

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektronická  
katedra elektrotechnologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE  
PÁJECÍ SLITINY A JEJICH VLASTNOSTI

---

2017

Bc. Marek Lauko

## ANOTACE

Tato diplomová práce je zpracována, jako rešerše o pájecích slitinách v elektrotechnice.

První část je zaměřena na pájecí slitiny a jejich vlastnosti. Jsou zde popsány metody k jejich měření, včetně metody smáčecích vah doplněné o normy. Jsou tu popsána také tavidla a jejich funkce.

V druhé části byla zhotovena sada vzorků pro změření popsanou metodou smáčecích vah v teoretické části a zhodnocení výsledků zkušebních slitin.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Pájení, pájecí slitiny, smáčivost, metoda smáčecích vah, propojování v elektrotechnice, pájitelnost

## ABSTRACT

This diploma thesis is processed as a search for soldering alloys in electrical engineering.

The first part focuses on soldering alloys and their properties. There are described methods for measuring them, including the method of wetting weights supplemented by standards. There are also described fluxes and their functions.

In the second part a set of samples was made for the measurement by the method of wetting weights in the theoretical part and evaluation of the results of the test alloys.

## KEY WORDS

soldering, soldering alloys, wetting, weighing method, interconnection in electronics, solderability

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji své rodině za podporu, kterou mi celé ty roky dodávaly. Děkuji Anetě Veselé za morální podporu. Děkuji Ing. Davidu Buškovi Ph.D za čas věnovaný při konzultacích a měření, a za věcné připomínky k mé práci.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci zpracoval sám a použil jsem podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažných námitek proti užívání tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

Podpis.....

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lauko** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **384557**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Technologické systémy**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Pájecí slitiny a jejich vlastnosti**

Název diplomové práce anglicky:

**Solder alloys and their properties**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s pájecími slitinami a jejich vlastnostmi.
- 2) Seznamte se s metodami, které se používají k určování vlastností pájecích slitin.
- 3) Vyberte pájecí slitiny, které porovnáte metodou smáčecích vah z pohledu jejich použitelnosti v elektrotechnickém průmyslu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice, 2005, ISBN 80-803597-0-1
- [2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [3] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. David Bušek Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

\_\_\_\_\_

Datum zadání diplomové práce: **20.02.2017** Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

# Obsah

ÚVOD .....	9
<b>1. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>11</b>
1.1 ÚVOD DO PROPOJOVÁNÍ .....	11
1.1.1 Elektrické omezování .....	11
1.1.2 Náhrada olova .....	12
1.1.3 Kvalita pájeného spoje.....	13
1.2 PÁJECÍ SLITINY.....	14
1.2.1 Tvrdé pájky .....	14
1.2.2 Měkké pájky.....	15
1.3 TAVIDLA .....	18
1.3.1 Tavidla pro tvrdé pájení.....	20
1.3.2 Tavidla pro měkké pájení.....	20
1.4 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PÁJKY .....	22
1.4.1 Smáčivost.....	22
1.4.2 Kohezní práce.....	23
1.4.3 Adhezní práce .....	23
1.4.4 Rozestírací koeficient.....	24
1.4.5 Úhel smáčení .....	24
1.4.6 Absorpce .....	26
1.4.7 Hystereze úhlu smáčení .....	27
1.4.8 Drsnost povrchu.....	28
1.4.9 Povrchové napětí .....	28
1.4.10 Vzlínavost.....	28
1.4.11 Eutektická teplota pájky .....	29
1.4.12 Intermetalické vrstvy .....	31
1.5 URČOVÁNÍ VLASTNOSTÍ PÁJECÍCH SLITIN .....	33
1.5.1 Pájitelnost.....	33
1.5.2 Test roztékavosti.....	34
1.5.3 Ponořovací test.....	35
1.5.4 Kuličkový test.....	35
1.5.5 Metoda smáčecích vah .....	36
1.6 NORMY PRO DEFINICI MĚŘENÍ METODOU SMÁČECÍCH VAH .....	41
1.6.1 Rozdělení tavidel.....	42
1.6.2 Požadavky na pájecí lázeň .....	44
1.6.3 Hladina elektrického a mechanického šumu .....	44
1.6.4 Hloubka ponoru .....	44
1.6.5 Rychlost ponořování .....	45
1.6.6 Doba ponoření .....	45
<b>2. PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>46</b>

2.1	ÚVOD .....	46
2.2	PŘÍPRAVA VZORKŮ .....	47
2.2.1	<i>Měděné vzorky</i> .....	47
2.2.2	<i>Příprava tavidla</i> .....	49
2.3	MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE A VYBAVENÍ .....	51
2.3.1	<i>Meniskograf MK6</i> .....	51
2.3.2	<i>Měřící optický systém Hawk QC 5000</i> .....	51
2.3.3	<i>Mikrováha Mettler Toledo AG245</i> .....	52
2.4	MĚŘENÍ VZORKŮ .....	53
2.4.1	<i>Časová posloupnost zkoušky proběhla dle normy</i> .....	53
2.4.2	<i>Měřené slitiny pájek</i> .....	54
2.5	VYHODNOCENÍ.....	57
2.6	NAMĚŘENÉ A DOPOČÍTANÉ HODNOTY .....	58
2.6.1	<i>Vzorky bez degradace</i> .....	58
2.6.2	<i>Vzorky s degradací v acetonu</i> .....	60
2.6.3	<i>Simulace nepříznivých vlivů na měření</i> .....	60
2.6.4	<i>Výpočet rychlosti odparu isopropanolu ze vzorku před ponořením</i> .....	61
2.6.5	<i>Optické porovnání vzorků</i> .....	61
2.6.6	<i>Naměřené chytraktistiky</i> .....	67
<b>3.</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>69</b>
<b>4.</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	<b>71</b>
<b>5.</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>73</b>
<b>6.</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>74</b>
<b>7.</b>	<b>SEZNAM GRAFŮ</b> .....	<b>75</b>
<b>8.</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>76</b>



# ÚVOD

Ve své práci „Pájecí slitiny a jejich vlastnosti“ se budu zabývat zejména druhy pájek a jejich fyzikálními vlastnostmi, které se uplatňují v procesu pájení.

Pájení je jedna z metalurgických metod spojování. Tyto spoje musí mít potřebné vlastnosti pro správné uvedení do praxe. V montáži elektronických obvodů a zařízení se k propojování používá převážně měkké pájení, které je i v současné době výskytu elektricky vodivých lepidel převažující technologií. Také tvrdé pájení má své nenahraditelné místo, ať už v technologiích pouzdření nebo v oblasti výroby motorů a jiných strojů, kde je vyžadována mimo vysokých teplot také mechanická odolnost. Většinou využívá strojní pájení, které umožňuje přesně dodržovat a reprodukovat technologický proces. Proto je třeba mít o pájkách a jejich vlastnostech potřebné informace, aby se dané strojní pájení mohlo s vysokou kvalitou a rentabilitou realizovat. Ruční pájení se oproti strojnímu z ekonomických důvodů používá ve zlomkové míře především na opravy a přepracování výrobků nebo na malosériovou výrobu.

Neustálý vývoj nových technologií klade zejména na kvalitu a jakost vysoké nároky. Dříve z jednoduchých výrobků se stávají velice složitá a náchylná zařízení, která nelze vyrábět stejnými postupy jako v minulosti. Počet úkonů při výrobě se razantně zvýšil. Při zachování stávajících výrobních principů a technologií by vznikla větší ztráta z důvodu většího množství nefunkčních výsledných výrobků. Proto se vyvíjí nové slitiny a hledají se technologické postupy, které dokáží využít nových vlastností. Nemalý význam má v tomto odvětví ekologie, a proto je třeba hledat alternativy pro pájky, které jsou však nově omezeny.

Další neméně důležitou součástí v pájení, které je popsáno v této práci jsou aktivátory – tavidla, jež pomáhají vylepšovat vlastnosti pájek zejména v procesu pájení. Umožňují tím využití pájecích slitin, které by jinak nemohly být z důvodu jejich nedostatečných charakteristik nasazeny do výrobních technologií.

Existuje soubor metod na pozorování a měření vlastností pájecích slitin. Tyto metody budou popsány v teoretické části, kde hlavní metodou pro tuto práci bude metoda smáčecích vah. Je popsána včetně důležitých norem, které měření normalizují.

# 1. TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Úvod do propojování

Elektrotechnický průmysl, jakožto nejdynamičtěji se rozvíjející ve světě, řeší v elektrickém propojování hned několik kritérií. Musíme brát na zřetel požadavky z hlediska nároků na cenu, rychlost a náročnost jejich aplikace atd. To klade důraz na samotný vývoj v tomto odvětví.

Základní požadavky, na které se dnes poukazuje jsou:

- chemická stálost
- odolnost proti teplotním změnám
- pevnost spoje
- výbornou elektrickou vodivost
- ohled na ekologii

### 1.1.1 Elektrické omezování

Se vzrůstající výrobou elektropřístrojů a elektroniky vzrůstají požadavky na ekologii. To nejen na ekologii používaných materiálů, ale také ekologii výroby, aplikace a následné recyklace výrobků.

Direktiva (2002/95/EC) vydaná Evropskou komisí dne 27. ledna 2003 byla rozšířena o směrnici RoHS (The Restriction of Hazardous Substances Directive) platná od 1. července 2006. Tuto směrnici musí dodržovat všechny členské státy EU, ale i země mimo EU jako je Čína nebo Jižní Korea, či jiné státy, které chtějí vyvážet své výrobky do zemí EU.

RoHS omezuje obsah hlavních 6 látek:

- kadmium
- olovo
- rtuť
- šestimocný chrom
- polybromované difenylethy a bifenyly

Směrnice stanovuje přípustný podíl kadmia na 0,01 % a u ostatních látek na 0,1 % ve výrobních materiálech.

Výjimky jsou ve výrobě, kde v současné době není možné daný výrobek vytvořit bez jejich použití, jako je např. akumulátor. Výjimky mají i zařízení pro armádu, lékařství a vesmírný program, kde alternativní elektrický spoj nedosahuje kvalit jejich neekologické verze.

### 1.1.2 Náhrada olova

Směrnice omezuje jeden z hlavních materiálů, používaný právě v technologiích propojování – olovo.

V současné situaci jsou využívány dvě hlavní náhrady propojování:

- bezolovnaté pájky
- elektricky vodivá lepidla

Bezolovnaté pájky jsou založeny na binárních až terciálních slitinách povolených kovů. Problém s náhradou za olovo je v teplotách, při kterých se pájka nebo pasta taví. Teplota tavení je řádově posunuta o více jak 100°C a více. To omezuje využitelnost pájek a past, kde nemůže být tak vysoká teplota použita.

### 1.1.3 Kvalita pájeného spoje

Posouzení kvalitního pájeného spoje závisí na míře odolnosti vůči těmto několika faktorům: mechanické a tepelné namáhání a stárnutí materiálu.

#### ***Tepelné namáhání***

Vzniká působením tepla na spoj. V tom probíhá zvýšené pnutí - zvláště u střídavého namáhání zařízení, díky rozdílné teplotní roztažnosti materiálů. Urychluje stárnutí materiálů.

#### ***Mechanické namáhání***

Interní namáhání vznikající vlivem rozdílné roztažnosti materiálů a externího působení tlaku na spoj či dynamického zatížení, jako jsou vibrace.

#### ***Stárnutí materiálu***

Na materiálu se tvoří difuzní vrstvy, postupem času se tato vrstva zvětšuje a narušuje tak elektrickou a mechanickou vlastnost spoje.

#### ***Pozorovací metody pro zhodnocení odolnosti:***

Jedná se o souhrn dat, vypořádaný a naměřený za nastavených podmínek po určitý čas. Využívá se zrychlené degradace a simulace mechanického namáhání. Takto lze spoje testovat buď jednotlivě nebo je vzájemně současně kombinovat. Z vypořádaných dat se stanoví, zda daný spoj vyhověl či nikoliv.

## 1.2 Pájecí slitiny

Pájecí slitinu také označujeme jako pájku. Jedná se o slitinu kovů s nízkou teplotou tání. To v elektrotechnice používáme pro vytvoření vodivého a pevného spoje mezi součástkami. Úkolem pájky není jen elektricky propojovat, ale slouží také k uchycení součástky na desce plošných spojů nebo spojení vinutí u rotorů. Proto jsou sledovány i vlastnosti jako je mechanická pevnost a odolnost na klimatické změny, jejich životnost a další. Tyto vlastnosti můžeme řídit a ovlivňovat volbou pájecích slitin, popřípadě úpravou jejich technologického způsobu pájení.

### 1.2.1 Tvrdé pájky

Tvrdé pájky jsou slitiny kovů s teplotou nad 450°C. Při tomto pájení se jako u pájení na měkko používá tavidlo, či se pájí ve vakuu nebo v ochranné atmosféře. Zahřátí tvrdé pájky se provádí převážně plamenem. (Kyslíko-acetilenový, vzducho-acetilenový, vzducho-svítiplynový).

Pájené materiály mohou být různé nebo ze stejných materiálů, které jsou zahřáty na požadovanou pájecí teplotu. Pájený materiál se nesmí při procesu pájení mimo tvrdé přídávané pájky tavit. Musí tedy být splněn základní požadavek na pájení - pájka musí mít nižší teplotu tavení než základní pájený materiál. Propojení materiálu dojde v přechodu pájky do základního materiálu. Pevnost spoje je dána pevností meze, kde se pájka smísila s materiálem základním. Tvrdé pájení se využívá tam, kde nelze dobře využít pájení na měkko - např. litiny, bronz, mosaz a specifické druhy ocelí a slitin např. mosaz s mědí nebo ocel s mědí či mosazí. Využívá se i u kovů, které by se při svařování vlivem vysoké teploty poškodily.

