájení infračerveným zářením

Když je součástka vystavena infračervenému záření, tak se část záření pohltí, část odrazí a část projde součástkou. Pohlcená energie zapříčiní ohřívání součástky, až na bod tavení pájecí slitiny a součástka se zapájí. Míra pohlcení energie závisí na využitém materiálu a na vlnové délce záření. Systémy pájení IR zářením využívají vlnové délky v rozsahu 0,1–100 μm . [2], [20]

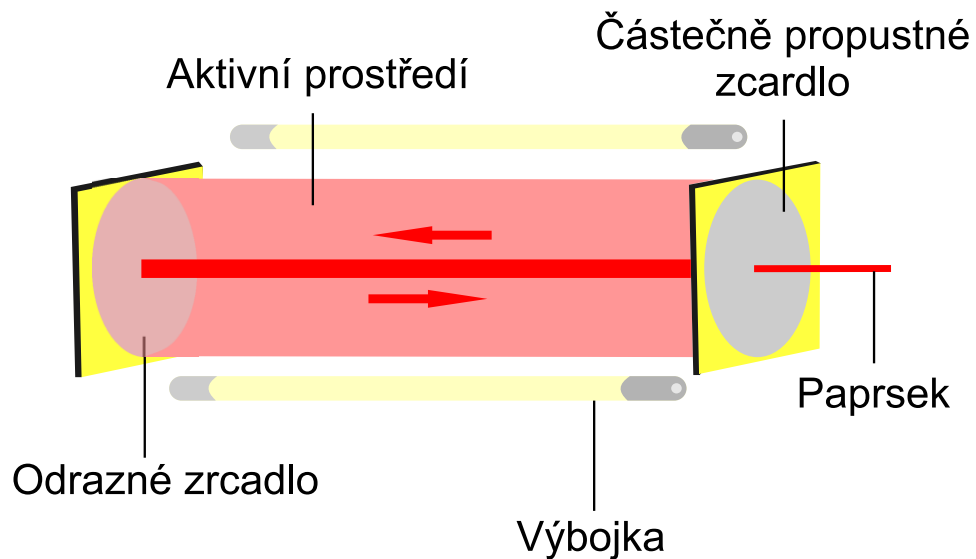
Mezi výhody využití IR záření patří jednoduchá konstrukce, možnost vytvoření velmi přesných pájených spojů, ovládání ve velkém rozsahu délek. Nevýhoda tohoto systému je velký vliv vlnové délky záření a také barvy materiálu. Tmavé barvy pohlcují více světla, to znamená, že pokud budou součástky černé, tak se budou zahřívat rychleji, než pájecí pasta, což může negativně ovlivnit jejich stav. [2], [20]

1.6.3 Pájení laserem

Princip laseru spočívá v přechodu elektronů ze základní energetické hladiny na hladinu vyšší. Tento elektron neudrží svou energii navždy a vrací se zpět na nejnižší energetickou hladinu. Takto je vybudeno velké množství elektronů aktivního prostředí, jejich množství je vyšší, než elektrony v nejnižší energetické hladině a dojde ke stimulované emisi elektromagnetického záření. K tomu, aby paprsek nabral energii, z co největšího množství atomů, využíváme například vhodně umístěné zrcadla. Tato zrcadla odrážejí paprsek fotonů, který projde stejně nabitým atomem, tento atom

vyzáří stejné záření o stejné vlnové délce a frekvenci, což způsobí exponenciální zesilování laseru. [21], [22], [23]

Pro zesílení paprsku se využívá rezonátor, jedná se o dutinu, která je ohraničena dvěma zrcadly, jedno zrcadlo je částečně propustné (obsahuje otvor) a druhé zrcadlo je odrazné. Jako zdroj energie pro vybuzení elektronů se využívají například laserové diody nebo výbojky. Aktivní prostředí může být například CO_2 , krystal nebo polovodičový prvek. [21], [22], [23]



Obr. 6 Jednoduché schéma laseru s výbojkami, jako zdrojem energie [24], [25]

Pro pájení elektronických součástek se laserový paprsek zaostří na vývody součástky. Laser šikmo dopadá na vývody, aby se pájecí slitina nezažhřála příliš rychle a nedošlo tak k jejímu rozstříku. Laser je vhodno využívat pro pájení teplotně citlivých součástek, neboť lze snadno a dynamicky regulovat teplotu. [22]

Mezi výhody pájení laserem můžeme považovat velmi nepatrné teplotní ovlivnění součástek, velkou přesnost, využití různých druhů pájek. Nevýhodou laserového pájení je vysoká cena a rychlost na úrovni ručního pájení.

Lasery můžeme dělit dle aktivního prostředí:

1. Plynové
2. Pevnolátkové
3. Polovodičové

Plynové lasery

V tomto druhu laserů vzniká paprsek v plynném prostředí. Plyny, které se využívají, mohou být CO₂, argon, neon nebo hélium. Tyto lasery se relativně složitě chladí a lze je budít výbojkami. Při pájení se využívá vlnová délka 10,6 μm. [25], [26]

Pevnolátkové lasery

Aktivním prostředím pevnolátkových laserů je krystal. Je možno využívat drahokamy, jako jsou rubíny nebo safíry, ale mnohem efektivněji se využívají krystaly na bázi skel s přídavkem vzácných prvků. Nejvyužívanějším typem pevnolátkových laserů je Nd:YAG laser, jenž je krystal Yttrium Aluminium granátu dopovaný ionty neodymu. Pro pájení se tento laser využívá o vlnové délce 1,064 μm. Dále se tento typ laserů využívá například v lékařství. [27], [28]

Krystal se budí výbojkou a může pracovat v pulzním nebo kontinuálním režimu. Životnost těchto laserů záleží na výbojce, protože se jedná o nejvíce poruchovou část. Nd:YAG laser je schopen dosáhnout velmi vysokých výkonů, ale pouze v pulzním režimu a na krátký čas, v kontinuálním režimu je schopen dosáhnout řádu stovek wattů. [27], [28]

Polovodičové lasery

V této technologii se využívají laserové diody, v nichž se využívá jevu rekombinace elektron-díra, při kterém se vyzáří energie ve formě fotonů, které interagují s dalšími elektrony a vytváří tak další fotony. Vzniká tedy stimulované emise, jako v ostatních druzích laserů. Laserový paprsek se při této aplikaci nezesiluje při přeskoku mezi dvěma zrcadly, ale vzniká při přeskoku ve spoji polovodičů typu N a P. Tento spoj je široký v řádech jednotek mikrometrů. Jako aktivní prostředí v tomto případě považujeme polovodič, nejčastěji GaAs. [29]

Výhoda polovodičových laserů spočívá ve velmi malých rozměrech laserových diod a jejich lepší životnosti, oproti výbojkám. Polovodičové lasery jsou také méně nákladné, než pevnolátkové lasery. Rychlost těchto laserů je přibližně stejná. Diodové lasery se využívají při měkkém i tvrdém pájení. [29]

2 Pájecí slitiny

Pájecí slitiny jsou kovové materiály využívané pro spojování kovů pájením. Za slitiny považujeme směs dvou nebo více kovů nebo jeden kov a další nemetalickou substanci. Slitiny mohou vzniknout slitím roztavených složek nebo rozpuštěním malého množství přísadového kovu či nekovového materiálu, ve velkém množství roztaveného základního kovu. Slitiny se také vyrábí difuzí. [30], [31]

V elektrotechnice rozdělujeme pájecí slitiny dle teploty tání na:

1. Měkké (Pod 450 °C)
2. Tvrdé (Nad 450 °C)

2.1 Čisté kovy

V této podkapitole popíšeme některé čisté kovy, které se hojně využívají pro výrobu měkkých pájecích slitin.

2.1.1 Olovo (Pb)

Olovo je stříbrno-šedý kov. Je měkký a velmi poddajný. Při vystavení povětrnostním vlivům velmi rychle oxiduje. Teplota tání olova je okolo 328 °C a elektrická vodivost $4,8 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$. V přírodě se vyskytuje přirozeně v malé koncentraci, nicméně lidská činnost výrazně zvýšila koncentraci olova v atmosféře, když se začalo využívat v pohonných hmotách. To zapříčinilo vypouštění chloridů a oxidů do atmosféry. Část těchto nežádoucích látek se pohltí a část dopadne opět na zemský povrch ve formě deště a způsobuje globální problémy. [32], [33]

Olovo má výrazný dopad na lidské zdraví a je považováno za jeden z 8 základních kovů, které mají nežádoucí účinky na organismus (Dalšími jsou arsen, měď, zinek, kadmium, rtuť, chróm a nikl). Mezi tyto nežádoucí účinky patří například poškození mozku, ledvin a nervového systému. Do lidského organismu se může dostat potravou, vodou a vzduchem. [33]

2.1.2 Cín (Sn)

Jedná se o lesklý, stříbrně-bílý kov, který je velmi měkký a poddajný. Při vystavení vzduchu a vodě neoxiduje a je velmi stálý. Teplota tání činí 232 °C a elektrická vodivost

je $8,7 \cdot 10^6$. Největší podíl cínu ve světě se využívá právě pro výrobu pájecích slitin. Dnes je zpravidla cín hlavním kovem v pájecích slitinách. [34], [35]

Cín má negativní dopad na lidský organismus ve formě organických sloučenin. V průmyslu mají právě organické sloučeniny cínu stále větší podíl i přes to, že mohou způsobovat otravu. Cín lze vstřebat do lidského organismu kůží, jídlem nebo vdechnutím. Kromě akutních účinků má cín i velmi vážné dlouhodobé účinky. [35]

2.1.3 Měď (Cu)

Měď je načervenalý, měkký kov, který je velmi houževnatý. Měď taje při teplotě $1083 \text{ }^\circ\text{C}$ a má výbornou elektrickou vodivost, jenž je $6,07 \cdot 10^7$. Při vystavení vlhkému větru se začne pokrývat zelenou vrstvou uhličitánů (jinak se nazývá také měděnka). Tato vrstva slouží pro ochranu kovu, ale pro lidské využití je nežádoucí. [36], [37]

Měď můžeme nalézt přirozeně v potravě, vzduchu nebo pitné vodě. Lidský organismus pravidelně vstřebává velké množství mědi, což je příznivé, protože měď je nezbytným prvkem pro lidské zdraví. [36], [37]

2.1.4 Nikl (Ni)

Nikl je stříbrno-bílý kov, který je za vyšších teplot dobře zpracovatelný. Teplota tání niklu činí $1453 \text{ }^\circ\text{C}$ a jeho elektrická vodivost je $1,4 \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$. Nikl je využíván na výrobu slitin pro tvrdé pájení, ty jsou charakterizovány svou tvrdostí, tažností a odolností proti korozi a velké teplotě. [38], [39]