V požadavcích na tvrdou pájku se klade důraz na dobré smáčení a mechanické vlastnosti. Její tekutost musí být taková, aby umožňovala pájení ve všech polohách. Tyto pájky se dodávají v drátech, zrnech, litých tyčích a pásech.

Slitiny pro tvrdé pájení se dají rozdělit do skupin:

- Mosazné pájky: tyto pájky tvoří slitina kovů mědi a zinku, jejich pracovní teploty se pohybují od 710 °C až do 1100 °C
- Měděné pájky: používají se pro pájení mědi a jejich slitin do 10 % obsahu niklu, jsou založeny na bázi měď – stříbro - fosfor nebo měď - fosfor. Vyskytují se i s přídavkem cínu. [15] Fosfor zde účinkuje i jako tavidlo.
- Stříbrné pájky: jsou ze slitiny stříbra, zinku a mědi a podle obsahu stříbra se dělí do dvou skupin:
  - a) **S obsahem stříbra do 20 %:** tyto pájky jsou využívány pro citlivější materiály na teplo, jako například měď. Pracovní teplota je v rozmezí od 710 °C až 880°C.
  - b) **S obsahem stříbra nad 20 %:** tyto pájky se používají při pájení karbidů. Mimo samotného stříbra obsahuje slitina prvky mědi, zinku, cínu, manganu, niklu a v poslední řadě dnes už omezeného prvku kadmia. Pracovní teploty jsou v rozmezí od 610 °C až 960 °C.

### 1.2.2 Měkké pájky

Měkké pájky jakožto slitiny s nízkou teplotou tání, používáme v elektrotechnice pro vodivé spojení součástek na desce plošných spojů. Včetně elektrické vodivosti jsou důležité i další vlastnosti jako je mechanická pevnost, životnost spoje a další. Tyto vlastnosti jsou ovlivněny např. druhem pájecí slitiny nebo technologickým způsobem pájení.

Základem všech pájek je cín, ke kterému se přidávají jiné prvky, jako je měď, stříbro nebo dnes už legislativně omezené olovo. V menším množství se přidávají kovy, jako bizmut, germanium, popř. indium.

V základu se měkké pájky rozdělují do dvou kategorií.

- olovnaté pájky
- bezolvnaté pájky

U olovnatých pájek je nejvíce používána takzvaně eutektická slitina Sn63Pb37 s teplotou 183°C. Příměsí dalších kovů nebo změnou poměrů cínu a olova dosáhneme ovlivnění vlastností. Tím můžeme přizpůsobit pájku pájenému materiálu nebo technologii pájení. Např. slitina Sn60Pb38Cu2 je hojně využívána k ručnímu pájení z důvodu lepších vlastností při pájení na měď, která není dokonale čistá. [3]

Druhá skupina pájek je skupinou ekologicky vyhovující k dnešní legislativě. K cínu, jako základu bezolvnaté slitiny se nejčastěji přidává stříbro nebo měď. Z tohoto pohledu je nejrozšířenější bezolvnatá pájka SAC305, která má obsah stříbra 3% a mědi 0,5%. Teplota tavení této slitiny je v rozmezí od 217°C do 220°C. Ze skupiny eutektické bezolvnaté pájky je to SnCu07 s obsahem mědi 0,7% a teplotou tání 227°C. Bezolvnaté pájky mají většinou vyšší teplotu tavení, než pájky olovnaté. [1][3]

V následující tabulce jsou uvedeny prvky, které se využívají v pájecích slitinách spolu s úpravou vlastností slitiny.

Stříbro	Ag	stříbro sníží bod tavení, zajistí lepší smáčení a zlepši pevnost spoje
Měď	Cu	zlepši pevnost spoje
Zinek	Zn	má nízkou teplotu tavení, zlevňuje slitinu
Bizmut	Bi	sníží bod tavení, zajistí lepší smáčení
Antimon	Sb	zlepši pevnost spoje, sníží povrchové napětí, pro zlepšení rozlévání a prevenci nadzvedání součástek
Indium	In	sníží bod tavení
Nikl	Ni	prevence odsmáčení
Germanium	Ge	prevence oxidace

*Tabulka č. 1 Prvky a jejich přidání do slitiny*



**Sn63Pb37** je nejrozšířenější olovnatou pájkou. Tato pájka má bod tání okolo 183°C. Jedná se o velmi levnou pájku s porovnáním bezolovnatých pájek. Pro nízkou teplotu tání je vhodná v elektroprůmyslu do mnoha aplikací, kde je potřeba co nejnižší teplota pro pájení a zároveň se klade důraz na mechanickou odolnost a velmi dobrou elektrickou vodivost. Spájené spoje mají dlouhou životnost. Tyto pájky se mohou stále používat do aplikací pro armádu či zdravotnictví a vesmírný program, bez ohledu na ekologická omezení.

**Sn96,5Ag3Cu0,5** patří do skupiny SAC pájek a je nejrozšířenější bezolovnatou pájkou. Bod tání má v rozmezí 217°C - 218°C. Tyto pájky využívá většina japonských výrobců elektrotechniky pro pájení vlnou a 75 % podniků pro ruční pájení. Jedná se o dražší pájku oproti Sn63Pb37, ale s ohledem na ekologická omezení je tato pájka masově využívána výrobcí spotřební elektrotechniky. Stříbro sníží bod tavení, zajistí lepší smáčení a spolu s mědí zlepší pevnost spoje. Tyto pájky nejsou vhodné pro povrchové úpravy součástí SnZn a SbPb.

**SnAgBi** tato pájka je označována obchodním názvem „Multi-weld“ a vyniká bodem tání, který je 140°C. Tato vlastnost byla dosažena zejména příměsí stříbra a bizmutu, který nejen sníží bod tavení, ale zajistí lepší smáčení pájky. Masové aplikaci této slitiny brání cena pájky. Proto bude v průmyslu využíván zejména tam, kde není přípustná teplota nad 150°C z důvodu poškození finálního výrobku.

## 1.3 Tavidla

Jsou to nekovové látky – aktivátory, které odstraňují a zabraňují další oxidaci povrchu v místech, kde se aplikuje technologie pájení. Chemicky čistí pájecí spoj i v samotném procesu pájení. Tavidla reagují s oxidy, a to zapříčiní změnu povrchového napětí pájeného spoje. Jelikož povrchové napětí pájecí plochy se zdatelně zvýší, zlepší tím vlastnosti smáčivosti pájky. Všeobecně tavidla mají aktivační teploty v rozestupu 50 °C až 100 °C před eutentickou teplotou dané pájky. Každé tavidlo má definovaný aktivační čas, který potřebuje pro reakci na rozpuštění nečistot při pájení.

Druhotné využití tavidel je k chemické očištění nástrojů a pájecích hrotů.

Funkce tavidel v procesu pájení je pro dosažení požadovaných nároků na kvalitu a jakost vyráběných spojů nezbytná. Tavidla se používají zejména pro:

- zlepšení přenosů tepla od zdroje do pájeného spoje
- za působení aktivační teploty tavidla fyzikálně i chemicky čistí a reagují s nečistotami a oxidy, jak již vzniklých, tak vznikajících v průběhu pájení a zabraňují reoxidaci povrchu
- Ččisticím účinkem snižují povrchové napětí pájky a zvyšuje povrchové napětí pájecí plochy

Tavidla musí splňovat tato kritéria:

- musí být kompatibilní se všemi používanými materiály
- musí splňovat ekologickou úroveň na ochranu životního prostředí
- musí být v souladu se zákony dané země
- musí mít aktivační teplotu a reakční rychlost vyhovující pro dané aplikace pájení
- musí být dostupná a ekonomicky příznivá

S ohledem na ekologii a používání pájek bez obsahu olova dochází k větším teplotním rozsahům používaných pájek, a to zejména k vyšším pracovním teplotám. To zvyšuje nároky na parametry tavidla. Všeobecně používaná tavidla jsou stejná, jako u pájek s olovem.

Ve výrobních závodech se používá z ekonomických a ekologických důvodů skupina tavidel NC – No Clean (bezoplachová). To jsou tavidla na bázi pryskyřic.

Preferují se tavidla VOC-Free – Volatile Organic Compounds (tavidla bez organických látek) tyto látky jsou hořlavé a mohou unikat do atmosféry. VOC-Free jsou nehořlavá, bezpečná a pomaleji se odpařují. Obsahují ale vodu a mají horší vlastnosti, zejména větší povrchové napětí.

Tavidla se dodávají ve formě:

- pevné látky (kalafuna)
- kapaliny (rozpuštěné pryskyřice)
- pasty
- prášku
- gelu

#### **S leptavým účinkem**

Základní částí těchto anorganických tavidel je ředěná kyselina. Zejména je to kyselina solná, fosforečná nebo chlorid zinečnatý či chloridy alkalických kovů. Teplota tání je závislá na chemickém složení tavidla a přísadě dalších složek. Zbytky tavidel se musí odstranit. Například oplachem kyselinou octovou. [6]

#### **Bez leptavého účinku**

Tavidla organická se používají tam, kde nelze zbytky tavidel odstranit, zejména v elektrotechnickém průmyslu, kde by anorganická tavidla způsobovala korozi materiálů. Základním prvkem organických tavidel je kalafuna, jakožto přírodní pryskyřice.

### 1.3.1 Tavidla pro tvrdé pájení

#### **Borax – Tetraboritan sodný**

Toto tavidlo je hojně využíváno. Teplotu tavení má 783°C. Pokud je zapotřebí jiných teplot lze tavidlo modifikovat příměsí, která ovlivní teplotu tavení. Pro nižší teploty se používá přísady chloridu zinečnatého. V opačném případě, když potřebujeme pájet za vyšších teplot se bod tavitelnosti posune přidáním kyseliny borité do tavidla.

V případě jiných tavidel pro tvrdé pájení se mimo boraxu využívají soli. Tyto soli jsou buď na bázi fosforu nebo na halových prvků.

### 1.3.2 Tavidla pro měkké pájení

Tavidla na pryskyřičné bázi se mohou dělit do skupin dle úrovně aktivity[23]

- typ R (nejnižší aktivita)  
jedná se o bílou kalafunu rozpuštěnou v lihu, je vhodná na velmi dobře pájitelné povrchy, má slabou čistící schopnost
  
- typ RMA (středně aktivovaná)  
Přidáno malé množství organických směsí jako jsou aminohydrochloridy, polybazické karbonové kyseliny a další
  
- typ RA (aktivovaná)  
způsobují urychlené smáčení snadno pájitelných kovů. Tyto tavidla z důvodu jejich aktivity se po pájení odstraňují
  
- typ RSA (superaktivovaná)  
tyto tavidla mají nejvyšší aktivitu a musejí být kompletně odstraněna, aby se snížilo riziko koroze na spojích

## **Kalafuna**

Kalafuna je jedna z nejobyčejnějších a také nejlevnějších druhů pryskyřic. Usazuje se jako pevný zbytek při destilaci terpentýnového balzámu, získaného z různých druhů borovic. Obsahuje 90 % volných pryskyřičných kyselin a malé množství resenů a resinolů. Tyto kyseliny (pimarová a abietová), které se složením sobě podobají, obsahují dvě nenasyčené vazby a na vzduchu se proto okysličují. Projevuje se to tak, že kalafuna se stává méně rozpustnou a hnědne. Obecně je kalafuna amorfní látka, sklovitá, křehká a bývá žlutě až hnědě zbarvená. Taje při teplotním rozmezí 80-120 °C. [7] Reakční působení se pohybuje v rozmezí až od 180°C do 250°C. Po překročení maximální teploty se kalafuna vypařuje a tím přestává chemicky působit. Jako tavidlo je vhodná pro pájení stříbra, mosazi, mědi a naopak nevhodná je např. ocel. Zbytky se rozpouštějí běžnými rozpouštědly, jako je například isopropanol. [6]

## **RAZANT (MTV-125R)**

Jedná se o pastu. Je určena k ručnímu pájení všude tam, kde je možno po pájení provést oplachování vodou. Vyznačuje se velmi dobrou čistící schopností nejen u barevných kovů, ale i u ocelí, niklu a nekorozních ocelí. Jedná se o koncentrát s obsahem účinné složky min. 75% . Dle ČSN EN 29454-1 k.č.2.1.2.C. Základem tavidla je aminokyselina a její derivát (aminokyseliny se používají jako aktivátory tavidel a v tomto případě se jedná o základní složku).

Teplota tání max. 140 °C, při teplotě 25°C stupňů prstovitá konzistence. Pracovní teplota 160 °C až 350 °C. Teplotě 350 °C odolává min. 120 sec. [8]

## **ELCHEMCO S-FUTURE REWORK JELLY**

Tavidlo ze skupiny No Clean. Homogenní pájecí přípravek - želé - určené zejména pro opravy plošných desek s montáží SMT i pro běžné plošné spoje s pokovenými otvory. Neobsahuje halogenidy, splňuje požadavek vojenské normy J-STD-004 ROL0, nezanechává korozivní zbytky, snadná aplikace. Taje při 50°C, maximální teplota je 250°C. [9]

## 1.4 Fyzikální vlastnosti pájky

### 1.4.1 Smáčivost

Smáčivost je první fází vzájemného fyzikálně-chemického působení atomů roztavené pájky na povrch spojovaného materiálu.