2.1.5 Zinek (Zn)

Jedná se o lesklý kov modro-bílé barvy, který je velmi dobře tvarován tažením. Při vystavení vzduchu je velmi náchylný k oxidaci. Zinek taje při teplotě $419,58 \text{ }^\circ\text{C}$ a jeho elektrická vodivost činí $1,69 \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$. Jedna z významných slitin (která se vyrábí ze zinku a mědi) se nazývá mosaz a využívá se při vysokoteplotním tvrdém pájení. Zinek se také využívá, jako legura slitin hliníku, ale nepříznivě ovlivňuje jejich odolnost proti korozi. [40], [41]

2.1.6 Stříbro (Ag)

Bílý, měkký kov, který se dá výborně tvarovat tažením. Stříbro je nejlepší vodič elektrické energie s vodivostí $6,3 \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ a teplota tání stříbra činí $962 \text{ }^\circ\text{C}$. Při styku se vzduchem neoxiduje, ale reaguje na sirovodíky, které jsou v něm přítomné a zakaluje se. [42], [43]

Stříbro je velmi nebezpečné ve formě sloučenin, jako jsou soli stříbra, tyto sloučeniny jsou velmi závažné pro lidské zdraví a mohou způsobit smrt. [42], [43]

2.1.7 Bismut (Bi)

Jedná se o velmi křehký kov s růžovým zbarvením, teplota tavení bismutu činí $271,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Díky tomu, že je teplota tavení tak nízká se, při výrobě slitin, bismut přidává pro snížení teploty tavení. Elektrická vodivost bismutu je $8,67 \cdot 10^5 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, to je výrazně nižší hodnota, než u ostatních zmíněných kovů. [44], [45]

Bismut může způsobit střední poškození ledvin, pokud je vstřebán do organismu, velké dávky jsou však smrtelné. Vdechnutí sloučenin bismutu způsobuje otravu organismu. Na životní prostředí má bismut minimální negativní dopad. [44], [45]

2.1.8 Hliník (Al)

Nejrozšířenější kov na planetě hliník se vyznačuje stříbrno-bílou barvou a lesklým povrchem. Jedná se o velmi lehký a měkký kov, který je výborně tvárný a odolný vůči korozi. Při styku se vzduchem vytváří na svém povrchu vrstvu oxidu uhelnatého. Elektrická vodivost hliníku činí $237 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ a taje při teplotě $661 \text{ }^\circ\text{C}$. Hliníkové slitiny se využívají při tvrdém pájení. [46], [47]

Podobně, jako u ostatních kovů je hliník v běžném množství zdravotně nezávadný, pokud se ale vstřebá do organismu příliš velké množství, může dojít k zdravotním potížím, jako je ztráta paměti a poškození nervového systému. Časté případy nadměrného dýchání hliníku nastávají ve výrobních podnicích, které hliník hojně využívají. Na životní prostředí má hliník negativní dopad díky časté kontaminaci vodních zdrojů, což má za následek poškození zdravých živočichů. [46], [47]

2.2 Měkké slitiny

Za měkké slitiny považujeme slitiny vyrobeny z nízkotavitelných kovů, které mají teplotu tání pod $450 \text{ }^\circ\text{C}$, jako jsou například cín a olovo. Využívají se pro aplikace,

kteří nejsou příliš mechanicky a teplotně namáhány. Pevnost takovýchto spojů se pohybuje mezi 20–50 MPa. [2]

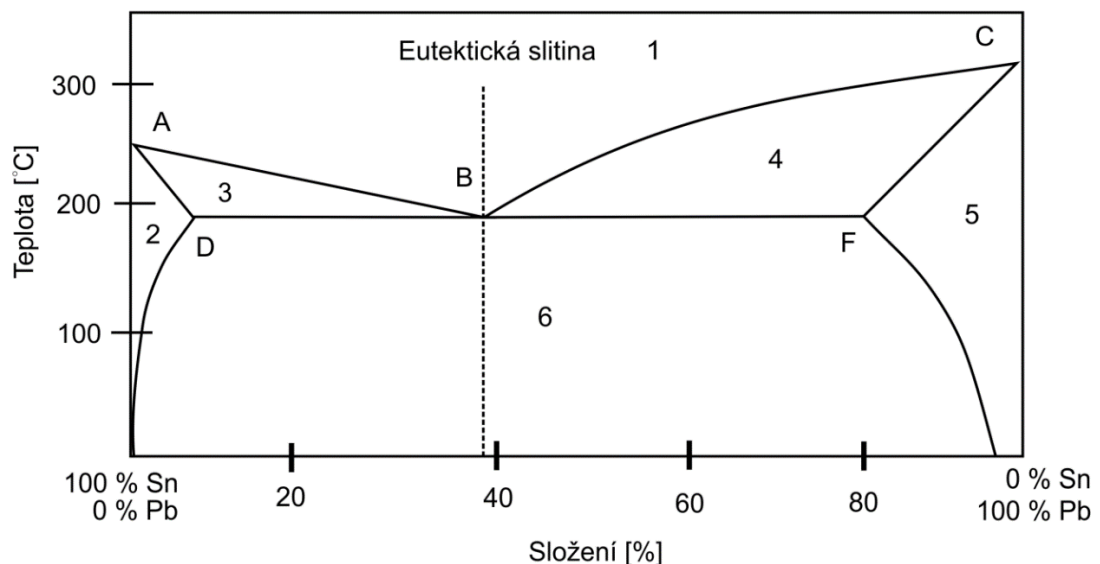
2.2.1 Olovnaté slitiny

Do roku 2006 byly nejvyužívanější slitiny při měkkém pájení v elektrotechnice slitiny cín-olovnaté (Sn/Pb). Poměr olova a cínu se v těchto pájkách pro elektrotechnický průmysl pohyboval v rozmezí 60%Sn/40%Pb–65%Sn/35%Pb. Nejlepší cín-olovnatou pájecí slitinou je však eutektická pájka se složením 63%Sn/37%Pb, tato pájka má nejnižší teplotu tavení z cín-olovnatých slitin a to 183 °C. [2]

Eutektickou slitinou se myslí to, že je slitina vyrobena z takového poměru složek (v tomto případě cínu a olova), při které je teplota, při které přechází směs do kapalného stavu nejnižší. Podmínky eutektické směsi jsou: [2]

1. V kapalném skupenství lze látky mísit
2. V pevném stavu jsou látky nerozpustné, nelze je mísit
3. Body tání obou slitin jsou blízké.

Následující obrázek je fázový diagram slitiny cínu a olova. Diagram graficky vyjadřuje skupenství látek v závislosti na teplotě.

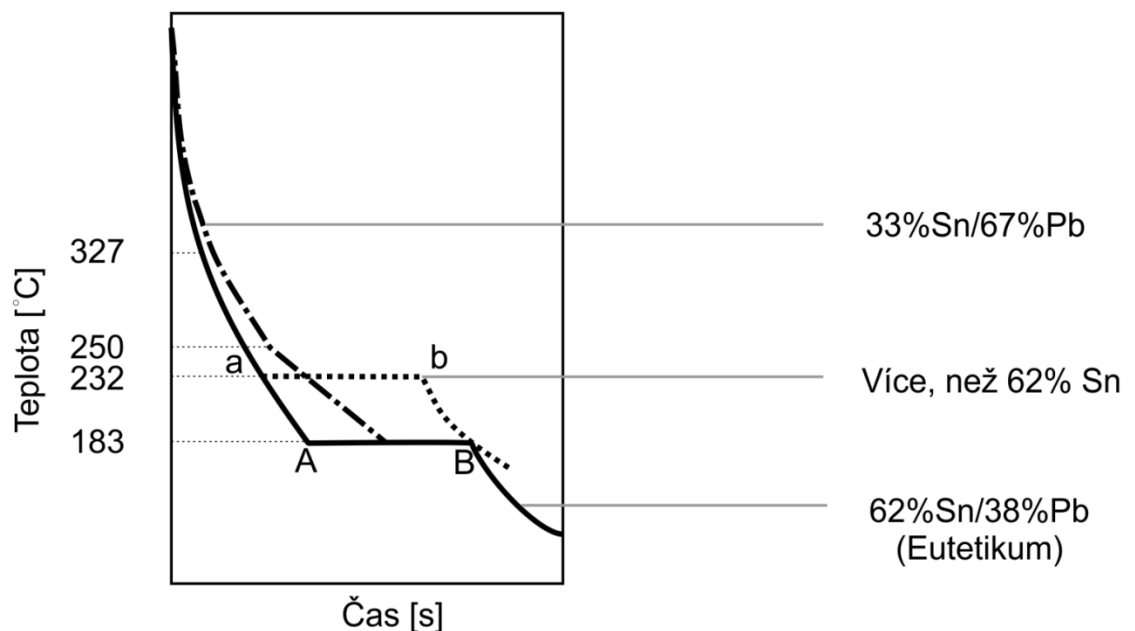


Obr. 7 Fázový diagram cín-olovnaté slitiny [48]

Z fázového diagramu je patrné, že z ostatních možných složení této slitiny jen eutektická slitina ihned přechází z kapalného stavu do stavu pevného. Číslo 1

na diagramu znázorňuje oblast, kdy je slitina v kapalném skupenství. Oblasti 2 a 5, kdy jeden z kovů nezanedbatelně převažuje nad druhým, vyjadřují stavy, kdy atomy kovu, který má ve slitině minoritní zastoupení, jsou plně rozpuštěny ve druhém kovu. V oblastech 3 a 4 je slitina v kapalném stavu, kde se již tvoří pevné krystaly kovů (slitina je polotekutého charakteru), eutektická slitina tento stav nemá. V poslední oblasti (6) je slitina v pevném stavu a krystaly jejích složek jsou vhodně spojeny. 63%Sn/37%Pb není výhodná pouze z hlediska teploty tání, ale také mechanickými vlastnostmi, má nejvyšší pevnost v tahu (54 MPa), pevnost ve smyku (37 MPa), rázovou houževnatost (20,3 J). Rezistivita eutektické slitiny činí $0,145 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Cín-olovnatá slitina má elektrickou vodivost o hodnotě 11,86 % IACS (IACS je mezinárodní standard pro kovy a kovové slitiny. Udává elektrickou vodivost v poměru k vodivosti mědi. 100 % IACS tedy znamená $5,18 \cdot 10^7 \text{ S/m}$). [2], [49], [50]

Na změnu skupenství a poměr cínu a olova se lze podívat také z časového hlediska. Následující graf, který přímo koreluje s fázovým diagramem, znázorňuje změny teplot při chlazení cín-olovnatých pájecích slitin různých složení a dále přibližuje problematiku jejich složení.