Na vytvoření fázového rozhraní o infinitezimálně malé ploše velikosti  $dA$  se spotřebuje povrchová práce:

$$dw = \gamma_{ff} dA \quad [T, p],$$

kde konstanta úměrnosti  $\gamma_{ff}$  je **mezifázové napětí**. [11]

Ke změně plochy povrchu o  $\Delta A$  je nutná práce  $w$  za konstantního tlaku a teploty:

$$w = \gamma_{ff} \Delta A$$

Probíhajícímu ději odpovídající teplo:

$$q = -T \left( \frac{\partial \gamma_{ff}}{\partial T} \right) \Delta A.$$

„Při smáčení začínají působit meziatomární síly. Na místech mezi-fázového rozhraní tak postupně vznikají vazby, které se rozšiřují po celé ploše styku. Dochází přitom ke snižování volné povrchové energie systému. Během procesu smáčení se dva volné povrchy - roztavená pájka a tuhý kov - mění v jedno mezifázové rozhraní. Na tomto mezifázovém rozhraní přecházejí atomy roztaveného kovu do mřížky tuhého kovu. Dochází ke spojování valenčních elektronů jednotlivých kovů a k vytvoření kovové vazby.“ [10]

Smáčení se dá rozdělit do dvou skupin, jak je uvedeno v práci [10]:

„- fyzikální smáčení: ve své podstatě je to adhezní spojení (např. u Pb-Cu). Při smáčení povrchu roztavenou pájkou neproběhne chemická reakce na rozhraní a nedojde ke změně chemického složení. Adhezní spoj má menší pevnost ve smyku a v ohybu, ale dobrou elektrickou vodivost.

- chemické (reaktivní) smáčení: procesy rozpouštění nebo difúze dojde k vytvoření společné fáze na rozhraní liquidu a solidu, tj. musí zde dojít k vytvoření tuhého roztoku nebo intermetalické fáze, přičemž vzájemná rozpustnost kovů může být jen nepatrná. Vzniká přechodová oblast určité tloušťky. Pájka se roztéká po povrchu, dokud nedosáhne optimálního energetického stavu. Úroveň smáčení povrchu pájkou je podmíněna velikostí aktivních rozhraní i energetickými předpoklady.“

### 1.4.2 Kohezní práce

K popisu fázového rozhraní se mimo **mezifázového rozhraní**  $\gamma_{ff}$  a energie užívají další veličiny:

**Kohezní práce**  $W_k$  je potřebná k izotermnímu roztržení sloupce kapaliny nebo tuhé látky o jednotkové ploše průřezu. Ta je vázána k povrchovému napětí vztahem[11][12]:

$$W_k = 2\gamma_{LS}$$

### 1.4.3 Adhezní práce

**Adhezní práce** je potřebná k izotermnímu odtržení kapalně a pevně fáze podél fázového rozhraní plochy a vytvoření nových rozhraní kapalina-pára , pevná látka-pára vztažená na tuto jednotkovou plochu. Je dána vztahem[11][12]:

$$W_a = \gamma_{LG} + \gamma_{SG} - \gamma_{SL}$$

Kde konkrétně mezi kapalinou a tuhým látkou je vztah:

$$W_a = \gamma_{SL}(1 + \cos\theta)$$

#### 1.4.4 Rozestírací koeficient

**Rozestírací koeficient** je definován, jako rozdíl mezi kohezní  $W_k$  a adhézní  $W_a$  prací:

$$S_R = W_a - W_k = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} - \gamma_{LG}$$

Je-li rozestírací koeficient kapaliny na pevné látce kladný ( $W_a < W_k$ ), rozestře se kapalina na pevném povrchu. Pokud je ale rozestírací koeficient záporný, utvoří kapalina na povrchu kapky. U nemísitelných systémů voda-organická látka bude docházet k rozestírání organických kapalin, které mají malou kohezní energii, na vodném povrchu. Voda, která má vysokou kohezní energii, se po povrchu organické látky nerozestírá. [12]

#### 1.4.5 Úhel smáčení

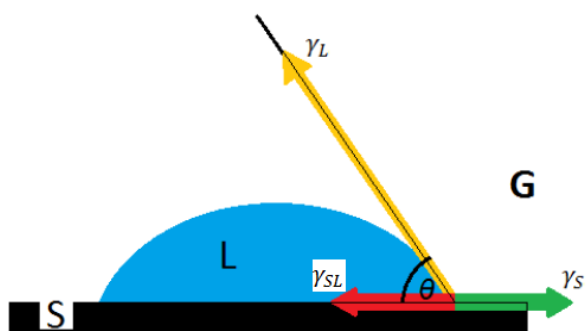
Je definovaný jako úhel, který svírá tečna k povrchu kapky kapaliny, umístěná v bodě styku kapky s rozhraním pevné látky. Úhel smáčení je tedy závislý na rozestíracím koeficientu.

Youngovou rovnicí je dán vztah mezi úhlem smáčení  $\theta$  a jednotlivými mezifázovými energiemi (plyn, pevná látka, tekutina). Pokud se kapka nachází v rovnováze, je součet vektorů mezifázových napětí nulový, tudíž lze odvodit vztah:

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos\theta$$

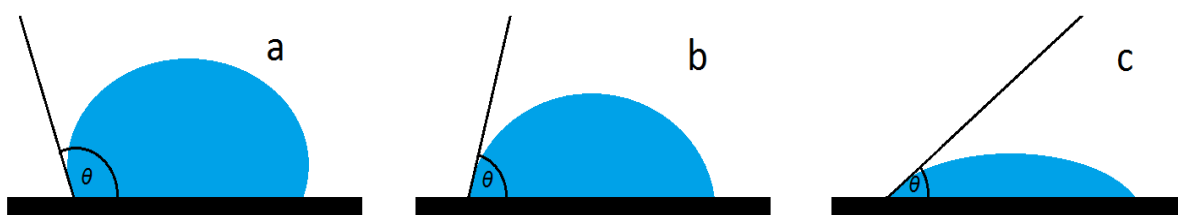
Kde  $\theta$  je úhel smáčení, viz obrázek č.1





Obrázek č. 1 Úhel smáčení

Podle tohoto úhlu můžeme určit, zda daná kapalina smáčí málo či dokonale. Na obrázku č. jsou uvedeny tři rozdílné smáčecí úhly, které v případě (a) interpretují nesmáčivost, (b) velmi špatnou smáčivost a bod (c), jako dobrou smáčivost.



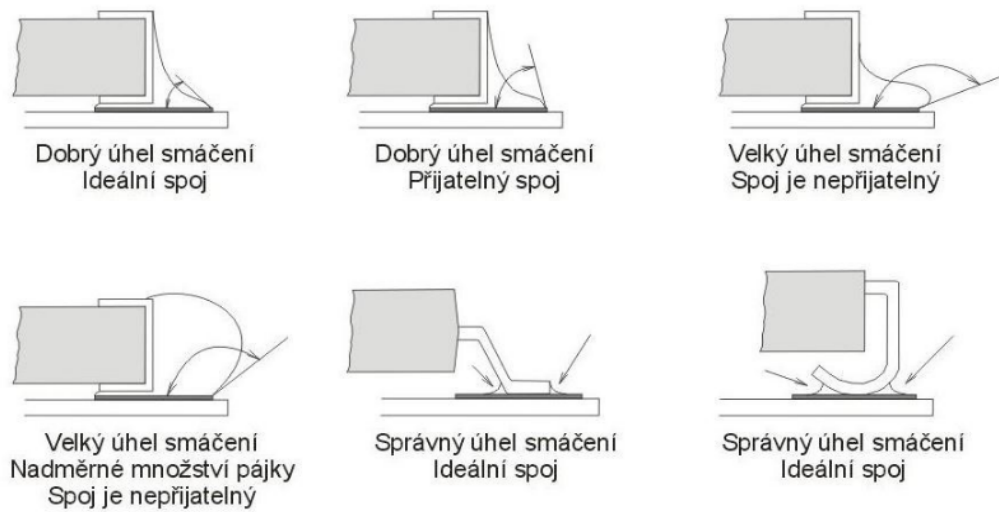
Obrázek č. 2 Smáčivost v závislosti na úhlu

Posouzení úhlu smáčivosti používané při pájení je shrnuto v následující tabulce:

Velikost smáčecího úhlu $\theta$	Posouzení pájitelnosti
$0^\circ < \theta \leq 20^\circ$	Dokonalé smáčení
$20^\circ < \theta \leq 40^\circ$	Dobré smáčení
$40^\circ < \theta \leq 55^\circ$	Dostačující smáčení
$55^\circ < \theta \leq 90^\circ$	Špatné smáčení
$90^\circ < \theta$	Nesmáčivost

Tabulka č. 2 Posouzení úhlu smáčivosti z pohledu pájení

Příklad u reálné montované součástky je na obrázku č.3



Obrázek č. 3 Smáčení na kontaktech součástky [24]

Vlivy ovlivňující úhel smáčení:

- absorpce
- hystereze úhlu smáčení
- drsnost a nehomogenita povrchu
- chemické reakce kapaliny a povrchu

#### 1.4.6 Absorpce

Absorpce plyných látek, přítomných u procesu pájení, ovlivňuje povrchovou energii na pevné látce  $\gamma_{S^o}$ , ze které je vyroben kontakt pájené součástky. Hodnota povrchové energie, která tvoří rovnováhu mezi povrchovou energií kontaktu a parou pájky je  $\gamma_{SG}$ . Rozdíl těchto hodnot je povrchový tlak  $\pi$ . Youngova rovnice absorpce je:

$$\gamma_L \times \cos\theta = \gamma_{S^o} - \pi - \gamma_{SL}$$

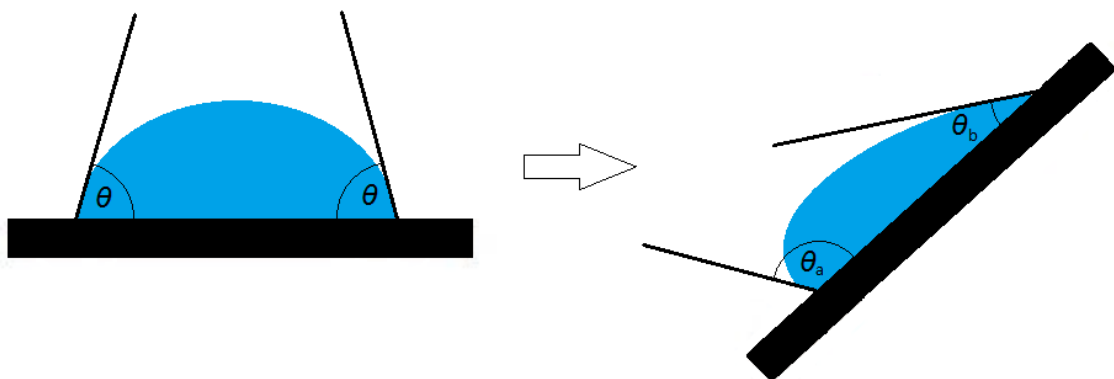
Smáčecí úhel  $\theta$  se mění v závislosti na hodnotách výsledného povrchového tlaku  $\pi$ . U tuhých látek o vysoké povrchové energii, jako jsou právě kovy a kovové oxidy, se významně absorpcí snižuje.

Chemické reakce ke kterým v průběhu smáčení dochází:

Tyto reakce ovlivňují  $\gamma_S$  povrchu kontaktu a mezifázovou energii  $\gamma_{SL}$ . Pokud je povrch zoxidovaný nebo znečištěný, může dojít k dějům mezi tímto povrchem a nanesenou roztavenou pájkou (např. rozpouštění pevné látky kapalinou). V těchto dějích mají obě energie proměnný charakter s časem a v důsledku se mění i smáčecí úhel  $\theta$ .

#### 1.4.7 Hystereze úhlu smáčení

Rozdílnost úhlu smáčení pájky, která nastává při jejím postupu a ústupu na tuhém povrchu kontaktu, se nazývá hystereze úhlu. V obrázku č. 4 je znázorněna rozdílnost smáčecího úhlu  $\theta_a$ , který reprezentuje úhel postupující a úhel  $\theta_b$  na rozhraní ustupující. Rozptyl těchto hodnot může být až  $50^\circ$ . Tuto vlastnost ovlivňuje i čistota povrchu, a především chemické reakce na povrchu kontaktu, kde se při těchto dějích mění  $\gamma_S$  pevné látky a  $\gamma_{SL}$  na rozhraní pevné a kapalně látky, v tomto případě pájených kontaktů a roztavené pájky.



Obrázek č. 4 Hystereze úhlu smáčivosti

#### 1.4.8 Drsnost povrchu

„Drsnost a nehomogenita povrchu, která se může vyskytovat i u pečlivě připravených reálných povrchů (každá rýha na povrchu může působit jako kapilára, v níž kapalina stoupá, je-li  $\theta$  ostrý, nebo klesá, je-li  $\theta$  tupý; drsný povrch je tedy obvykle lépe smáčen dobře smáčejiícími kapalinami než povrch hladký, zatímco u špatně smáčejiících kapalin je tomu naopak).“ [16]

#### 1.4.9 Povrchové napětí

Povrchové napětí kapaliny, tedy roztavené pájky, se na jejím povrchu chová jako elastická folie, která se snaží dosáhnout stavu s co nejmenší energií. Kapalinase snaží dosáhnout tvaru koule protože z geometrického hlediska má koule při nejmenším povrchu největší objem.

#### 1.4.10 Vztlínavost

Vztlínavost pájky je schopnost působením kapilárních sil vyplnit při pracovní teplotě úzkou mezeru mezi pájenými základními materiály. Pokud chceme stanovit vztlínavost u svislého spoje musíme stanovit výšku, u vodorovného vzdálenost, kam pájka vyvztlíná [19].