Obr. 8 Chlazení slitin [51]

Z grafu je patrné, že slitina s 67% Pb začne již tuhnout okolo 250 °C, ale jedná se pouze o olovo, cín ještě nezačne tuhnout vůbec, proto začne křivka pouze lineárně klesat, ale nezalomí se do horizontální polohy (Tato část křivky značí tuhnutí materiálu,

kde bod A je začátek tuhnutí a bod B jeho konec). Křivka se zalomí až při teplotě 183°C. Pokud bychom zvyšovali obsah cínu ve slitině, byla by teplota tuhnutí olova stále nižší a nižší, ale křivka by se zalomila do horizontální polohy znovu při stejné teplotě 183 °C, kdy tuhnou oba kovy. Takto by se dělo, až do té doby, než by pájka byla eutektická (62%Sn/38%Pb). V případě eutektické pájky začnou oba kovy tuhnout ve stejný čas. Pokud tedy tuhne pouze jeden kov, nachází se slitina ve fázovém diagramu v oblastech 3 a 4. Slitina má v těchto případech tedy “kašovitě složení“. [51], [52]

2.2.2 Bezolovnaté slitiny

Základní rozdíl mezi olovnatými a bezolovnatými slitinami je teplota tání, která je u běžné olovnaté, eutektické slitiny okolo 183 °C. Jedna z nejvyžívanějších bezolovnatých pájecích slitin 96,5%Sn/3%Ag/0,5%Cu má teplotu tání v rozmezí 217–220 °C. Teplota bezolovnatých slitin je tedy obecně vyšší, než slitin obsahujících olovo, proto se všechny systémy, které byly optimalizovány pro využití olovnatých slitin, musely přizpůsobit, aby bylo možno úspěšně pájet bezolovnatými slitinami. [55], [53], [55], [55]

Mezi nezanedbatelné nevýhody bezolovnatých slitin patří horší smáčivost a vyšší náchylnost k oxidaci. Základním kovem u bezolovnatých slitin, stejně, jako u olovnatých, je cín. Smáčivost a ostatní vlastnosti pájecí slitiny lze tedy u bezolovnatých slitin definovat dalšími zastoupenými kovy ve slitině, obvykle se využívá stříbro, měď, bismut nebo zinek. Stříbro například zlepšuje smáčivost slitiny, ale zvyšuje cenu slitiny. Cena bezolovnatých pájecích slitin je obecně vyšší, než u olovnatých slitin a má na ni velký vliv cena druhého kovu. [53], [55], [55]

Dalším a méně známým problémem bezolovnatých slitin, a to zejména v elektronice, jejíž správná funkce je velmi náchylná na jakékoli změny (mikroelektronika, lékařská technika apod.), jsou cínová monokrystalická vlákna (anglicky: tin whiskers). Jedná se o mikro vlákna, která jsou výrazně tenčí, než lidský vlas a spontánně vyrůstají na povrchu cínu. Obvykle jsou tenká okolo 1 μm, dlouhá 8–9 mm a schopna krátkodobě přenést vysoké elektrické proudy. V současné době nejsme schopni přesně předurčit dobu a počátek růstu, mohou růst roky, ale i minuty. Hlavní nebezpečí představují, pokud se dotknou další vodivé části v obvodu a způsobí nežádoucí zkrat, který zničí elektrické zařízení a nezanechá téměř žádné stopy, protože se vlákno vlivem průchodu proudy zničí. Takové nebezpečí vzniká pouze u bezolovnatých slitin, neboť olovo, jako jediná látka,

vznik těchto vláken úplně potlačí. Tento problém zatím není plně řešitelný a v roce 2005 se kvůli zkratu systému musela odstavit jaderná elektrárna Milestone Nuclear Generating Station, zkrat byl způsoben právě růstem cínových vláken. Dále také organizace NASA hlásí poruchy družic způsobenými tímto problémem. [56], [57], [58], [59], [61], [62]

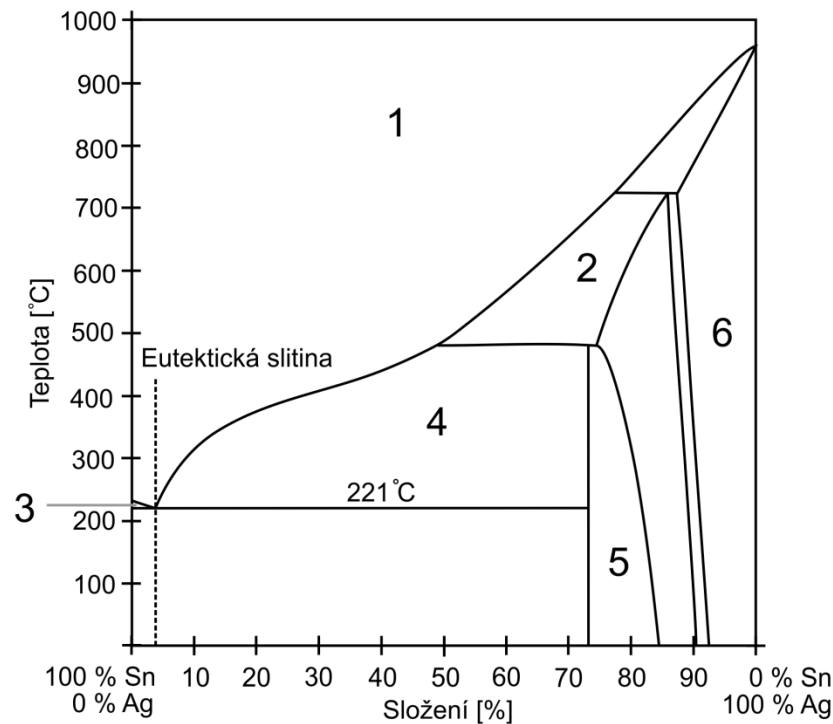
Některé studie a poznatky ukazují na to, že možná příčina růstu vláken je zbytkové mechanické napětí po procesu pokovení. Udává se, že možná příčina jsou také vzniklá externí namáhání typu ohýbání, roztahování při tvorbě vodičů nebo dokonce škrábance. Další uváděnou možnou příčinou růstu je i velmi malý rozdíl součinitele teplotní roztažnosti slitiny a materiálů, které jsou spojovány. V současné době ještě nejsme schopni exaktně vymežit příčinu vzniku, nicméně známe možné příčiny, a proto je velmi důležité se této problematice věnovat, neboť představuje velké riziko. [61], [63]



Obr. 9 Mikroskopický snímek cínových vláken (převzato z: [56])

Slitina Sn/Ag

Z diagramu níže je viditelné, že eutektická Sn/Ag slitina se skládá z 96,5 % cínu a 3,5 % stříbra a její teplota tání činí 221 °C. Pokud se slitina bude skládat např. ze 70 % Sn a 30 % Ag, bude mít v oblasti 1 kapalné složení, stejně, jako slitiny všech možných složení. Oblast 2 značí stav, kdy při klesání teploty přechází do pevného stavu nejprve stříbro a cín zůstává tekutým. Oblast 4 značí stav, kdy vznikne intermetalická sloučenina Ag_3Sn + tekutý stav, v této fázi slitina chladne výrazně rychleji, než, když se nachází v oblasti 2. Pokud bude slitina z více, než 80 % stříbra, tak bude ve stavu $\text{Ag}+\text{Ag}_3\text{Sn}$. [2], [65], [66]



Obr. 10 Fázový diagram cín-stříbrné slitiny [57]

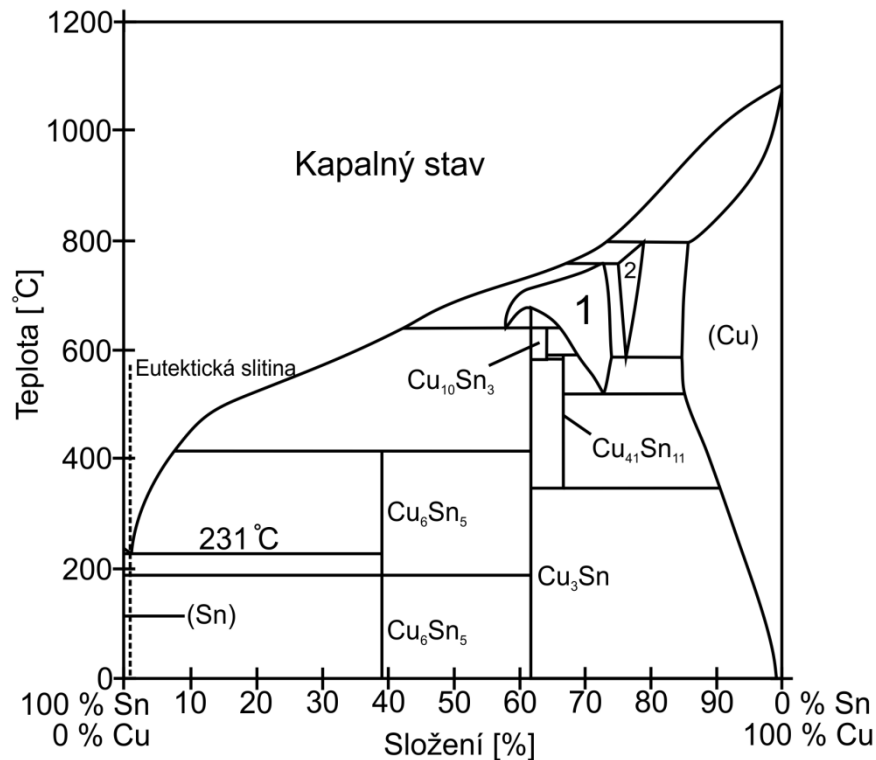
96,5%Sn/3,5%Ag má díky stříbru vysokou elektrickou vodivost, která činí 13,9 % IASC. Také se vyznačuje výbornými mechanickými vlastnostmi, proto je vhodná pro systémy, které jsou fyzicky namáhány. Velkou nevýhodou této slitiny je vyšší cena, kvůli přítomnosti stříbra a výrazně horší pájitelnost, než ostatní slitiny, které obsahují cín. Tato slitina se lépe pájí na nerezové oceli, než na ostatních kovech a je více využívána pro pájení neelektrických systémů. Sn/Ag slitina je vhodná pro ruční pájení při opravách. [2], [65], [66], [67]

Následující tabulka udává vybrané vlastnosti slitiny Sn/Ag v porovnání s cín-olovnatou slitinou:

Tab. 2 Vlastnosti slitiny Sn/Ag [68]

Slitina	Teplota tání	Hustota	Rezistivita	Tepelná vodivost	Pevnost v tahu při zničení	Prodloužení	Brinellova pevnost
	°C	g/cm ³	μΩ/cm ²	w/(m·k)	kgf/cm ²	%	HB
96,5%Sn/ 3,5%Ag	221	7,37	0.123	55	580	35	15
Sn/Pb	183	8,4	0.145	50	525	37	17

Slitina Sn/Cu



Obr. 11 Fázový diagram cín-měděné slitiny [69]

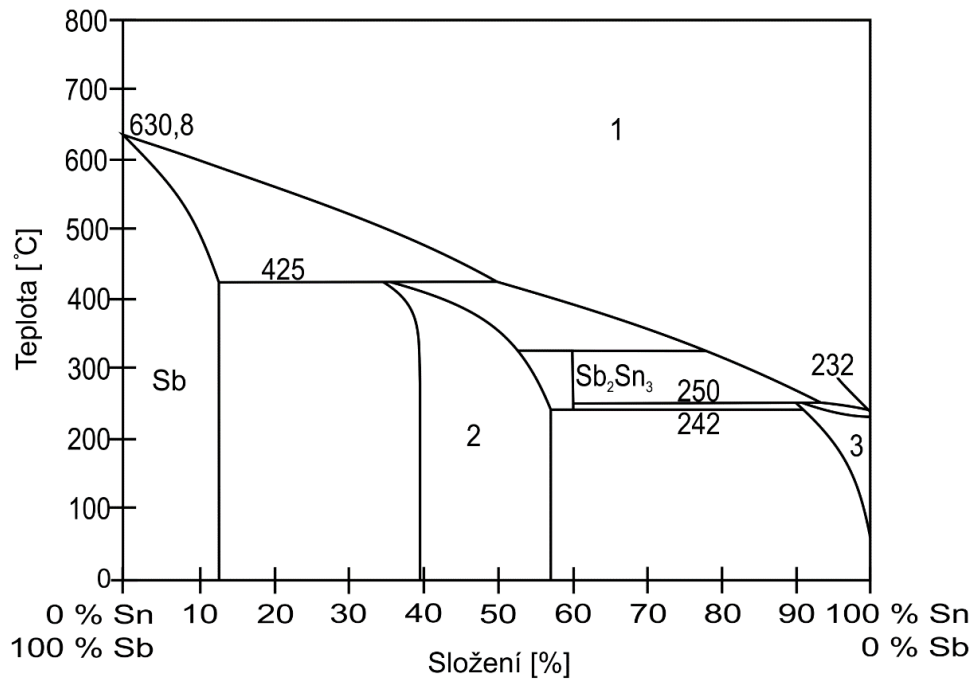
Eutektická cín-měďnatá slitina má obsah 99,3 % cínu a 0,7 % mědi a její teplota tání je 227 °C. Pokud by se zhotovila slitina s více % mědi, tak by začaly vznikat různé intermetalické sloučeniny, které jsou přímo ve slitině nežádoucí, neboť mohou způsobovat praskliny spoje a obecné zhoršení mechanických vlastností. V oblasti 2 by cín byl v tekutém stavu a měď by již byla v pevném stavu (teplota přechodu je okolo 796 °C). V oblasti 2 by slitina byla složena z Cu_3Sn + kapalného cínu + ztuhlé mědi. [2], [69], [70]

Tato slitina je relativně levná, má, vzhledem k ostatním bezolovnatým slitinám, horší mechanické vlastnosti a díky své příznivé ceně je vhodné ji využít pro pájení vlnou, pokud jsme ochotni zohlednit horší vlastnosti. [2]

Slitina Sn/Sb

Eutektická Sn/Sb slitina má složení 95%Sn/5%Sb a její teplota tání činí 232 °C díky přidávku antimonu. Tato teplota tání je ještě vyšší, než u Sn/Ag/Cu slitin, což zužuje rozsah jejího využití a lze ji tedy využít pro vysokoteplotní aplikace, jako jsou pouzdření součástek technologií flip-chip apod. [2], [70]

Obrázek níže znázorňuje chování slitiny v závislosti na teplotě a jejím složení:



Obr. 12 Fázový diagram Sn/Sb slitiny [71]

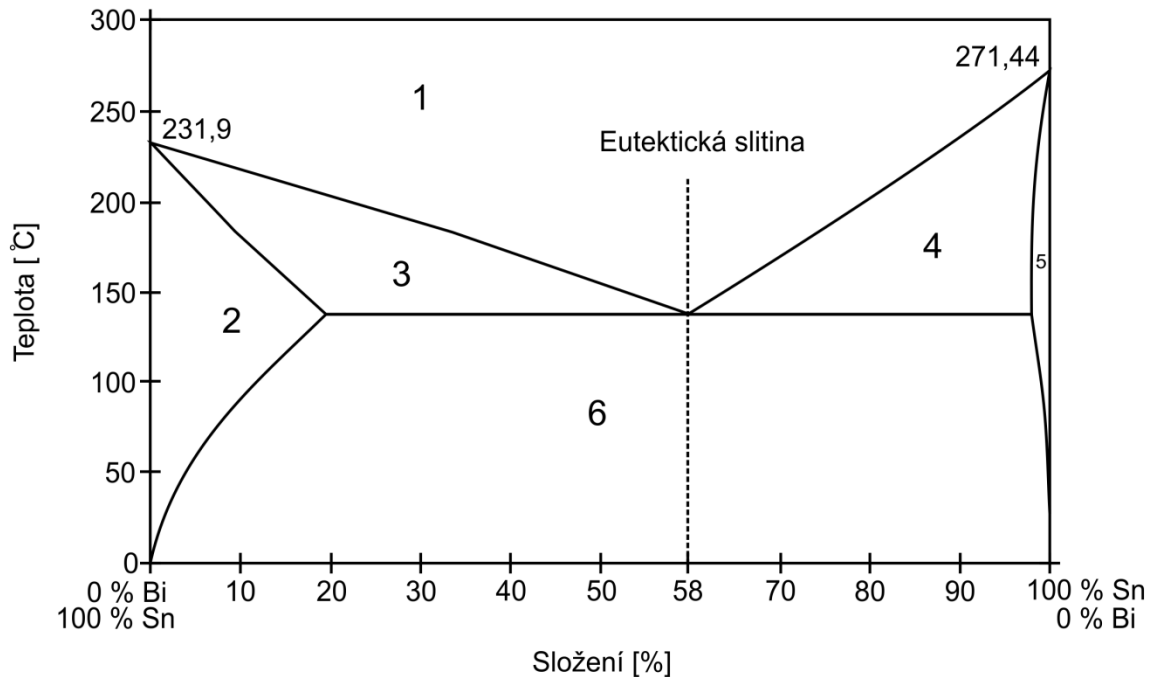
Následující tabulka udává vybrané vlastnosti v porovnání s cín-olovnatou slitinou:

Tab. 3 Vlastnosti slitiny Sn/Sb [68]

Slitina	Teplota tání	Hustota	Rezistivita	Tepelná vodivost	Pevnost v tahu při zničení	Prodloužení	Brinellova pevnost
	°C	g/cm ³	μΩ/cm ²	w/(m·k)	kgf/cm ²	%	HB
95%Sn/ 5%Sb	232	7,25	0,145	28	415	38	13
Sn/Pb	183	8,4	0.145	50	525	37	17

Slitina Sn/Bi

Z fázového diagramu níže je patrné, že se tato slitina chová velmi podobně, jako klasická Sn/Pb slitina, nicméně její eutektická kompozice je složena z 60 % Bi a 40 % Sn, jenž je u většiny bezolovnatých slitin neobvyklé, aby byl cín v menšinovém zastoupení. Teplota tavení cín-bismutové slitiny činí 138 °C, je tedy relativně malá a vhodná pro elektroniku, kde nepůsobí velké teploty.



Obr. 13 Fázový diagram Sn/Cu slitiny [2]

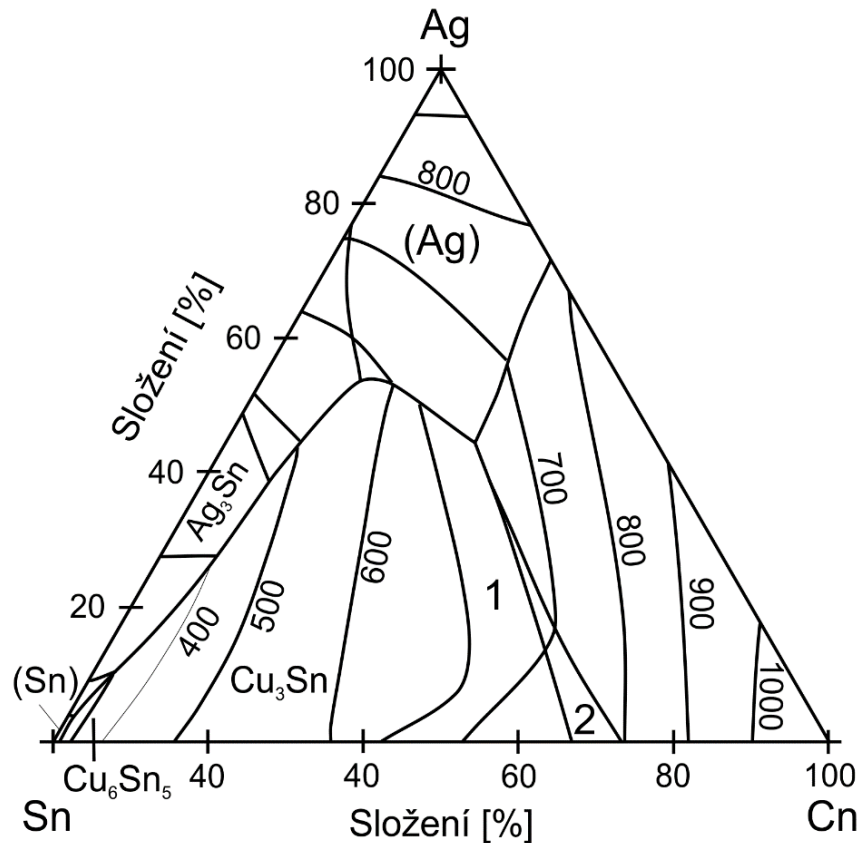
Tato slitina hůře smáčí měď, než ostatní slitiny s nízkým bodem tání, pokud se využijí RMA nebo samočistící tavidla. Sn/Bi slitina se nehodí pro pájení vlnou, neboť při pájení vlnou se spotřebuje velké množství pájky a vznikl by pak deficit bismutu. Dalším problémem může nastat, pokud by bylo přítomno olovo. Bismut s olovem reaguje a mechanické vlastnosti spoje jsou pak velmi zhoršené. [73]

Tab. 4 Vlastnosti slitiny Sn/Bi [68]

Slitina	Teplota tání	Hustota	Rezistivita	Tepelná vodivost	Pevnost v tahu při zničení	Prodloužení	Brinellova pevnost
	°C	g/cm ³	μΩ/cm ²	w/(m·k)	kgf/cm ²	%	HB
58%Bi/ 48%Sn	138	8,56	0,383	19	565	55	23
Sn/Pb	183	8,4	0.145	50	525	37	17