Vztah pro svislý pájený spoj a vyvztlínací výšku:[19]

$$h = \frac{2 \times \sigma_H \times \cos \alpha}{\rho \times g \times s}$$

Kde:

- $\sigma_H$  je adhezní napětí ( $\text{Nm}^{-1}$ )

- $\alpha$  je stykový úhel ( $^{\circ}$ )
- $\rho$  je hustota pájky ( $\text{kg m}^{-3}$ )
- $g$  je tíhové zrychlení ( $\text{m s}^{-2}$ )
- $h$  je kapilární vzlínavost (m)

Vztah pro vodorovný pájený spoj a délku zatečení:[19]

$$h = \frac{\sigma_H \times s \times \tau}{6 \times \eta}$$

Kde:

- $\sigma_H$  je adhezní napětí ( $\text{Nm}^{-1}$ )
- $s$  je velikost mezery mezi základními pájenými materiály (m)
- $\tau$  je doba potřebná pro zatečení pájky do délky  $h$  (s)
- $\eta$  je dynamická viskozita pájky (Pa s)
- $h$  je kapilární vzlínavost (m)

#### 1.4.11 Eutektická teplota pájky

Eutektikum je směs dvou tuhých látek, kde jejich krystalizace probíhala společně při tuhnutí této směsi. Každá z látek, která je přítomna ve slitině, má svoji teplotu tání. Je-li slitina pájky smísena v poměru takovém, aby jejich společná teplota byla co nejnižší, nazýváme tuto slitinu, jako čisté eutektikum. V závislosti na bodu čistého eutektika rozeznáváme směsi s odlišnými míšícími poměry:

- Směs podeutentická (fáze je tvořena směsí eutektika a krystalů první složky)
- Směs nadeutentická (fáze je tvořena směsí eutektika a krystalů druhé složky)

Aby látky vytvořily eutektikum, splňují podmínky:

- jejich teploty tání jsou dostatečně sobě blízké
- v pevném skupenství jsou látky nerozpustné nebo částečně nerozpustné
- v kapalném skupenství jsou rozpustné

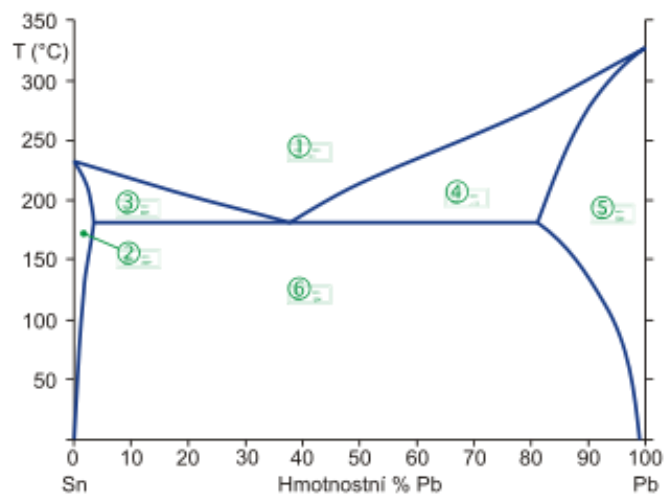
- jejich eutektický bod teploty leží níže, než body teploty tání obou samotných látek

Vlastnost této směsi je závislá na fyzikálních procesech tuhnutí daných látek. Při tuhnutí se nejprve spojí jen několik částic. Tyto částice vytváří krystalizační jádra, která se s časem tuhnutí zvětšují. Při tomto procesu látka odevzdává své latentní teplo. Na konci tohoto procesu se látka nachází v pevném stavu. Tento časový průběh je průběhem obráceným od křivky tání. Popsaný proces platí pro chemicky čistou látku, která krystalizuje při zcela konkrétní hodnotě. U směsi k tomu nedochází ke specifikované teplotě, ale v určitém rozmezí teplot. Jedná-li se o slitinu podeutektickou nebo nadeutektickou, začíná tuhnutí dříve složka, která má vyšší než eutektickou koncentraci. [18]

„Když v roztoku díky krystalizaci první složky koncentrace obou složek dosáhnou eutektické hodnoty, zastaví se pokles teploty neboť i druhá složka začne odevzdávat své latentní teplo a společně s první krystalizovat.“ [17]

Jak teplota klesá, zvyšuje se podíl tuhé fáze do ztuhnutí slitiny.

Pokud tedy máme dva rozdílné kovy, například cín a olovo a změříme křivku tuhnutí každého kovu zvlášť a poté s jejich různými koncentracemi, včetně koncentrace eutektické, složíme z bodů zlomů a teplot tuhnutí fázový diagram obou těchto kovů. Tento diagram můžeme vidět na obrázku č.5.



Obrázek č. 5 Fázový diagram cín-olovo [17]

Popis fázového diagramu eutektické směsi:

Osa X znázorňuje hmotnostní zastoupení kovu v % ve slitině. Na ose Y je vynesena teplota slitiny. Takto složený diagram vyjadřuje fázi skupenství látek v závislosti na teplotě. U slitin, které jsou schopny vytvořit eutektikum, má křivka oddělující pevné a kapalně skupenství typický vzhled V. V nejnižším místě této křivky se nachází bod s nejmenší teplotou tání pro danou koncentraci kovů ve slitině. Tento bod se nazývá eutektický bod. Jeho teplota leží níže než teploty tání obou čistých složek. [17][18]

Oblasti, které jsou znázorněny na obrázku vyjadřují tyto stavy slitiny:[17]

1. Oblast, kde je slitina v kapalném skupenství (křivka ve tvaru širokého V ohraničující tuto oblast zespoda se nazývá křivka likvidu).
2. Atomy olova jsou plně rozpuštěny v krystalové mřížce cínu.
3. Kapalná slitina, ve které se tvoří pevné krystalky tuhého roztoku olova v cínu.
4. Kapalná slitina, ve které se tvoří pevné krystalky tuhého roztoku cínu v olovu.
5. Atomy cínu jsou plně rozpuštěny v krystalové mřížce olova.
6. Obě látky jsou v pevném stavu ve formě vzájemně promíchaných krystalků (křivka typicky ve tvaru obráceného U nad touto oblastí se nazývá křivka solidu).

#### 1.4.12 Intermetalické vrstvy

Jedná se o průvodní jev všech pájecích procesů. Příklad pro pájku Sn-Pb a nejvíce rozšířeným materiálem pro spojování – měď, je vrstva  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . Po smáčení povrchu se na rozhraní pájky s mědí rychle vytváří tato intermetalická vrstva, která je nezbytná pro adhezní vlastnosti pájeného spoje. Tato vrstva měří několik desetin micrometru.

Rychlost růstu této vrstvy určuje také skladovatelnost součástek a desek plošných spojů. Obecně tyto vrstvy mohou nepříznivě ovlivňovat pájitelnost. Kromě omezené, nebo vůbec žádné smáčivosti mají i další nepříznivé vlastnosti. Jedná se především o rozdílnou hodnotu součinitele délkové teplotní roztažnosti při porovnání s mědí. Mají rozdílnou křehkost a tvrdost než zbytek pájeného spoje a tím dochází ke snížení

mechanické odolnosti. Tato vlastnost se nejvíce projevuje u součástí, které jsou střídavě namáhány. [3][22]

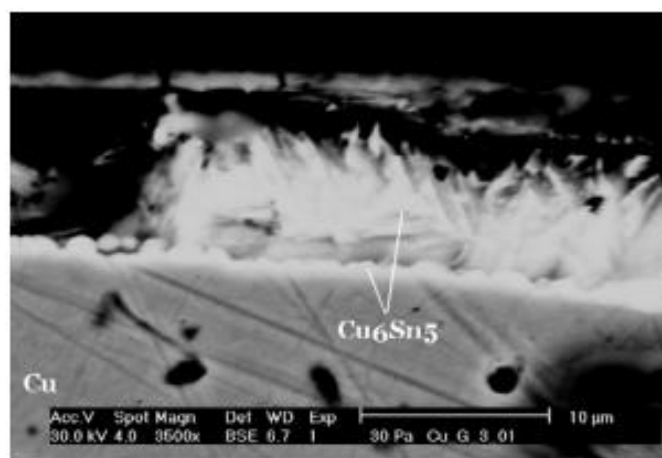
Intermetalické sloučeniny nevznikají pouze na rozhraní cínu a mědi, ale vznikají i u jiných materiálů, např. sloučeniny zlata, stříbra, niklu nebo železa. Nejvíce nebezpečné jsou sloučeniny tvořené cínem a zlatem. Jsou velmi křehké, zejména AuSn<sub>2</sub>, a tvoří se velmi rychle.[3]

Typ a tloušťku intermetalické vrstvy vzniklé mezi měděným základním materiálem a pájkou, popisuje v práci pana Jiřího Podzemského následující tabulka.[22]

pájka	podmínky	vrstva 1		vrstva 2	
		typ	tloušťka (μm)	typ	tloušťka (μm)
Sn-Pb	po přetavení	Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>	0,5	-	-
	stárnuto	Cu <sub>3</sub> Sn	2,7	Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>	2,7
Sn-Ag	po přetavení	Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>	0,5	-	-
	stárnuto	Cu <sub>3</sub> Sn	2,2	Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>	2,5
Sn-Cu	po přetavení	Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>	0,8	-	-
	stárnuto	Cu <sub>3</sub> Sn	3,5	Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>	2,2
SAC	po přetavení	Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>	0,8	-	-
	stárnuto	Cu <sub>3</sub> Sn	2,2	Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>	2,2

Tabulka č. 3 Tloušťka intermetalické vrstvy v závislosti na použité pájce a počátečních podmínkách [22]

Obrázek č.6 zachycuje vytvořenou intermetalickou vrstvu ve struktuře pájeného spoje, která vznikla pájením pájkou Sn-1Cu přetavením.



Obrázek č. 6 Výskyt intermetalické fáze Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> ve struktuře pájeného spoje. [22]



## 1.5 Určování vlastností pájecích slitin

Vlastnostmi se chápou stavy, které se mění s měnícími se podmínkami. Proto tyto vlastnosti pozorujeme pro určení ideálního produktu či metody, která bude nejvíce vyhovovat její reálné aplikaci.

### 1.5.1 Pájitelnost

Pro vytvoření pájeného spoje musíme zajistit správný proces pájení ve smyslu vlastnosti její kvality. Proto se zavádí termín pájitelnost, který popisuje schopnost povrchu být smáčitelný pájkou v procesu pájení.

V procesu pájení mohou nastat tři jevy:

#### A) Smáčení:

V prvním případě se pájka roztaví a rozlije po ploše pájení. Do krystalické mřížky pájeného kovu vnikají atomy a vzniká kovová vazba.

#### B) Nesmáčení:

V druhém případě dochází k opaku a tudíž nevzniká tato kovová vazba. Příčinou může být i znečištění při procesu pájení či chybný postup při volbě materiálu a tavidel.

#### C) Odsmásčení:

Poslední jev se prokazuje ústupem pájky pájených částí spoje a tím vzniká nerovnoměrné rozmístění pájky ve spoji.

Máme tu pájitelnost, která je komplexem vlastností, udávajících vhodnost pro průmyslové pájení. V souvislosti se schopností materiálu být smáčen roztavenou pájkou musí být splněna tři hlavní hlediska [10]:

- **smáčivost:** povrch musí umožnit smáčení materiálu roztavenou pájkou během doby vhodné pro vytvoření pájeného spoje, a to bez odsmásčení

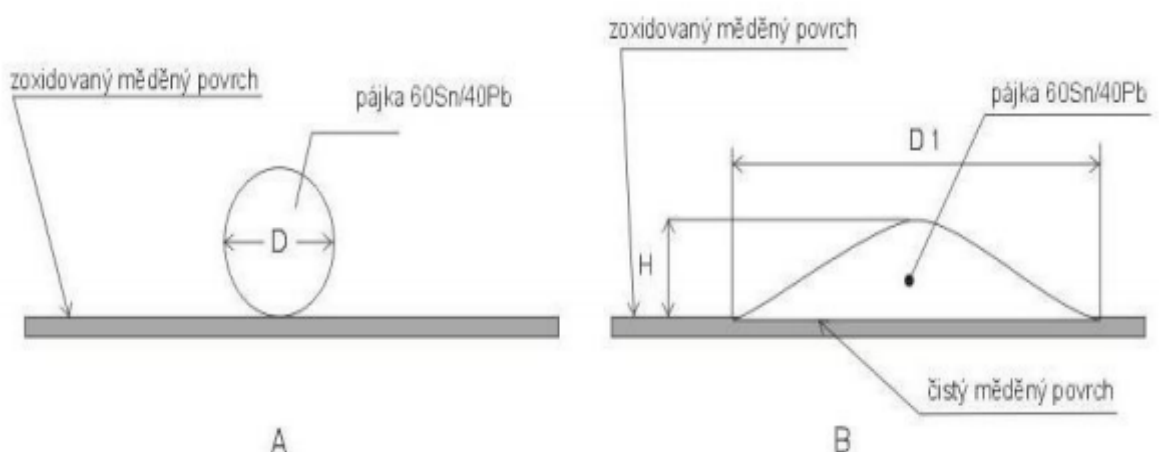
- **teplotní požadavek:** pájené součástky musí umožnit ohřev plochy určené k pájení na požadovanou teplotu během požadované doby

- **odolnost vůči teple při pájení:** teplo a s tím související teplotní namáhání pájených dílů nesmí ovlivnit funkci součástek před definovaným limitem

Pozorujeme dvě základní vlastnosti, a to počáteční smáčivost kontaktů a rozsah odmaččení během procesu pájení.