Slitina Sn/Ag/Cu

SAC (první písmena chemických zkratk prvků) slitina je složena z cínu, mědi a stříbra. Jako u ostatních bezolovnatých slitin je v kompozici nejvyšší obsah cínu a velmi malé přídavky mědi a stříbra. Eutektický bod SAC slitin se pohybuje v rozmezí od 216 °C do 217 °C a je tedy nezanedbatelně menší, než Sn/Cu slitiny. [2], [75], [76], [77]

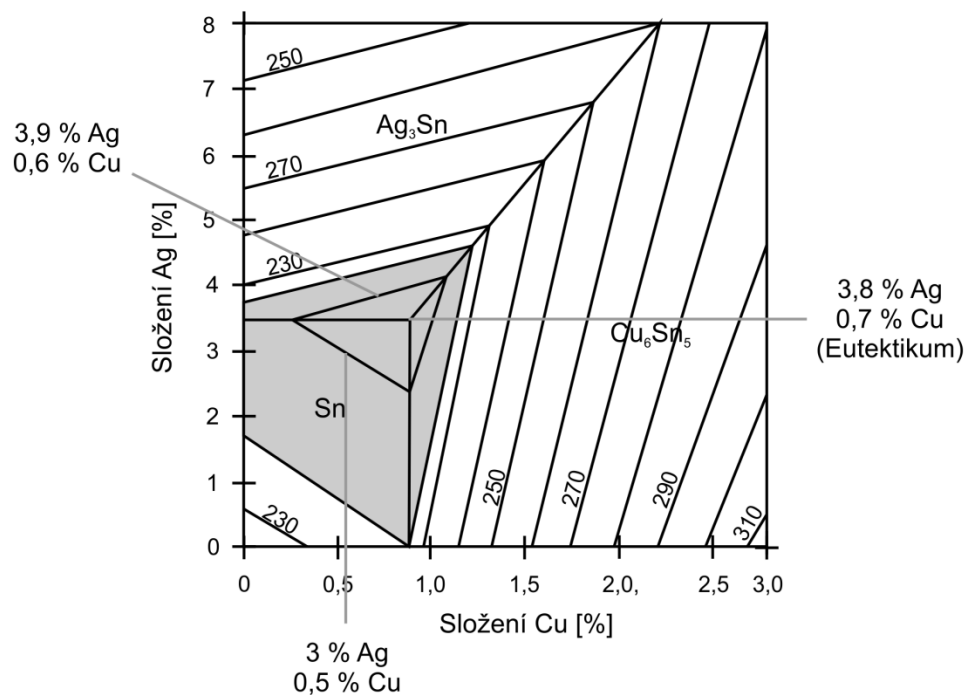


Obr. 14 Fázový diagram SAC slitin [74]

Využívaných složení těchto slitin je mnoho, liší se pouze nepatrnými změnami složení, ale změna složení samozřejmě ovlivňuje i vlastnosti různých slitin a v neposlední řadě také cenu. Například slitina SAC 105, která obsahuje pouze velmi málo stříbra má výrazně nižší cenu, než SAC 305, ale je také více odolná při pádu. Má také vyšší teplotu tání o cca 10 °C. Smáčivost této ternární slitiny je také znatelně lepší, než čisté Sn/Ag. Příklad možných kompozic SAC slitin: [2], [16], [75], [76], [77]

- Sn/3,8%Ag/0,7%Cu (eutektická slitina)
- Sn/3,5%Ag/0,7%Cu (SAC357)
- Sn/3%Ag/0,5%Cu (SAC 305)
- Sn/3,9%Ag/0,6%Cu (SAC396)
- Sn/4%Ag/0,5%Cu (SAC 405)
- Sn/1%Ag/0,5%Cu (SAC 105)

Diagram na následující straně detailněji znázorňuje vliv obsahu mědi a stříbra ve slitině bohaté na cín.



Obr. 15 Diagram závislosti mědi a stříbra v SAC slitině [78]

V průmyslu se nevyužívá jen čistě eutektická slitina, ale využívají se různé složení slitin, které v tomto diagramu (Obr. 15) spadají do vnitřního trojúhelníku a jsou tedy blízké eutektické slitině. Pokud by se slitina skládala z více Cu nebo Ag, měnila by se rapidně teplota tání a vznikaly by intermetalické sloučeniny, jmenovitě Ag_3Sn a Cu_6Sn_5 [2], [75], [76], [77]

Obecné vlastnosti těchto různých SAC slitin se mezi sebou liší jen velmi nepatrně, což dokazuje tabulka č. 5 níže, kde jsou porovnány 3 SAC slitiny a eutektická cín-olovnatá slitina: [2], [75], [76], [77]

Slitinu Sn/3,0%Ag/0,5%Cu doporučuje japonská organizace JEITA, jako velmi dobrý ekvivalent cín-olovnaté slitiny. Nejvýraznějším rozdílem je vysoká teplota tání, která je o cca 30 °C vyšší u SAC slitiny, která je také náchylnější k oxidaci, má vyšší povrchové napětí, které nepříznivě ovlivňuje pájený spoj. Elektrická vodivost eutektické slitiny činí 13,03 % IACS, ostatní kompozice ji mají téměř stejnou. Slitina Sn/3,9%Ag/0,6%Cu je vhodná pro pájení přetavením, Sn/3%Ag/0,5%Cu se doporučuje pro pájení vlnou. Kompozice Sn/3,9%Ag/0,6%Cu se využívá pro BGA/CSP komponenty a je možné ji využít pro CBGA pouzdra.[2],[16], [77]

Tab. 5 Vlastnosti vybraných SAC slitin [77]

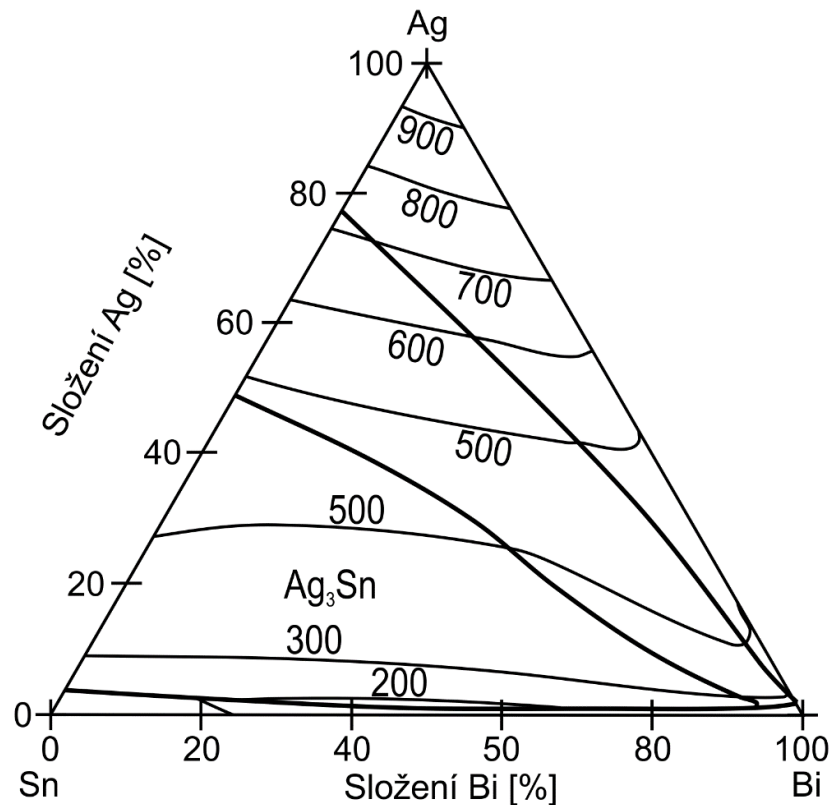
	Sn/3,9%Ag /0,6%Cu	Sn/3,5%Ag/ 0,7%Cu	Sn/3%Ag/ 0,5%Cu	63%Sn/37%Pb
Teplota tání [°C]	218	218	220	183
Pevnost v tahu [Mpa]	43,7	44	41,1	34,7
Mez kluzu [Mpa]	31,3	35	34,2	28,4
Prodloužení [%]	40,6	43,4	41	91,2
Koeficient zpevňování	0,083	0,056	0,04	0,032
Yongův modul [Gpa]	52	51	50	40
Poissonův poměr	0,35	0,36	0,36	0,37
Specifická hmotnost	7,4	7,4	7,4	8,4
Měrné teplo [J/g K]	0,22	0,22	0,23	0,18
Termální vodivost (%) 25 °C	61,1	62,1	63,2	52,8
Termální vodivost (%) 60 °C	0,082	0,086	–	0,086
Termální vodivost (%) 100 °C	21,4	21,7	21,6	21,6

Slitina Sn/Ag/Bi

Binární slitina složená ze stříbra a cínu nemá úplně dokonalé vlastnosti, které by měkké pájecí slitiny měli. Její velkou nevýhodou je poměrně vyšší teplota tání (která činí 221 °C) a špatná smáčivost. Díky těmto nedostatkům se do takových slitin přidává ještě velmi malé množství třetího prvku (obvykle méně, než 1 %) a vytvoří se ternární slitina. [2], [16]

Přídavek bismutu do cínu-stříbrné slitiny má za následek snížení teploty tání na rozmezí 208–215 °C v závislosti na výši přidaného množství. Bismut také významně zlepšuje odolnost proti únavě pájeného spoje. Nicméně může nastat situace, kdy bismut zapříčiní zvýšenou křehkost slitiny a pokud by na desce plošného spoje bylo přítomno olovo, tak se může vytvořit slitina s bodem tání okolo 96 °C, což je ale samozřejmě v tomto případě nežádoucí jev. V případě užívání této slitiny je doporučeno využití tavidel s nižší aktivní teplotou, jelikož bismut snadno oxiduje. Tato slitina má nejlepší využití v pájení přetavením. [2], [16]

Obrázek č. 16, který se nachází na další straně, detailněji přibližuje chování této slitiny v závislosti na teplotě a složení.



Obr. 16 Fázový diagram Sn/Ag/Bi slitiny [79]

Slitina Sn/Ag/Cu/Sb

Slitina složená ze 96,7%Sn/2%Ag/0,8%Cu/0,5%Sb má teplotu tání v rozsahu 216–222 °C a vykazuje větší odolnost proti únavě namáháním, než cín-olovnatá slitina. Ostatní mechanické vlastnosti se velmi blíží Sn/Ag binární slitině. Menší obsah stříbra také zapříčiňuje její lepší dostupnost. Využít tuto slitinu lze v technologii přetavením, při pájení vlnou, ale i při ručním pájení, neboť není třeba měnit teplotu hrotu, která je stejná, jako při pájení cín-olovnatou slitinou. Mezi nevýhodu této slitiny patří její cena, která je vysoká zejména díky přítomnosti stříbra. [2], [16], [80]

Slitina Sn/Zn a Sn/Zn/Bi

Samotná eutektická binární 91%Sn/9%Zn slitina (teplota tání činí 199 °C) nemá, díky zinku, příliš kvalitní vlastnosti pro pájení, neboť má velmi velkou náchylnost ke korozi a oxidaci. Přídavek bismutu (okolo 3 %) sníží teplotu tání, náchylnost ke korozi a oxidaci a zlepšuje pájitelnost. Tato slitina nemá, v porovnání s ostatními bezolovnatými slitinami a olovnatou slitinou, tak dobré vlastnosti a proto není příliš vhodná pro pájení vlnou, kde může vzniknout zvedání kuželů spoje. Výhoda této slitiny je nízká cena a teplota tání blízká cín-olovnaté slitině. [2], [80], [81]

Slitina Sn/Ag/Bi/X

Stejně, jako u Sn/Zn slitiny i zde přidání malého množství bismutu snižuje vysokou teplotu tání Sn/Ag slitiny a zlepšuje smáčitelnost. Nevýhodou takto vzniklé slitiny je rozdílný teplotní součinitel slitiny a DPS, na které se pájí, to zapříčiňuje zvedání kužele v blízkosti spoje. K takovéto slitině se přidávají další složky, jako Ge nebo Cu, které zlepšují pevnost apod. [2], [81]

2.2.3 Legislativa

Při výběru a využívání pájecích slitin v průmyslu neplatí úplná volnost, neboť společnosti, které se zabývají kompletací a montáží elektrických zařízení se musí podřizovat zákonům, které pro ně platí. Materiály, které se v Evropské Unii (tedy i v České republice) mohou využívat pro výrobu pájecích slitin, nejvíce ovlivňuje směrnice o odpadních elektrických a elektronických zařízeních a pak také směrnice o omezení používání některých látek v elektrických a elektronických zařízeních.

Směrnice o odpadních elektrických zařízeních (dále jen WEEE) byla první legislativou, která se výrazně dotkla elektrických zařízení. Poprvé byla přijata v roce 2002 a od té doby, díky tomu, že se nedařilo plnit její cíle, byla několikrát aktualizována. V současné době si Evropská Unie dává za úkol recyklovat okolo 85 % odpadu elektrického a elektronického charakteru (jedná se například o vysloužilé telefonní přístroje, televizory, lednice apod.), neboť nárůst tohoto odpadu je v současné době velmi značný. Tento odpad, dle legislativy, představuje nebezpečí pro životní prostředí, jelikož je často vyroben ze škodlivých látek (např. olovo). Tato směrnice byla tedy zavedena právě proto, aby se snížilo množství tohoto odpadu. WEEE dává za úkol výrobcům a distributorům to, že musí zajistit sběr elektrického odpadu tak, aby zákazník mohl menší odpad bezplatně vrátit. Dále je výrobce také povinen hradit sběr a recyklaci nebo zbavení se těchto odpadů. Doplnkově pak tato legislativa stanovuje, aby 50–75 % sebraného materiálu bylo recyklováno, 5 % odpadu znovu využito v provozu a standardizuje registraci a hlášení výrobců těchto odpadů. Dále jsou výrobci také povinni označovat produkty, které spadají do kategorií, které legislativa vymezuje, specifickou značkou. [82], [83], [84]

Směrnice 2002/95/EC Evropského parlamentu a Rady o omezení používání některých látek v elektrických a elektronických zařízeních (RoHS) je pro současný stav pájecích slitin nejdůležitější právní akt, který je povinný pro všechny členské státy

Evropské Unie (tedy i Českou republiku). Implementována byla dne 13. srpna 2004 v roce 2011 byla modifikována směrnicí 2011/65/EU (RoHS 2), která vešla v platnost dne 2. Ledna 2013 a její ustanovení platí dodnes. Směrnice 2011/65/EU původní směrnici pouze rozšiřuje o skupiny výrobků, pro které platí. [85], [86], [87]

Tato směrnice stanoví zákaz využití šesti zdraví závadných prvků v elektrických spotřebičích. Zákaz se vztahuje nejen na členské státy Evropské Unie, ale ovlivňuje i země, které prodávají elektrická zařízení, polotovary nebo komponenty, do země ve které je RoHS v platnosti. Každý výrobek, který má prohlášení o shodě musí být v souladu s touto legislativou, která nemá specificky stanovené žádné jiné logo. [85], [86], [87]

Prvky, které jsou dle směrnice RoHS zakázány a jejich mezní povolené množství jsou vyčteny v následujícím seznamu: [85], [86], [87]

1. Olovo (0,1%)
2. Rtuť (0,1%)
3. Kadmium (0,01%)
4. Šestimocný chrom (0,1%)
5. Polybromované bifenyly (0,1%)
6. Bolybromované difenylethery (0,1%)

Zákaz těchto prvků platí pro: [65]

1. Velké a malé spotřebiče pro domácnost
2. Zařízení informačních technologií a telekomunikační zařízení,
3. Spotřební elektronika
4. Osvětlovací zařízení
5. Elektrické a elektronické nástroje
6. Hračky
7. Zdravotnické prostředky
8. Monitorovací a kontrolní přístroje
9. Automaty

10. Jiná elektronická zařízení, která nespádají do těchto kategorií (Od roku 2019)

Směrnice RoHS 2 tedy zapříčinila nutnost rozšíření bezolovnatých pájecích slitin a úplné vymizení olovnatých slitin v elektrotechnice nejen v Evropě, ale i ostatních zemích světa (např. Čína, Spojené státy americké, Japonsko, Jižní Korea), které taktéž zakázali využití olova v elektrotechnice a elektronice. [85], [86], [87]

2.2.4 Pájecí pasty

Pájecí pasty jsou druh slitiny využívaný pro pájení plošných spojů. Obecně mají pasty kašovitě složení (kdybychom jsme je přiblížili pod mikroskopem, tak zjistíme, že se skládají z milionů kuliček pájecí slitiny). Tyto kuličky slitiny jsou zalaty v tekutém tavidle, poměr kuliček a tavidla se pohybuje kolem 90:10. Tyto pasty se využívají v procesu pájení přetavením, jehož princip jsem načrtl v kapitole výše.

Požadavky na pájecí pasty jsou: [2], [88], [89]

- Pastu musí být možné nanést dávkováním, sítotiskem a podobnými metodami
- Jakmile je pasta nanesená, nesmí se roztékat, ale musí zůstat v takovém stavu, v jakém byla nanesena
- Pasta musí umožňovat nanesení komponentu tak, aby ho zafixovala na určité pozici
- Kuličky slitiny obsažené v pastě při dostatečném ohřevu musí splynout do sebe a vytvořit pevný celek

Velikost kuliček u pájecí pasty není zanedbatelná, neboť má velký vliv na vznik oxidů. Obecně platí, že čím menší velikost zrn, tím exponenciálně roste podíl oxidů, které zhoršují smáčení. Pro minimalizaci vzniku oxidů se doporučuje pasty skladovat v co nejvíce vzduchotěsném prostředí a při nízkých teplotách (nejen pro zabránění vzniku oxidů, ale i pro minimalizování degenerace tavidla). [2], [88], [89]

2.3 Tvrdé slitiny

Tvrdé pájecí slitiny jsou slitiny s teplotou tání nad 450 °C, využívají se pro aplikace s vyšším mechanickým namáháním (okolo 500 MPa) a vyšším teplotám. Pro jejich výrobu se využívají kovy s vysokou teplotou tání, jako například měď, stříbro nebo nikl. Tvrdé pájecí slitiny se dělí na: [2], [90]

1. **Mosazné slitiny:** jedná se o slitiny tvořené mědí a zinkem, nejčastěji se jimi spojují oceli, nikl a jejich slitiny. Konkrétně se využívá například slitina CuZn39Sn pro pájení pozinkovaných trubek. Nebo se také využívá CuNi10Zn42+Ag , jenž má vysokou pevnost. [91]
2. **Stříbrné slitiny:** tyto slitiny jsou vhodné pro obtížně pájitelné materiály, které jsou citlivé na vysokou teplotu. Tyto slitiny jsou založeny na dobrých chemických a elektrických vlastnostech. Dříve se využívaly stříbrné slitiny obsahující kadmium, ale směrnice Evropské Unie zakázala jejich využívání. Stříbrné pájecí slitiny bez kadmia nemají výrazný dopad na životní prostředí a zdraví člověka. Využívají se pro spojování ocelí, mědi a jejich slitin, niklu apod. Tyto slitiny dokáží ustát teplotu až $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Konkrétně se využívají například slitiny Cu45Zn35Ag20 , jenž má bod tavení v rozmezí $690\text{--}810\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo se využívá Ag72Cu28 pro pájení ve vakuu, ocelí, mědi a jejich slitin, její teplota tání činí $780\text{ }^{\circ}\text{C}$. [91]
3. **Hliníkové slitiny:** Pro tvrdé pájení se využívají upravené slitiny hliníku a křemíku, které jsou určeny původně pro svařování. Obvykle se jedná o AlSi12 nebo AlSi5 , jenž má teplotu tání v rozmezí $573\text{--}625\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hliníkové slitiny se využívají téměř výhradně pro pájení hliníku a jeho slitin. [91]

Závěr

Pájení je nezbytný proces v elektrotechnice, který nelze zanedbat, neboť má velký vliv na kvalitu výsledného produktu. Pájení slouží pro vodivé spojování dvou kovů, při kterém využíváme pájecí slitinu pro spojení dvou kovů (velmi často se v elektrotechnice jedná o měď). Základní podmínkou vzniku kvalitního pájeného spoje je pájitelnost slitiny a teplota tání slitiny, která musí být nižší, než teplota tání spojovaných kovů. U pájecích slitin dále požadujeme dobrou smáčivost, elektrické a mechanické vlastnosti.

Jedna z nejvýznamnějších složek, která ovlivňuje celé vlastnosti pájeného spoje je výběr pájecí slitiny. Pájecí slitiny dělíme na měkké (teplota tání pod 450 °C) a tvrdé (nad 450 °C), v běžné elektrotechnice se nejčastěji využívají měkké. Dříve byla využívána téměř výhradně slitina složená z 63 % cínu a 37 % olova, neboť měla nejvhodnější teplotu tání, elektrické a mechanické vlastnosti a velmi příznivou cenu. Takový poměr cínu a olova se využíval, protože takovým poměrem složek vznikne eutektická slitina. To znamená, že přechází z kapalného do pevného stavu okamžitě, bez fází, kdy je v polotekutém stavu. Nejčastěji se využívají pouze slitiny eutektické, nebo velmi blízké eutektické slitině.