### 1.5.2 Test roztékavosti

Tento test se využívá k určení vlastností sloučení tavidla s pájkou. Pozoruje se změna vlastnosti oproti samotné pájce. Na měděný podklad ve tvaru destičky, která je ošetřena přídavným tavidlem se nanese definované množství pájky o průměru  $D$ . Tato část je znázorněna na obrázku č.7 A). Poté se měděná destička s pájkou a tavidlem vystaví zdroji tepla a pájka se přetaví. Viz obrázek č.7 B). Pájka se díky vlivu tavidla, které reaguje s oxidy na destičce rozteče. Plocha, kterou v době přetavení pokryje pájka, je funkcí aktivity dané pájky s testovaným tavidlem. [1]



Obrázek č. 7 Test roztékavosti [1]

Po geometrickém změření roztavené pájky, tedy výšky H a známého průměru pájky D, kdy je pájka ve tvaru koule, se vypočítá poměrná smáčivost dle vztahu:

$$\text{Poměrná smáčivost}(\%) = \frac{D - H}{D} \times 100$$

Pokud by tavidlo nereagovalo s oxidy na povrchu měděné destičky, kulička pájky si zachová po přetavení původní tvar. To znamená, že výška bude rovna průměru kuličky. Čím více tavidlo reaguje, tím menší je výška po přetavení pájky. [1]

### 1.5.3 Ponořovací test

Nejrychlejší způsob, jak posoudit pájitelnost, je ponořovací teste. Do testované pájky, která je roztavena na požadovanou pájecí teplotu, se postupně smáčí několik vzorků s pájenými vývody. Kontakty mohou být opatřeny požadovaným tavidlem. Proto se kontakty po vytažení z pájecí lázně očistí a následně se vizuálně určí úroveň smáčení. Tento způsob testování je velice subjektivní a závisí na posouzení člověka, který právě danou součástku vyhodnocuje dle normy ČSN EN 61760-1, která definuje stupeň smáčení. [1]

Výhoda tohoto testu je dostupnost provedení a levnost oproti jiným metodám. Nevýhoda je značná nepřesnost oproti výrazně dražším metodám.

### 1.5.4 Kuličkový test

Kuličkový test poskytuje informace o pájitelnosti u vývodů součástek. Součástky se širšími vývody se nejlépe měří, naopak pro součástky s malými kontakty je tento test nevhodný. [1]

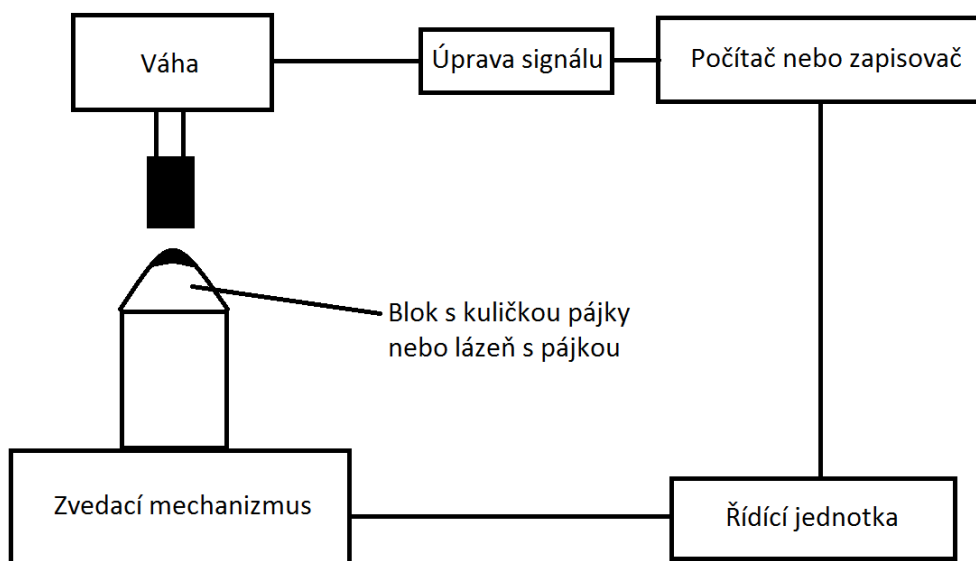


Obrázek č. 8 Kuličkový test[1]

Na rozežhátou desku s pájkou, kde je teplota něco málo převyšující její teplotu tavení se umístí testovaný vývod, jak je vidět na obrázku č.8 A). Tento vývod se ponoří do roztavené pájky tak, že kuličku rozdělí na dvě poloviny viz obrázek č.8 B). Toto rozdělení pájky zůstane do doby, dokud se vlivem smáčecích sil nespojí zpět do původního stavu s vývodem součástky uvnitř, jak je znázorněno na obrázku č.8 C) Podstatou měření je doba, za kterou se kulička pájky spojí.

### 1.5.5 Metoda smáčecích vah

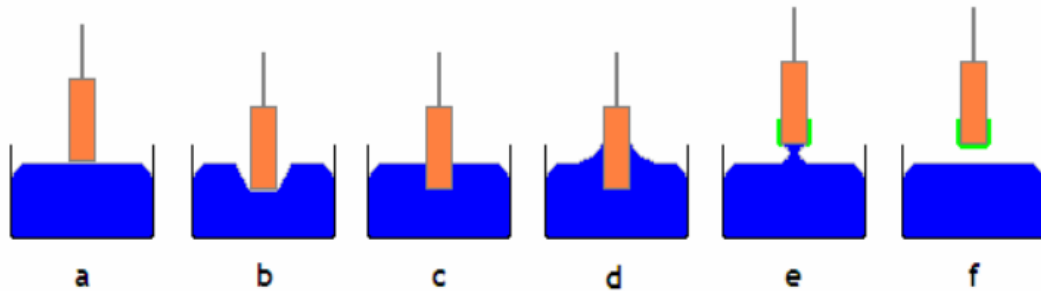
Metoda smáčecích vah je uváděna jako nejpřesnější k analýze a určení pájitelnosti kontaktů testovaných součástek. Smáčecí váhy se spolu s metodou ponořování řadí k testům vhodným pro testování pájitelnosti samotných substrátů. Měřící zařízení, které se nazývá meniskograf je znázorněno na obrázku č.9.



Obrázek č. 9 Složení měřícího zařízení na metodu smáčecích vah

Toto zařízení se skládá s velmi citlivých vah, zvedacího mechanismu opatřeného krokovým motorem, řídicí jednotkou a zařízením na úpravu signálu, který se dále zpracovává na zapisovači nebo přímo na počítači.

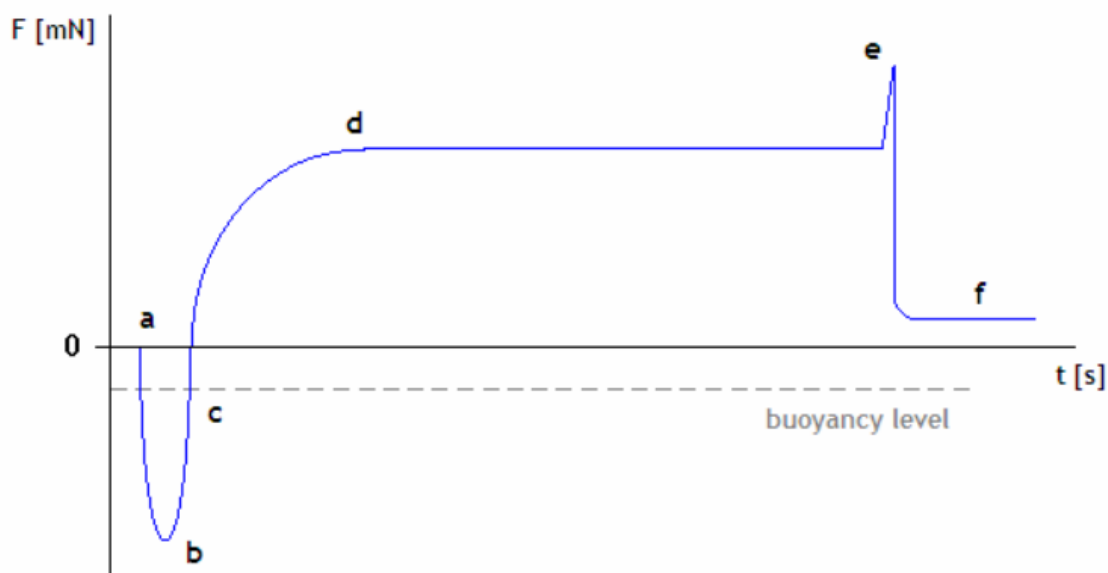
Vzorek je zavěšen na citlivých vahách a je spuštěn mechanismus pro zvedání pájky. Díky krokovému motoru je známa přesná pozice lázně a lze tak nastavit parametry potřebné pro změření dané zkušební lázně a vzorku. Vzorek a roztavená lázeň pájecí slitiny se díky mechanismu setkají a vzorek je vložen do lázně s potřebnou nastavenou hloubkou. Tato hloubka je dosažena díky krokovému motoru a dopočtena z informace, kdy se testovaný vzorek setkal s roztavenou hladinou. U vodivého vzorku je uzavřen v době setkání elektrický okruh a tím zaznamenán počátek setkání hladiny a vzorku. U nevodivého vzorku se přidává pomocný vodivý drát, který bude suplovat vodivost vzorku k uzavření obvodu. Je ale potřeba při každém přichycení vzorku zkalibrovat na stejnou rovinu pomocný vodivý drát s měřeným nevodivým vzorkem. Při dosažení požadované hloubky je vzorek máčen po nastavený čas. Po uplynutí nastaveného času je vzorek opět vytáhnout. Celý proces máčení je vyobrazen na obrázku č.10.



Obrázek č. 10 Fáze smáčení metodou smáčecích vah [10]

Citlivé váhy zaznamenají veškeré změny váhy vzorku, které jsou v průběhu máčení proměnné. Po změření jsou data odeslána do počítače, kde jsou naměřená data zobrazena v grafu, jako funkce síly působící na máčený vzorek. Vznikla nám smáčecí křivka, která je znázorněna na obrázku č.11.

Ke smáčecí křivce je nutné podotknout, že je možné ji zaznamenávat ve dvou podobách, které se liší pouze polaritou údajů o síle. Tuto možnou dvojí interpretaci dovoluje norma ČSN EN 60068-2-69. V grafu uvedeném na obrázku č.11.



Obrázek č. 11 Smáčecí křivka [10]

Body na obrázku č.11 jsou odpovídajícími body na obrázku se smáčecí křivkou.

V bodě (a) se považuje čas  $t_0$ , ve kterém povrch pájky přijde do styku s měřeným vzorkem. Toto je indikováno malým poklesem záznamu pod nulovou čárou.

V bodě (b) je povrchovým napětím pájky kterým působí máčený vzorek na pájku zdeformovaná hladina směrem dolů. Tento meniskus začne stoupat k vývodu součástky. Toto je v grafu charakterizováno významným vzrůstem smáčecí síly.

V bodě (c) je kontaktní úhel pravouhlý ( $90^\circ$ ). V tuto chvíli je měřená síla rovna síle, způsobené vztlakem součástky. Tento bod leží na vztlakové čáře, která je v obrázku vyznačena čerchovaně.

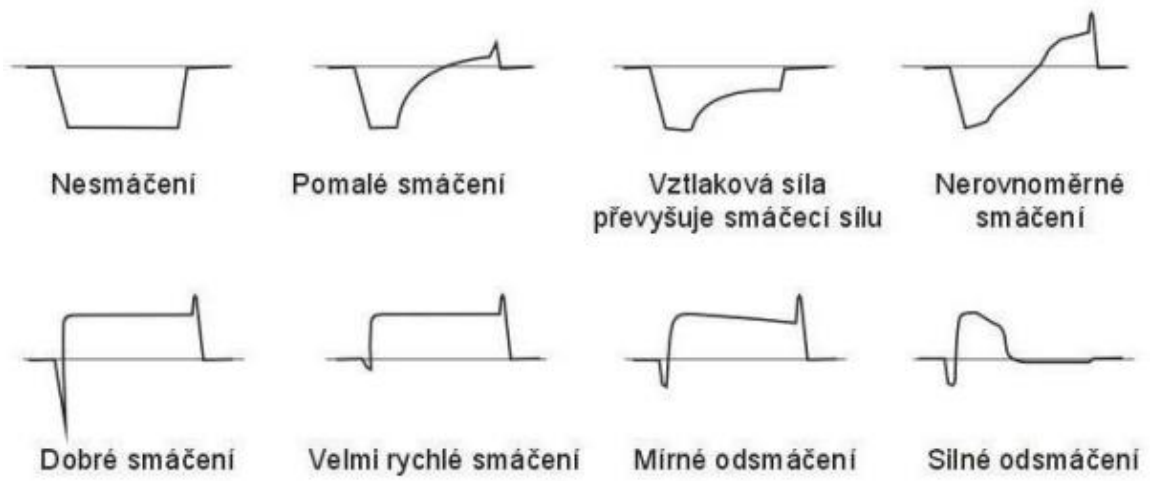
V bodě (d) se dosáhlo maximální hodnoty smáčecí síly. Tento bod může nastat v libovolném čase v určeném časovém intervalu měření. Maximální hodnota nemusí být hodnota konečná a může nastat pokles smáčecí síly (odmáčení). Podílem těchto sil se udává tzv. stabilita smáčení.

V bodě (e) dochází k ukončení měření, tedy po uplynutí nastavené hodnoty obvykle o délce 5s až 10s. Tyto časy upravuje norma ČSN EN 60068-2-69.

V bodě (f) je vzorek po vyjmutí z pájecí lázně. Síla, která je po ukončení zaznamenána v grafu je rovna síle tíže pájky přilnuté na vzorku po smáčecím procesu.

Metodou smáčecích vah se zkoumá smáčecí křivka od bodu počátku dotyku A až do bodu ukončení měření bodu (e). Body (e) až (f) (tedy průběh), který vznikne po ukončení měření, se dle normy ČSN EN 60068-2-69 neinterpretuje.

Z průběhu smáčecí křivky dokážeme definovat proces smáčení. Na následujícím obrázku č.12 jsou modelové příklady smáčecích charakteristik, které mohou při testu touto metodou nastat.



Obrázek č. 12 Možné průběhy smáčecí křivka [24]



## 1.6 Normy pro definici měření Metodou smáčecích vah

Normy, které definují test metodu smáčecích vah jsou ČSN EN 60068-2-69 a ČSN 34 5791-2-54.