Bezolovnaté slitiny Sn/Ag se vyznačují teplotou tání 221 °C, což je poměrně vysoká teplota. Díky stříbru má slitina velmi dobrou elektrickou vodivost 13,9 % IACS, má výborné mechanické vlastnosti a je tedy vhodná pro systémy, které jsou velmi fyzicky namáhány. Tato slitina není vhodná pro pájení vlnou, neboť, díky stříbru, má velmi vysokou cenu i horší pájitelnost, než ostatní slitiny. Tato slitina je spíše vhodná pro využití v pájení neelektrických systémů. Do slitiny Sn/Ag je možné přidat bismut, který sníží teplotu tání až na 208 °C, ale také zhorší mechanické vlastnosti.

Další možnou slitinou je Sn/Cu, která má teplotu tání 227 °C, je levná, ale má horší mechanické vlastnosti. Než čistá Sn/Cu se spíše využívá slitina Sn/Ag/Cu, jenž je nyní v praxi asi nejvyužívanější slitinou pro pájení. Eutektická kompozice má teplotu tání kolem 216 °C, dobré mechanické vlastnosti a elektrickou vodivost. U této slitiny se využívá mnoho kompozic, ne pouze eutektikum, tyto kompozice se drobně liší teplotou tání, pevností a mechanickými vlastnostmi a samozřejmě také cenou. Pro pájení vlnou je vhodná slitina s velmi velkým poměrem cínu (99 %) a zbylým 1 % příměsí.

Slitina Sn/Bi není vhodná pro pájení vlnou, protože bismut není tak dostupný. Tato pájka je vhodná pro pájení v systémech, které nejsou teplotně namáhány a nevznikají velké výkyvy teplot, neboť právě díky bismutu její teplota tavení činí 138 °C.

Mezi další kandidáty, kteří by měli nahradit cín-olovnatou pájecí slitinu, patří slitiny Sn/Ag/Cu/Sb, Sn/Zn a Sn/Ag/Bi/X. Sn/Ag/Cu/Sb je vhodná aplikovat pro procesy pájení přetavením, pájení vlnou, ale i ručním pájením, nevýhoda těchto slitiny je její nákladnost (Velký problém u pájení vlnou, kde se spotřebuje velké množství pájky). Naopak Sn/Zn je levnější, ale má výrazně horší vlastnosti a je náchylná k oxidaci. Slitina Sn/Ag/Bi/X má rozdílný teplotní součinitel, než DPS a může dojít ke zvedání kužele.

Z poznatků uvedených v této práci vyplývá, že technologicky je nejlepší variantou pro pájení v elektrotechnice cín-olovnatá pájka. Zatím nebylo možné najít vhodný substitut, který by se kvalitou a vlastnostmi shodoval s touto pájkou, některé bezolovnaté slitiny se jí pouze blíží. Dalším problémem bezolovnatých slitin jsou cínová vlákna, která na cín-olovnaté pájce nevznikají. Je otázkou, zdali je dopad cín-olovnaté pájecí slitiny na životní prostředí a lidské zdraví natolik vážný, abychom mohli s určitostí říci, že její zákaz je správné rozhodnutí.

Použitá literatura

- [1] Pájení. In: *Techstroj* [online]. 2012 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: techstroj.g6.cz/T/T09.pdf
- [2] ABEL, Martin. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. 1. vyd. Pardubice: ABE.TEC, 2005, 179 s. ISBN 80-903-5970-1.
- [3] AUL, Filip. *Využití pájení v parách pro testování pájitelnosti* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/4034>.
Bakalářská. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Tomáš Novák.
- [4] PODZEMSKÝ, Jiří. STRUKTURA SPOJŮ PÁJENÝCH PÁJKAMI BEZ OLOVA A JEJÍ VLIV NA VNĚJŠÍ VZHLED SPOJE. In: *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/podzemsky.pdf>
- [5] JOHNSON MATTHEY. *Johnson Matthey: Metal Joining* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.jm-metaljoining.com/pdfs-catalogue/130 Functions of the Flux.pdf>
- [6] Rosin Flux and Paste. ABOUT SUPERIOR FLUX & MFG. CO. *Superior Flux & Mfg. Co.* [online]. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: http://www.superiorflux.com/rosin_and_paste_flux.html
- [7] Types of Solder Flux. BURRIS, Matthew. *About Tech* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://components.about.com/od/Components/a/Types-Of-Solder-Flux.htm>
- [8] Why Clean No-Clean?. SPROVIERI, John. *Assembly Magazine: Processes, technologies and strategies for assembling parts in automotive, medical, aerospace & appliances*. [online]. 2003 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.assemblymag.com/articles/84286-why-clean-no-clean>
- [9] Solderability. EFUNDA, Inc. *EFunda* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.efunda.com/materials/solders/solderability.cfm>

- [10] Introduction to Hand Soldering Technology and Electronics: Incorporating elabtronics ledfun. In: *ELabtronics* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.elabtronics.com/downloads/resources_tutorials_ledfunstudentmanual.pdf
- [11] Soldering 101: Lesson 1: Tin the Tip. ROYALESTEL. *Instructables: DIY How To Make Instructions* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/Soldering-101%3A-Lesson-1%3A-Tin-the-Tip/>
- [12] BRADÁČ, Svatopluk. *Odborný výcvik ve 3. tisíciletí: AEI-8.2 ZÁSADY PÁJENÍ, NEJČASTĚJŠÍ CHYBY PŘI PÁJENÍ*. Dostupné z: <http://int.spsou-ub.cz/projekty/ov3000/autoelektrikar/AEI-8.2 ZASADY PAJENI, NEJCASTEJSI CHYBY PRI PAJENI.pdf>
- [13] MACH, P. *Montáž v elektrotechnice*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2001, 440 s. ISBN 80-010-2392-3.
- [14] Wave soldering: information, tutorial, article about the basics of wave soldering and how it can be used in PCB assembly in electronics manufacturing. POOLE, Ian. ADRIO COMMUNICATIONS LTD. *Radio-Electronics: Resources and analysis for electronics engineers* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://www.radio-electronics.com/info/manufacture/soldering/wave_soldering/wave_soldering.php
- [15] Bezolovnaté pájení. KIRSTEN SOLDERING AG. *Pájecí zařízení firmy Kirsten Soldering* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.kirsten.cz/bezolovnate-pajeni.html>
- [16] PUTTLITZ, Karl J a Kathleen A STALTER. *Handbook of lead-free solder technology for microelectronic assemblies*. New York: Marcel Dekker, c2004, xi, 1026 p. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 170. ISBN 0824748700.
- [17] JUDD, Mike a Keith BRINDLEY. *Soldering in electronics assembly*. 2nd ed. Boston: Newnes, 1999, xi, 369 p. ISBN 07-506-3545-2.
- [18] Pájení v parách. *WEB OK2IMH* [online]. 2007 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.ok2imh.com/view.php?cisloclanku=2007040005>

- [19] Virtuální laboratoř: Pájení v kondenzovaných parách. ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY, FEKT, VUT v Brně. *Ústav mikroelektroniky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/virtualni-laborator/pajeni-v-parach/technologie/>
- [20] BERGENTHAL, Jim. KEMET. *Reflow Soldering Process Considerations for Surface Mount Application*. 1995. Dostupné z: <http://www.kemet.com/Lists/TechnicalArticles/Attachments/28/f2102a.pdf>
- [21] FILÁKOVÁ, Denisa. Technologie pájení přetavením [online]. Zlín, 2010 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: https://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/11540/fil%C3%A1kov%C3%A1_2010_bp.pdf?sequence=1. Diplomová práce.
- [22] Pájení Laserem – 93* (ostatní způsoby). Dostupné z: <related:homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-19-93laser.pdf>
- [23] 3BO,. Laser. Použití laseru při spojování autokarosérií [online]. 2013 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://dp.bajaja.net/04.html>
- [24] Laser. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [25] SERIÁL NA TÉMA LASERY - ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ. NOVÁK, Miroslav. *Lao: lasery a optika* [online]. 2011 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [26] NĚMEC, Michal. KFE FJFI ČVUT PRAHA. Plynové lasery. 2014. Dostupné také z: http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/10_plynove_lasery.pdf
- [27] Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064nm Infra red. LEONARDO TECHNOLOGY S.R.O. *Leonardo Technology: AUTOMATIZACE PRŮMYSLOVÉHO ZNAČENÍ* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning?start=12>
- [28] Rozdělení laserů. *CELAT: Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru>

- [29] Semiconductor diode lasers. WOODFORD, Chris. *Explain that stuff!: Science and technology made simple* [online]. 2014 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.explainthatstuff.com/semiconductorlaserdiodes.html>
- [30] Alloys. WOODFORD, Chris. *Explain that stuff!: Science and technology made simple* [online]. 2014 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.explainthatstuff.com/alloys.html>
- [31] Neželezné kovy a jejich slitiny. In: *ČVUT v Praze: Fakulta architektury* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <https://www.fa.cvut.cz/attachments/BAhbBlshOgZmSSIdNTJhMDZmZTI1MDE2NTMzMWQ5MDBhNWlxBjoGRVQ/Ne%C5%BEelezn%C3%A9kovy.ppt?sha=e7d38797>
- [32] Lead - Pb. LENNTECH B.V. *Lenntech: Water Treatment and Purification* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/pb.htm>
- [33] Olovo. *Periodická soustava prvků* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/82.html>
- [34] Tin - Sn. LENNTECH B.V. *Lenntech: Water Treatment and Purification* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/sn.htm>
- [35] Cín. *Periodická soustava prvků* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/50.html>
- [36] Copper - Cu. LENNTECH B.V. *Lenntech: Water Treatment and Purification* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/cu.htm>
- [37] Měď. *Periodická soustava prvků* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/29.html>
- [38] Nikl. *Periodická soustava prvků* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/28.html>

- [39] Nickel - Ni. LENNTECH B.V. *Lenntech: Water Treatment and Purification* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/ni.htm>
- [40] Zinc - Zn. LENNTECH B.V. *Lenntech: Water Treatment and Purification* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/zn.htm>
- [41] Zinek. *Periodická soustava prvků* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/30.html>
- [42] Stříbro. *Periodická soustava prvků* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/47.html>
- [43] Silver - Ag. LENNTECH B.V. *Lenntech: Water Treatment and Purification* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/ag.htm>
- [44] Bismut. *Periodická soustava prvků* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/83.html>
- [45] Bismuth - Bi. LENNTECH B.V. *Lenntech: Water Treatment and Purification* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/bi.htm>
- [46] Aluminum - Al. LENNTECH B.V. *Lenntech: Water Treatment and Purification* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/al.htm>
- [47] Hliník. *Periodická soustava prvků* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/13.html>
- [48] Podvojně slitiny. ABE.TEC, s.r.o. *SMT centrum: služby v oblasti pájení* [online]. 01.06.2010. [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/podvojne-slitiny/>
- [49] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-708-0600-1.
- [50] EFunda. EFUNDA INC. *Efunda* [online]. [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: http://www.efunda.com/materials/solders/tin_lead.cfm