Tyto normy využívají referenční dokumenty, zejména tomu tak je u ČSN EN 60068-2-69:

- **IEC 60068-1:198 Environmental testing – Part 1: General and guidance**

(Zkoušení vlivů prostředí – Část 1: Všeobecně a návod)

- **IEC 60068-2-20:1979 Environmental testing – Part 2: bTests – Test T: Soldering**

(Zkoušení vlivů prostředí – Část 2: Zkoušky – Zkouška T: Pájení)

- **IEC 60068-2-54:2006 Environmental testing – Part 2-54: Tests – Test Ta: Solderability testing by the wetting balance method**

(Zkoušení vlivů prostředí – Část 2-54: Zkoušky – Zkouška Ta: Zkoušení pájitelnosti elektronických součástek metodou smáčecích vah)

- **IEC 61190-1-3:2002 Attachment materials for electronic assemblies – Part 1-3: Requirements for electronic grade solder alloys and fluxed/non-fluxed solid solder for electronic soldering applications**

(Připojovací materiály pro elektronickou montáž – Část 1-3: Požadavky na pájecí slitiny pro elektroniku a na tavidlové a bezavidlové tuhé pájky pro pájení v elektronice)

- **ISO 638 (Všechny části) Heat-treatable steels, alloy steels and freecutting steels**

(Oceli k zušlechťování, legované oceli a automatové oceli)

- **ISO 6362 (Všechny části) Wrought aluminium and aluminium alloy extruded rods/bars, tubes and profiles**

(Protlačované tyče, trubky a profily z tvrdého hliníku a slitin hliníku)

Norma ČSN EN 60068-2-69 definuje stav vzorku a jeho aklimatizaci:

„Pokud není stanoveno jinak, musí se vzorek zkoušet ve stavu, v jakém byl dodán, a je třeba věnovat pozornost zajištění, aby během přípravy a manipulace se vzorkem nedošlo ke znečištění žádné části zkoušeného povrchu, zejména aby tato část vzorku nepřišla do styku s prsty.

Jestliže to je ve specifikaci součástky požadováno, smí se vzorek očistit ponořením do neutrálního organického rozpouštědla při teplotě místnosti. Vzorek se má před zkoušením nechat oschnout na vzduchu. Jiné čištění není přípustné“

Pokud je ovšem požadováno testování daných pájek na součástkách starších, smí se dle normy podrobit vzorek zrychlenému stárnutí za jedné z těchto podmínek:

- Stárnutí dle IEC 60068-2-20 – bod **1a**
- Stárnutí dle IEC 60068-2-20 – bod **1b**
- Stárnutí dle IEC 60068-2-20 – bod **1 po dobu 8h**

Déle jsou normou definovány pájky, které jsou vhodné pro tento test. U olovnatých pájek, jsou to Sn60Pb40A , Sn63Pb37A nebo Sn62Pb36Ag02B. U pájek bezolvnatých, se doporučují slitiny Sn96,5Ag3Cu,5 a Sn99,3Cu,7.

### 1.6.1 Rozdělení tavidel

Tavidla jsou v normě rozdělena do dvou skupin:

- **Tavidlo na bázi přírodní pryskyřice**
  - A)** neaktivované tavidlo: 25 hmot % kalafuny a 75 hmot % propan-2-olu nebo ethylalkoholu
  - B)** aktivované tavidlo: aktivované tavidlo je výše uvedené tavidlo s přídavkem diethylamoniumchloridu s obsahem 0,2 nebo 0,5 % volného chloru k hmotnosti kalafuny
- **Tavidlo na bázi karboxylové kyseliny**

- A)** vodný roztok: 90,1 % deionizované vody, 5,0 % glykolesteru, 1,6 % kyseliny adipové, 1,6 kyseliny jantarové, 1,6 % kyseliny glutarové a 0,1 % tenzidu ethoxylovaného alkoholu
- B)** alkoholický roztok: 94% propan-2-olu, 1,5 % kyseliny adipové, 1,5 % kyseliny jantarové, 1,5 % kyseliny glutarové a 1,5 % přírodní pryskyřice.

Zkušební teplota pájek se liší od druhu pájky a jejího složení. Pro olovnaté pájky musí být teplota před provedenou zkouškou  $235^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  a u bezolovnatých musí být teplota  $245^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  pro pájku o složení Sn96,5Ag3Cu,5 a  $250^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  pro pájku Sn99,3Cu,7.

Jestliže chceme nějaký vzorek testovat musíme znát všechny informace, za jakých podmínek má k testu dojít. Tyto informace mají být uvedeny v příslušné specifikaci.

Norma ČSN EN 60068-2-69 je řadí takto:

	článek
A) Zda se má vzorek před zkouškou čistit	6.1
B) Zda se má provádět zrychlené stárnutí a pokud ano, jakou metodou	6.2
C) Typ tavidla, které má být použito	7.2
D) Složení pájky	7.1
E) Zkušební teplota, pokud je jiná než stanovená	8.1
F) Zkoušená část vzorku, pokud se zkouší jiná součástka, než je uvedená v tabulce 1 nebo 3	8.2,8.3
G) Poloha a úhel při ponořování, pokud se zkouší jiná součástka, než je uvedená v tabulce 1 nebo 3	8.2,8.3
H) Hloubka ponoru, pokud se zkouší jiná součástka, než je uvedená v tabulce 1 nebo 3	8.2,8.3
I) Doba trvání zkoušky, pokud je jiná než 5s	8.2,8.3
J) Přijatelná hodnota pro začátek průběh smáčení	9.2
K) Oblasti, ve kterých se má vyšetřovat smáčení a odsmačení	8.2,8.3

Tabulka č. 4 Stanovené podmínky testu dle normy ČSN EN 60068-2-69

## 1.6.2 Požadavky na pájecí lázeň

„Lázeň musí mít dostatečnou tepelnou kapacitu, aby umožnila udržovat teplotu s požadovanou přesností. Žádná část vzorku se nesmí nacházet méně než 15 mm od stěny, aby smáčecí síly nebyly ovlivněny zakřivením povrchu pájky u okrajů lázně. Hloubka lázně nesmí být menší než 15 mm.“

## 1.6.3 Hladina elektrického a mechanického šumu

„Hladina elektrického a mechanického šumu v systému vah a zesilovače nesmí překročit 10 % úrovně signálu na nejcitlivějším rozsahu.“

## 1.6.4 Hloubka ponoru

„Na specifikované roztavené pájce musí hloubka splňovat tyto podmínky:

- A) při procesu smáčení pájka přejde přes oblast zájmu. U tvarovaných vývodů bude nezbytné zvolit správný úhel ponoření, aby se zajistilo, že k tomu dojde
- B) hloubka ponoru má být dostatečně malá, aby podstatná část vývodu nad povrchem pájky zůstala volná
- C) Hloubka ponoru má být dostatečná k tomu, aby poskytovala přiměřený přenos tepla do vývodu
- D) hloubka ponoru musí být reprodukovatelná s přesností 0,01 mm, aby se dosáhlo reprodukovatelných výsledků, nebo v nejhorším případě musí být reprodukovatelná s přesností 10 % “

### 1.6.5 Rychlost ponořování

Z důvodu, že se používá v testech pájitelnosti součástek pro povrchovou montáž pouze malých hloubek ponoru, je předepsaná pouze pomalá rychlost ponoru, a to hodnot mezi 1 mm/s až 5 mm/s.

### 1.6.6 Doba ponoření

Pro malé vzorky se předepisuje doba ponoru 5 s, ale pro vzorky větších součástek z důvodu větších tepelných kapacit je předepsána doba nezbytná pro korektnost provedeného měření 10 s.

## 2. PRAKTICKÁ ČÁST

V druhé části této práce se věnuji měření metodou smáčecích vah u mnou vybraných typů pájecích slitin. Tyto slitiny mám danou metodou posoudit pro použitelnost v elektrotechnickém průmyslu.

### 2.1 Úvod

Z důvodu, že v zadání není specificky určeno, jaké parametry mají dané slitiny splňovat, budu požadavky na pájitelnost součástek odvozovat z těchto parametrů, které určuje norma pro metodu smáčecích vah. Tyto parametry jsou:

- pro počátek smáčení  
(to se rozumí, jako maximální hodnota pro časový interval ( $t_0$  až B))
- pro průběh smáčení  
(to se rozumí, jako maximální hodnota pro časový interval ( $t_0$  až C))
- pro stabilitu smáčení  
(toto je vyjádřeno vztahem minimální hodnoty poměru:  $\frac{\text{síla na konci měření}}{\text{maximální síla v měření}}$ )

Jakožto každý test smáčecích vah by měl obsahovat základní informace o způsobu a složení testu. Uvádím tyto **specifikační informace**:

- A) Vzorek je před zkouškou čištěn.
- B) V tomto testu jsou použity vzorky nové i po zrychleném stárnutí.
- C) Degradace byla provedena v acetonu po dobu 3 týdnů.
- D) Typ tavidla byl zvolen dle normy ČSN EN 60068-2-69 a to neaktivované tavidlo: 25 hmot % kalafuny a 75 hmot % propanolu-2.
- E) Složení vybraných testovaných pájek je uvedeno v tabulce č.6

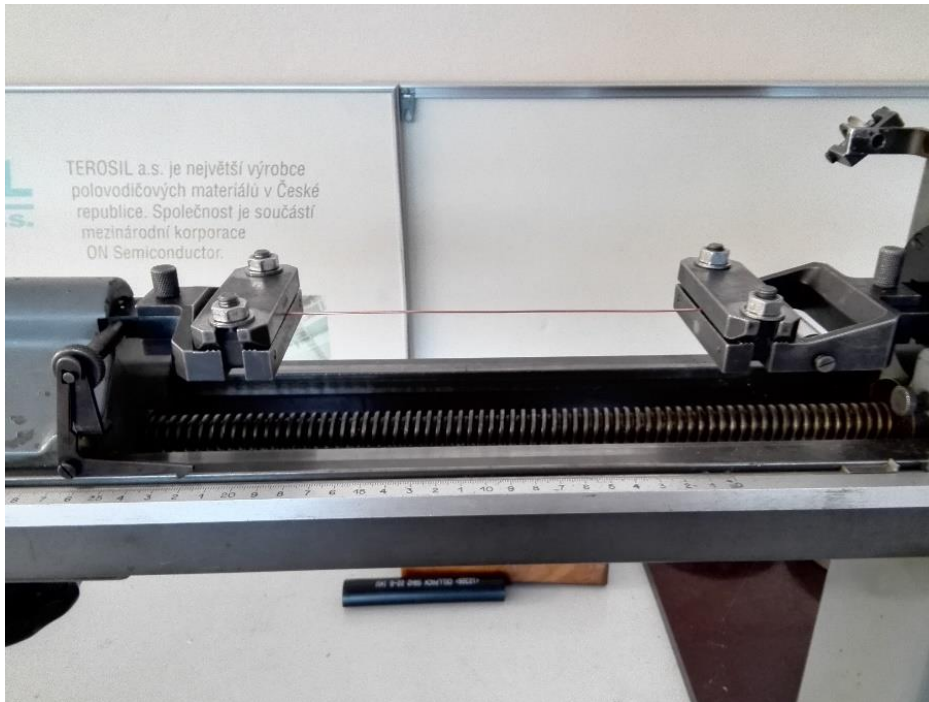
- F) Zkušební teplota byla zvolena dle normy ČSN EN 60068-2-69 pro olovnatou pájku:  $235^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  a pro pájky bezolovnaté:  $250^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ .
- G) Test je prováděn na odizolovaném drátu mědi o průměru 1 mm a délce vzorku  $2,2 \text{ cm} \pm 10\%$ , vzorky byly děleny štípacími kleštěmi.
- H) Poloha vzorku je kolmá na hladinu pájecí lázně.
- I) Hloubka ponoru byla nastavena na 5 mm.
- J) Doba trvání zkoušky byla nastavena na 10 s.
- K) Není stanovena hodnota pro začátek smáčení.
- L) Nejsou stanoveny oblasti pro vyšetřování smáčení a odsmačení.

## 2.2 Příprava vzorků

### 2.2.1 Měděné vzorky

Při přípravě vzorků se použil jako vzorek pro smáčený v pájce izolovaný měděný drát o průměru 1 mm. Tento drát byl opatrně odizolován, aby nedošlo při procesu sundávání bužírky k rýhám na samotném vodiči. To by mohlo způsobit ovlivnění výsledku v důsledku toho, že každá nerovnost na povrchu funguje jako samotná kapilára a tím ovlivní smáčivost pájky při testu.

Po odizolování potřebných délek drátu bylo třeba drát srovnat do rovnosti vyhovující k testu. Po mnoha pokusech srovnat drát do uspokojivé rovnosti, jsem zvolil metodu natažení drátu na trhačím stroji. Dráty, které se odizolovaly byly upnuty do trhačích kleštín viz obr. č.13. Při uchycení byl změřen jejich průměr posuvným měřítkem. Drát byl natažen o přesných 10 % své současné délky. K odměření délky drátu byla použita měřící stupnice na trhačce. Po vyrovnání drátu bylo provedeno opakované měření průměru, kde mohu konstatovat, že posuvným měřítkem nebylo zaznamenán změna průměru. Tudíž změna průměru drátu nataženého o 10 % je pro naše měření zanedbatelná.



*Obrázek č. 13 Rovnání vzorku natažením*

Drát bylo potřeba zkrátit na praktickou délku pro zkoušku. Aby se vzorek dal použít na změření pro měření z každé strany jsem zvolil délku vzorku 2,2 cm kterou jsem následně krátil štípacími kleštěmi. Při štípání drátu vzniká v místě předělu drátu ostrý kónus. Pro měření jsem uvažoval tento hrot zbrousit. Pro porovnání více vzorků jsem však tuto myšlenku zavrhl z důvodu, že při dělení drátu vzniká vždy na pohled identický útvar přeštěpu a tak mají všechny vzorky stejné podmínky při ponoření do pájky. Nuance rozdílnosti vzorku, která je pouhým okem nerozeznatelná, je tedy při měření zanedbána.

V první přípravě vzorků jsem si tyto vzorky pokusil připravit dopředu. Z důvodu, že měděné tyčky rychle oxidují, jsem je uzavřel do nádoby s acetonem.

A takto jsem je uskladnil v domnění, že zabráním samotné oxidaci mědi. Při prvním měření, které však následovalo po 8 dnech, jsem zjistil, že vzorky vykazují velice pomalé smáčení oproti novému odizolovanému vzorku. Byl jsem tedy nucen udělat novou sadu vzorků.



## 2.2.2 Příprava tavidla

Tavidlo bylo zvoleno s požadavkem na dostupnost látek a cenu. Podle těchto kritérií jsem zvolil neaktivované tavidlo uvedené v normě, které se skládá z 25 hmot % kalafuny a 75 hmot % propanolu-2.

Kalafuna byla pořízena z obchodu GME ve velikosti 50 g od firmy NUBA, s.r.o. Tato kalafuna je prodávána pod obchodním názvem Kalafuna Grand. Bod tání této pryskyřice je v rozmezí 66,5 – 93,5°C. Při teplotě větší než 300°C dochází k rozkladu a varu kalafuny. [13]

Použitý IPA Isopropanol je od firmy Penta, je to bezbarvá hořlavá látka na bázi alkoholu. Rozpouští oleje, alkaloidy, gumu a v našem případě pryskyřici.

Na přesné odměření kalafuny a isopropanolu jsem využil mikrováhu, která je součástí laboratoře. Na mikrováhu byla vložena odzátkovaná ampule. Váha byla zkalibrována do 0. Postupným přidáváním kalafuny do ampule se odměřilo požadované množství. V našem případě se jednalo o 7,5 g kalafuny a 22,5 g isopropanolu. Viz obrázek č.14.



Obrázek č. 14 Rozpouštění kalafuny v isopropanolu

Ampule se zazátkovala a třepáním se urychlovalo rozpouštění kalafuny v isopropanolu. Na obrázku č.14 je vidět částečně rozpuštěná kalafuna v isopropanolu.

## 2.3 Měřicí přístroje a vybavení

### 2.3.1 Meniskograf MK6



Obrázek č. 15 Meniskograf MK6

Jedná se o měřicí zařízení s velmi citlivými mikrováhami, na které je upevněn závěsný mechanismus. Zařízení je vybaveno posuvným kalíškem s ohřevem. Meniskograf zaznamenává časový průběh z mikrovah a je ukládán do počítače pomocí programu Meniskograf Ide. Zařízení je někdy označováno jako metoda smáčecích vah.

### 2.3.2 Měřicí optický systém Hawk QC 5000



Obrázek č. 16 Hawk QC 5000

Měřicí optický systém Hawk QC 5000, byl použit pro změření a optické posouzení máčených vzorků. Tento přístroj je vyroben firmou Vision Engineering a jedná se o tříosý bezkontaktní souřadnicový měřicí systém typu Hawk precision. Obraz, který je snímán v živém přenosu do počítače, je možné editovat v programu Quadra-check 5000.

### 2.3.3 Mikrováha Mettler Toledo AG245

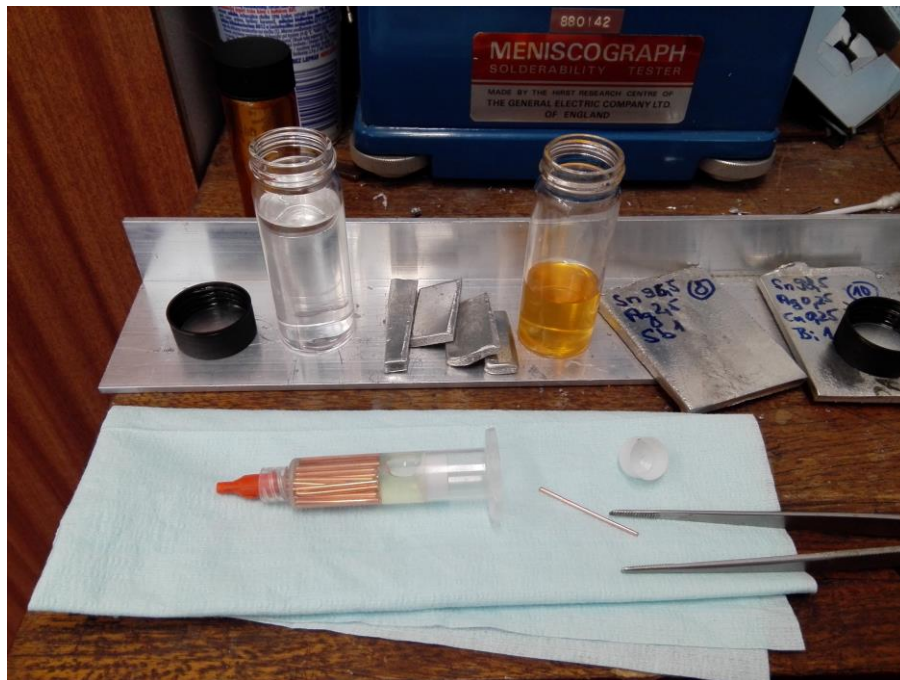


*Obrázek č. 17 Mettler Toledo AG245*

Mikrováha, která byla použita na změření kalafuny a propylalkoholu. Je značky Mettler Toledo s funkcí dvojího vyvažování. K dispozici je přes 12 volitelných jednotek: g, mg, oz, ct atd. Tato váha disponuje motorizovanou autokalibrací s opravou automatické nuly. Maximální kapacita váhy je 210 g s rozlišením 0,1 mg respektive 41 g s rozlišením 0,01 mg.

## 2.4 Měření vzorků

Vzorky byly připraveny na buničitém ubrousku, který izoloval prostředí před prachem a mastnotou. Při manipulaci se vzorkem jsem používal pinzetu pro minimalizaci kontaktu vzorku s rukou, a zabráněnil tak znečištění.



Obrázek č. 18 Pracovní stanoviště

Měření proběhlo při těchto atmosférických podmínkách:

- tlak: 987,9 hPa
- teplota: 26,7 °C
- vlhkost: 35,1 %

### 2.4.1 Časová posloupnost zkoušky proběhla dle normy

Úkon	Čas	Trvání
1) Ponoření do tavidla	0	5s
2) Zavěšování vzorku do přístroje	~ 15s	
3) Odstraňování oxidů z povrchu pájky	~ 20s	

4) předehřev	~ 30s	15s
5) počátek zkoušky	~ 75s	3s
6) ponoření do pájky	max 100s	10s

Tabulka č. 5 Časový postu zkoušky

## 2.4.2 Měření slitiny pájek

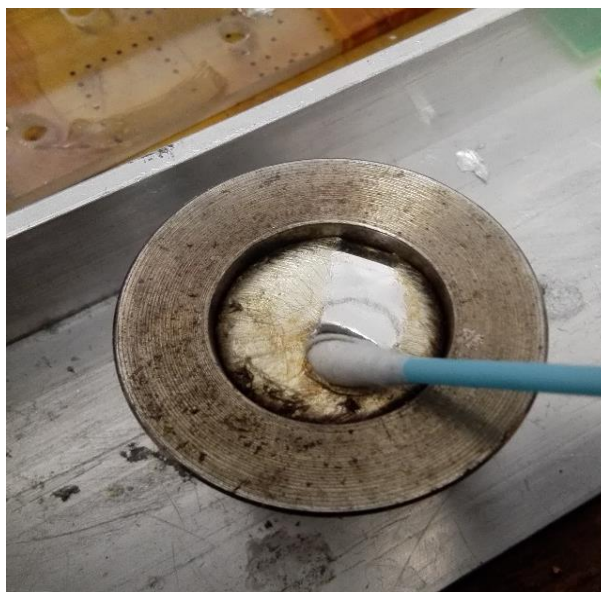
Slitina	Bod tavení	Teplota měření
Sn63Pb37	183°C	235°C
Sn95,5Ag3,8Cu0,7	217-218°C	250°C
Sn96,5Ag2,5Sb1	225-235°C	250°C
Sn98,5Ag0,25Cu0,25Bi1	214-220°C	250°C

Tabulka č. 6 Měření slitiny

Meniskograf byl nastaven na uvedené hodnoty, pro které budeme měřit průběh smáčecí síly dané pájky. Mimo těchto hodnot byla nastavena doba záznamu hodnot na 10 ms, a tím umožněno dostatečné rozlišení důležitých bodů na křivce časové závislosti síly. Zařízení bylo nastaveno tak, aby se celý průběh vešel na graf. Jelikož se měří smáčivost na vzorku, který je elektricky vodivý, není nutno nastavovat senzor dotyku s pájecí lázní. Přístroj započne zaznamenávat při prvním dotyku testovaného vzorku s hladinou roztavené pájky pomocí uzavření elektrického okruhu.

Vzorek, který byl vybrán k měření, byl před použitím očištěn v roztoku isopropanolu, a následně upevněn do vhodného držáku, tak aby měl požadovaný úhel ponoření a vývod se umístil na střed pájecí lázně. Před tím, než byl držák se vzorkem zavěšen a vystředěn nad pájecí lázeň, byl smáčen v tavidle. A to tak aby byla vytvořena souvislá vrstva tavidla. S použitím buničité utěrky byl konec drátku položen na odsátí přebytečného tavidla. Tím se zaručila tenká vrstva tavidla na zkoušeném vzorku. Základem bylo dávat si pozor na to, aby se tavidlo nedostalo svojí vzlínavostí do zobáčku, což by nejen že citelně zkreslovalo průběh měření, ale jakmile by se tavidlo dostalo do styku s roztavenou pájkou, přecházelo by nebezpečně rychle do varu.

Bezprostředně před zpuštěním měření se vždy očistí hladina roztavené pájky nesmáčivou teflonovou stěrkou, popřípadě vatovým tamponkem na špejli. Tím se z povrchu pájky odstraní vznikající oxidy, které lze vidět na obrázku č.19.



*Obrázek č. 19 Oxidace na povrchu roztavené pájky SnAgCu*

Vzorek jsem zavěsil nad lázeň a čekal jsem v rozmezí 15 s než se měření spustilo. Vzorek nebyl předeřhříván, jak tomu je při používání v průmyslu. Z důvodu tenké vrstvy roztoku tavidla usuzuji, že se stačilo rozpouštědlo odpařit dřív, než se vzorek namočil do rozehřáté pájky. A toto bylo potvrzeno experimentální metodou, kde ze spočítaných hodnot rychlosti odparu při teplotě 28,3 °C se isopropanol odpaří ze vzorku za 3,8 s viz tabulka č.13.

Po spuštění měření se kalíšek s rozehřátou pájkou na požadovanou teplotu uvede do pohybu vzhůru proti vzorku, který je zavěšený nad ním. Rychlost byla nastavena na 5 mm/s a hloubka ponoru na 5mm.

Vzorek je takto smočen v pájce po přesný čas, a to po nastavenou dobu 10 s. Tato doba byla zvolena v souladu s normou a její horní hranice z důvodu neznalosti charakteristiky dané pájky. Svislá síla působící na vzorek je zaznamenána během doby styku mezi pájecí lázní a vzorkem. Síla, která je zaznamenána v průběhu vytahování se v této metodě nevyhodnocuje. Od každého měření slitiny je zaznamenáno minimálně 5 korektních měření.

Časová posloupnost testů každé sady vzorků s danou slitinou pájky byla měřena v co nejkratším čase, aby byla dle normy udržena reprodukovatelnost.

Tento postup byl zopakován u vzorků vystavených degradaci v acetonu.

Změřené vzorky byly po smáčení opticky prozkoumány a změřeny jejich výšky smáčení pájkou.



## 2.5 Vyhodnocení

Pro vyhodnocení naměřených hodnot jsem využil softwarového nástroje Microsoft Office: Excel 2016. Hodnoty byly zaznamenávány po 10 ms po dobu 17 s, kde samotné měření vzorku trvalo 10 s.

Data, která byla zaznamenávána jsou v surovém stavu zkreslena o elektrický šum, způsobený vlastností měřící sestavy. K tomuto elektrickému šumu se přidává šum mechanický, který je způsobený otřesem při posuvu lázně pájky meniskografem. Další mechanický šum pochází od možného průvanu nebo otřesů způsobených lidmi, migrujícími laboratoří. Tyto jevy jsem se pokoušel minimalizovat, ale z charakteristiky prostředí, kde se měřilo, nebylo možné tyto vlivy na měření zcela vyloučit. Tento šum způsoboval zkreslení výsledného grafu. Proto bylo třeba tyto hodnoty upravit tak, aby nedocházelo k výraznému zkreslení. Jako nejvhodnější matematický postup jsem zvolil metodu klouzavých průměrů, která dokázala graf dostatečně vyhladit, aby bylo možné bezpečně určit trend křivky.

Před samotnou aplikací klouzavého průměru bylo třeba jednotlivé průběhy sjednotit do stejných počátků. Záznamové zařízení nepochopitelně někdy zaznamenalo hodnoty, které byly posunuty od nuly Y souřadnice síly. Tuto korekturu jsem udělal v Excelu, jako přičtení nebo odečtení příslušné vzniklé odchylky od nuly, tyto hodnoty jsou v příloze podbarveny zelenou barvou.

Hodnoty počátku měření sice byly přesně nastaveny v meniskografu, ale výsledné hodnoty nebyly nikdy měřeny ve stejný čas. Tato korekce byla vytvořena na základě posouzení hodnot, kdy docházelo ke zvýšení čísel od nuly. Tyto počátky jsou znázorněny v příloze podbarvením žlutou barvou.

Z každé sady testů byla sestrojena průměrovaná křivka smáčení a následně porovnána. Z grafu byly odečteny hodnoty maximální a konečné hodnoty smáčecí síly. Z těchto hodnot byly dopočítány hodnoty vztlakové síly (korigovaná nula)  $F_{VZ}$ ,  $F_{2/3}$  a ukazatel stability smáčení.