- [51] CLARK, Jim. Solid-liquid phase diagrams: tin and lead. *Chemguide: helping you to understand Chemistry* [online]. 2004, 2014 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://www.chemguide.co.uk/physical/phaseeqia/snpb.html>
- [52] Thermal Equilibrium Diagrams. CONFHEY COMMUNITY COLLEGE. *Eircom Broadband eFibre Phone TV Mobile* [online]. 2007 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://homepage.eircom.net/~confeycollege/teds.html>
- [53] Olovnané/bezolovnaté pájení. MARD. *MCU-mikroelektronika* [online]. 2012 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://mcu.cz/news.php?extend.3017.15>
- [54] Lead Solder Vs Lead Free Body Soldering General Information. *Eastwood: DO THE JOB RIGHT* [online]. [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://www.eastwood.com/lead-solder-vs-lead-free-body-soldering-general-information>
- [55] Lead-Free Solder: friend or foe?. *MetaFilter* [online]. 2014 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://www.metafilter.com/138942/Lead-Free-Solder-friend-or-foe>
- [56] JOHNSON, Howard. Rollback the Lead-Free Initiative. *Signal Consulting Inc* [online]. [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: http://www.sigcon.com/Pubs/news/10_01.htm
- [57] Ag-Sn System. NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. *NIST: U.S. Department of Commerce* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agsn.html>
- [58] JACOBSEN, Kurt. Within a whisker of failure. *The Guardian* [online]. 2008 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://www.theguardian.com/technology/2008/apr/03/research.engineering>
- [59] Tin Wiskers Problems, Causes, and Solutions. *U.S. Food and Drug Administration: Protecting and Promoting Your Health* [online]. 1986, 2015 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://www.fda.gov/ICECI/Inspections/InspectionGuides/InspectionTechnicalGuides/ucm072921.htm>

- [60] Tin Whiskers Are Real and Complex. O'BOYLE, John. MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, Inc. *Maxim integrated* [online]. 2011 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5250>
- [61] SMITH, Steve. *Tin Whiskers* [online]. 2009 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://www.tinwhisker.us>
- [62] Basic Information Regarding Tin Whiskers. SAMPSON, Michael a Henning LEIDECKER. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *NEPP: NASA Electronic Parts and Packaging Program* [online]. 2009 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://nepp.nasa.gov/Whisker/background/index.htm>
- [63] Understanding and mitigating tin whiskers. O'BOYLE, John. MAXIM INTEGRATED. *Electronic Engineering Times: Connecting the Global Electronics Community* [online]. 2011 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1279227
- [64] More Benefits of Nickel Barriers in Soldering. SMITH, Jim. ELECTRONICS MANUFACTURING SCIENCES, Inc. *Electronics Manufacturing Sciences* [online]. 2011 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://www.emsciences.com/blog/more-benefits-of-nickel-barriers-in-soldering/>
- [65] Chapter 8:: Phase Diagrams. Augustana College: ed.augie.edu [online]. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://ed.augie.edu/~mlgrandb/pchem8.html>
- [66] LIU, C. M., C. E. HO, W. T. CHEN a C. R. KAO. Reflow soldering and isothermal solid-state aging of Sn-Ag eutectic solder on Au/Ni surface finish. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2001, vol. 30, issue 9, s. 1152-1156 [cit. 2015-04-29]. DOI: 10.1007/s11664-001-0143-7.
- [67] PREMIER FARNELL PLC. *PROPERTIES OF SOLDERS*. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/315929.pdf>
- [68] Solder Alloys: Physical and Mechanical Properties. V. BOLOTOFF. *Alasir Enterprises* [online]. 2010 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: http://alasir.com/reference/solder_alloys/

- [69] Cu-Sn System. NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. *NIST: U.S. Department of Commerce* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/cusn.html>
- [70] *Database for Solder Properties with Emphasis on New Lead-free Solders*. Colorado, 2002. Dostupné z: http://www.msed.nist.gov/solder/NIST_LeadfreeSolder_v4.pdf. National Institute of Standards and Technology & Colorado School of Mines.
- [71] TORRES, Alberto, Luis HERNÁNDEZ a Octavio DOMÍNGUEZ. Effect of Antimony Additions on Corrosion and Mechanical Properties of Sn-Bi Eutectic Lead-Free Solder Alloy. *Materials Sciences and Applications* [online]. 2012, vol. 03, issue 06, s. 355-362 [cit. 2015-04-18]. DOI: 10.4236/msa.2012.36051.
- [72] GOURLEY, Robbin a Chuck WALKER. Brazing and soldering: proceedings of the 5th International Brazing and Soldering Conference : April 22-25, 2012, Red Rock Casino Resort Spa, Las Vegas, Nevada, USA. Materials Park, Ohio: ASM International, 2012, xv, 516 p.
- [73] KATTNER. Ag-Cu-Sn Phase Diagram & NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. *Material Measurement Laboratory* [online]. 2000 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agcusn.html>
- [74] MEI, Helen A. HOLDER a Hubert A. WANDER PLAS. Low-Temperature Solders: The application of low-temperature solders in surface mount assembly processes for products that do not experience harsh temperature environments is technically feasible. One single alloy may not be appropriate as a universal solution. *Hewlett-Packard journal: technical information from the laboratories of Hewlett-Packard Company* [online]. 1996, Issue 4, s. 10 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://www.hpl.hp.com/hpjournal/96aug/aug96a10.pdf>
- [75] NGUYEN, T. T., D. YU a S. B. PARK. Characterizing the Mechanical Properties of Actual SAC105, SAC305, and SAC405 Solder Joints by Digital Image Correlation. ISBN 10.1007/s11664-011-1534-z.

- [76] Low Cost SAC105 Lead-Free Solder Spheres. CAPLINQ CORPORATION. *CAPLINQ: Expertise in worldwide delivery* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.caplinq.com/sac105.html>
- [77] SAWAMURA, a IGARASHI. ALMIT TECHNOLOGY LTD. Difference Between Various Sn/Ag/Cu Solder Compositions Sn/Ag/Cu Solder Compositions. 2005. Dostupné také z: <http://www.almit.com/downloads/Agents/SACAlloyComparison.pdf>
- [78] Design for Product Build: Unit 1: The materials of electronics. THE UNIVERSITY OF BOLTON. *Online Postgraduate Courses for the Electronics Industry* [online]. 2015 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: http://www.ami.ac.uk/courses/ami4945_dpb/u01/
- [79] Ag-Bi-Sn System. NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. *NIST: U.S. Department of Commerce* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agbism.html>
- [80] GANESAN, Sanka a Michael PECHT. *Lead-free electronics*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2006, xxv, 766 p. ISBN 9780471786177.
- [81] SUHIR, Ephraim, Y LEE a C WONG. *Micro- and opto-electronic materials and structures: physics, mechanics, design, reliability, packaging*. New York: Springer, c2007, 2 v. ISBN 9780387279749.
- [82] European Union WEEE registration & WEEE compliance. WELLKANG CONSULTING. *WEEE* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.weeregistration.com>
- [83] DIRECTIVE 2012/19/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)
- [84] Waste Electrical and Electronic Equipment recycling (WEEE). HSE: Information about health and safety at work [online]. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.hse.gov.uk/waste/waste-electrical.htm>

- [85] DIRECTIVE 2011/65/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. In: *Eur-Lex*. 2011. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32011L0065&from=en>
- [86] Odpady, RoHS. GREBENÍČEK, David. *ITC: institut pro testování a certifikace* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.itczlin.cz/cz/odpady-rohs>
- [87] RoHS Compliance Guide: Regulations, 6 Substances, Exemptions, WEEE. [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.rohsguide.com>
- [88] Solder paste basics. TARR, Martin. *Online Postgraduate Courses for the Electronics Industry* [online]. [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0245_spb/index.html
- [89] ELECTRONICS PRODUCTION AND MANUFACTURE: How to use solder paste. POOLE, Ian. *Radio-Electronics.com: news for electronics engineers* [online]. [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: http://www.radio-electronics.com/info/manufacture/soldering/solder_paste/how-to-use-solder-paste.php
- [90] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-708-2940-0.
- [91] Pájení kovů. KUBÁLEK, Jaroslav. *Časopis KONSTRUKCE: informace o uplatnění konstrukcí a návazných oborů při stavbách ve stavebnictví a strojírenství* [online]. 2012 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/pajeni-kovu/>

Seznam obrázků

OBR. 1 PÁJENÝ SPOJ	11
OBR. 2 SPRÁVNĚ (VLEVO) A NESPRÁVNĚ (VPRAVO) PÁJENÝ SPOJ	14
OBR. 3 PÁJECÍ STANICE QUICK 203H ESD 90W S REGULACÍ TEPLoty	15
OBR. 4 SCHÉMA PÁJENÍ JEDNODUCHOU VLNOU	16
OBR. 5 ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA PÁJENÍ PŘETAVENÍM	18
OBR. 6 JEDNODUCHÉ SCHÉMA LASERU S VÝBOJKAMI, JAKO ZDROJEM ENERGIE	19
OBR. 7 FÁZOVÝ DIAGRAM CÍN-OLOVNATÉ SLITINY	24
OBR. 8 CHLAZENÍ SLITIN	25
OBR. 9 MIKROSKOPICKÝ SNÍMEK CÍNOVÝCH VLÁKEN	27
OBR. 10 FÁZOVÝ DIAGRAM CÍN-STŘÍBRNÉ SLITINY	28
OBR. 11 FÁZOVÝ DIAGRAM CÍN-MĚDĚNÉ SLITINY	29
OBR. 12 FÁZOVÝ DIAGRAM SN/SB SLITINY	30
OBR. 13 FÁZOVÝ DIAGRAM SN/CU SLITINY	31
OBR. 14 FÁZOVÝ DIAGRAM SAC SLITIN	32
OBR. 15 DIAGRAM ZÁVISLOSTI MĚDI A STŘÍBRA V SAC SLITINĚ	33
OBR. 16 FÁZOVÝ DIAGRAM SN/AG/BI SLITINY	35

Seznam tabulek

TAB. 1 ZÁKLADNÍ KOVY A JEJICH PÁJITELNOST	13
TAB. 2 VLASTNOSTI SLITINY SN/AG	28
TAB. 3 VLASTNOSTI SLITINY SN/SB	30
TAB. 4 VLASTNOSTI SLITINY SN/BI	31
TAB. 5 VLASTNOSTI VYBRANÝCH SAC SLITIN	34