## 2.6 Naměřené a dopočítané hodnoty

	Hustota při 20 °C	
Cín	7,285	g/cm <sup>3</sup>
Olovo	11,34	g/cm <sup>3</sup>
Stříbro	10,5	g/cm <sup>3</sup>
Bizmut	9,8	g/cm <sup>3</sup>
Antimon	6,69	g/cm <sup>3</sup>
Měd	8,9	g/cm <sup>3</sup>

Tabulka č. 7 Hustoty prvků

Pájka	Sn96,5Ag0,25Cu0,25Bi1	Sn96,5Ag2,5Sb1	Pb37Sn63	Sn95,5Ag3,8Cu0,7	
Dopočtená hustota	7322,225	7390,525	9076,75	7418,475	[kg/m <sup>3</sup> ]

Tabulka č. 8 Vypočítané hustoty slitin

Příklad výpočtu Sn96,5Ag0,25Cu0,25Bi1:

$$96,5 * 7285 + 0,25 * 10500 + 0,25 * 8900 + 1 * 9800 = 7322,255 \text{ kg/m}^3$$

### 2.6.1 Vzorky bez degradace

#### Nové vzorky bez degradace

	Sn96,5Ag0,25Cu0,25Bi1	Sn96,5Ag2,5Sb1	Pb37Sn63	Sn95,5Ag3,8Cu0,7	
F <sub>vz</sub>	0,2821	0,2847	0,3497	0,2858	mN
F <sub>max</sub>	0,6650	0,5910	0,8820	0,4980	mN
F <sub>2</sub>	0,9471	0,8757	1,2317	0,7838	mN
F <sub>2/3</sub>	0,6314	0,5838	0,8211	0,5225	mN
t <sub>2/3</sub>	880	3170	1510		ms
t <sub>1</sub>	3180	3260	3170	3190	ms
t <sub>2</sub>	4060	6430	4680	nedosáhlo	ms
F <sub>konec</sub>	0,65 00	0,5840	0,8500	0,4980	mN
Stabilita smáčení	97,74	98,82	96,37	100	%

Tabulka č. 9 Naměřené a spočtené hodnoty nových vzorků

Příklad výpočtu:

$$F_{Vz} = gV\rho = 9,81 * 3,14 * 0,0005^2 * 0,005 = 0,0002821 * 1000 = 0,2821 \text{ mN}$$

$$F_{Max} = \text{Odečteno z grafu} = 0,6650 \text{ mN}$$

$$F_2 = F_{Max} + F_{VZ} = 0,9471 \text{ mN}$$

$$F_{2/3} = \frac{2}{3} * F_2 = 0,6314 \text{ mN}$$

$$t_1 = \text{odečteno z grafu} = 3180 \text{ ms}$$

$$t_2 = \text{odečteno z grafu} = 4060 \text{ ms}$$

$$t_{2/3} = t_2 - t_1 = 3180 \text{ ms}$$

$$F_{Konec} = \text{Odečteno z grafu} = 0,6500 \text{ mN}$$

$$\text{Stabilita smáčení} = \frac{F_{Konec}}{F_{Max}} * 100 = 97,74 \%$$

Kde:

$F_{VZ}$  je vztlačová síla působící na vzorek, kdy je kontaktní úhel s pájkou pravoúhlí viz. bod (c) na smáčecí křivce .

$F_{Max}$  je maximální výsledná síla smáčení vzorku.

$F_2$  je maximální smáčecí síla pájky od korigované nuly .

$t_1$  je čas, kdy je vzorek plně ponořen.

$t_2$  je čas, kdy je síla rovna  $F_{2/3}$ .

$t_{2/3}$  je čas, kdy síla dosáhla  $\frac{2}{3}$  maximální smáčecí síly  $F_2$ .

$F_{Konec}$  je síla na konci 10s měření.

Stabilita smáčení je schopnost pájky udržet si svoji maximální sílu smáčení .

### Průměrná výška smáčení vzorku

Pájka	Sn96,5Ag0,25Cu0,25Bi1	Sn96,5Ag2,5Sb1	Pb37Sn63	Sn95,5Ag3,8Cu0,7
1.měření [mm]	6,408	6,273	6,852	6,600
2.měření [mm]	5,952	6,152	6,95	6,856
3.měření [mm]	6,251	6,207	6,657	6,752
Průměr [mm]	6,203	6,210	6,819	6,736

Tabulka č. 10 Naměřené hodnoty smáčecí výšky vzorků pomocí Hawk QC 5000

## 2.6.2 Vzorky s degradací v acetonu

### Degradace: Aceton

	Sn96,5Ag0,25Cu0,25Bi1	Sn96,5Ag2,5Sb1	Pb37Sn63	Sn95,5Ag3,8Cu0,7	
Fvz	0,2821	0,2847	0,3497	0,2858	mN
Fmax	0,4858	0,3003	0,6326	0,5814	mN
F2	0,7679	0,5850	0,9822	0,8672	mN
F2/3	0,5119	0,3900	0,6548	0,5781	mN
t2/3				2450	ms
t1	5290	5950	6760	4750	ms
t2	nedosáhlo	nedosáhlo	nedosáhlo	7200	ms
Fkonec	0,4858	0,2927	0,6325	0,5738	mN
Stabilita smáčení	100	97,50	99,99	98,70	%

Tabulka č. 11 Naměřené a spočtené hodnoty degradovaných vzorků v acetonu

Při výpočtu byl použit stejný postup jako tomu bylo u vzorků nových.

## 2.6.3 Simulace nepříznivých vlivů na měření

Simulace průvanu byla provedena stolním ventilátorem 130 cm od měřícího zařízení. Otřesy jsou simulovány boucháním do stolu u měřícího zařízení.

Sn96,5Ag0,25Cu0,25Bi1	Průvan	Otřes	Běžné měření	
Fvz	0,282080444	0,282080444	0,285788366	mN
Fmax	0,59	0,61	0,6635	mN
F2	0,872080444	0,892080444	0,949288366	mN
F2/3	0,581386963	0,406666667	0,442333333	mN
t2/3	1630	1070	800	ms
t1	4270	3730	3650	ms
t2	5900	4800	4450	ms
Fkonec	0,5168	0,5567	0,648	mN
Stabilita smáčení	87,59	91,26	97,74	%

Tabulka č. 12 Hodnoty simulovaných nepříznivých vlivů při měření (otřesy, průvan)

## 2.6.4 Výpočet rychlosti odparu isopropanolu ze vzorku před ponořením

### Odpar isopropanolu při 28,3°C za 30s

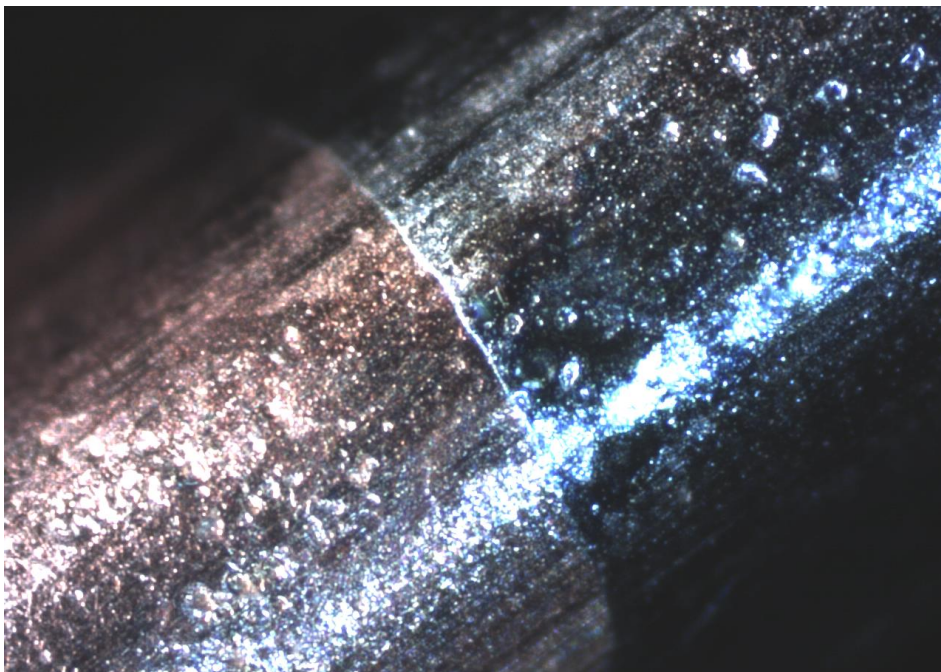
Měření	1	2	3	4	5
počáteční hmotnost	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
konečná hmotnost	0,5961	0,5915	0,5961	0,5971	0,5966

Tabulka č. 13 Experimentální metoda odparu isopropanolu

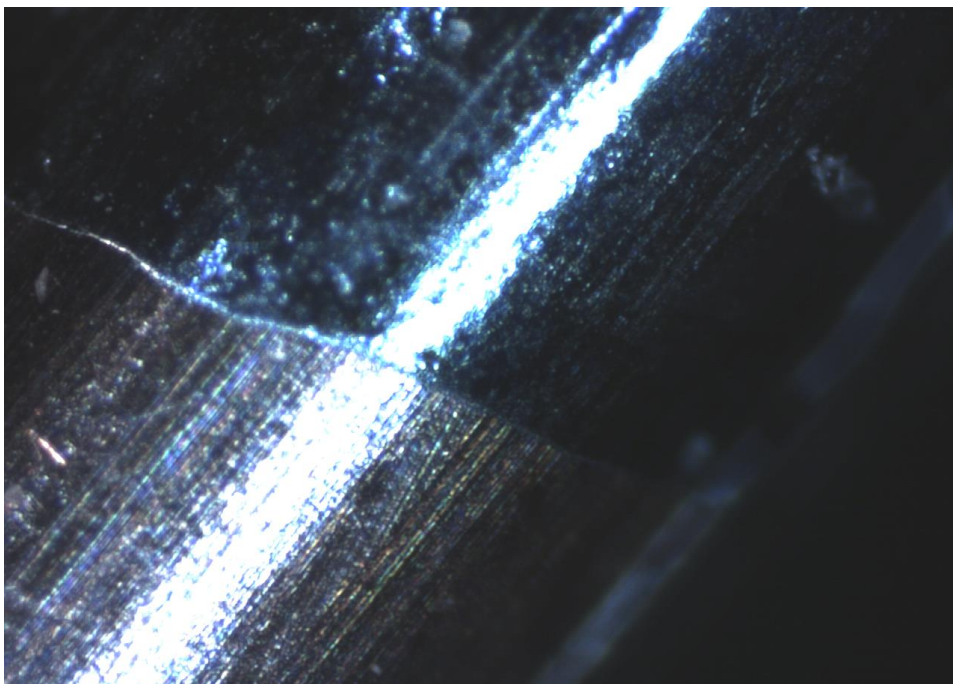
Z těchto hodnot byla spočítána rychlost odparu průměrně 0,1507 mg/s. Byla uvažována tloušťka smáčeného tavidla na vzorku 0,3 mm a obsahu isopropanolu v roztoku 75 hmot %. Při tomto množství isopropanolu na vzorku se odpaří ze vzorku při spočítaném odparu za 3.78 s.

## 2.6.5 Optické porovnání vzorků

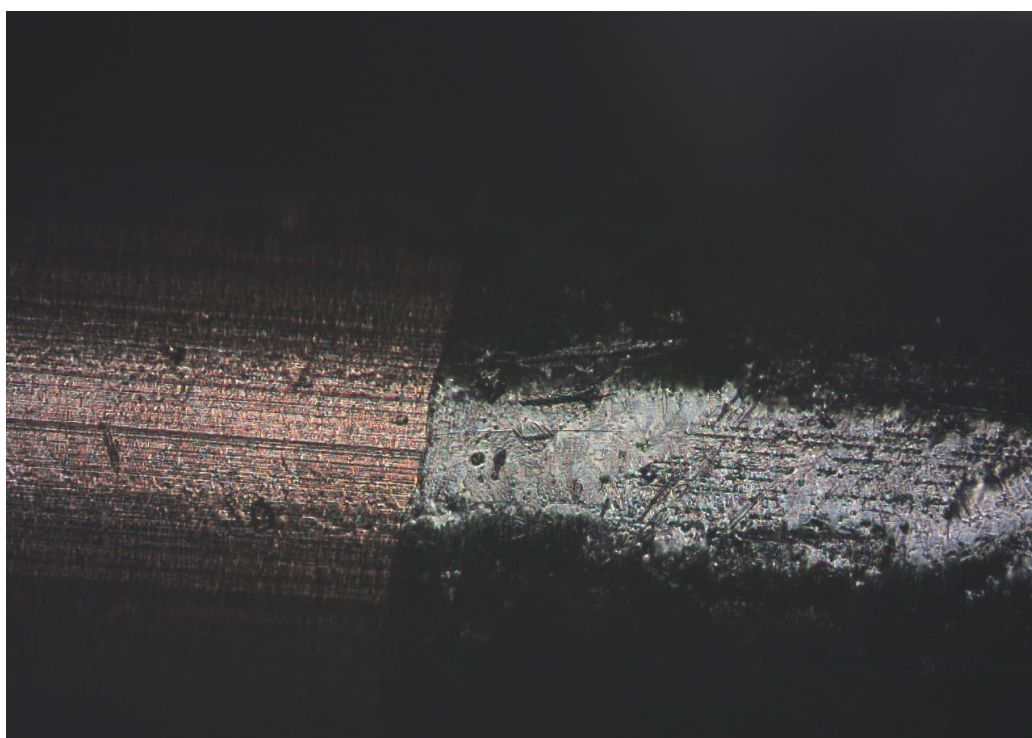
Snímky pořízeny pomocí optického systému Hawk QC 5000:



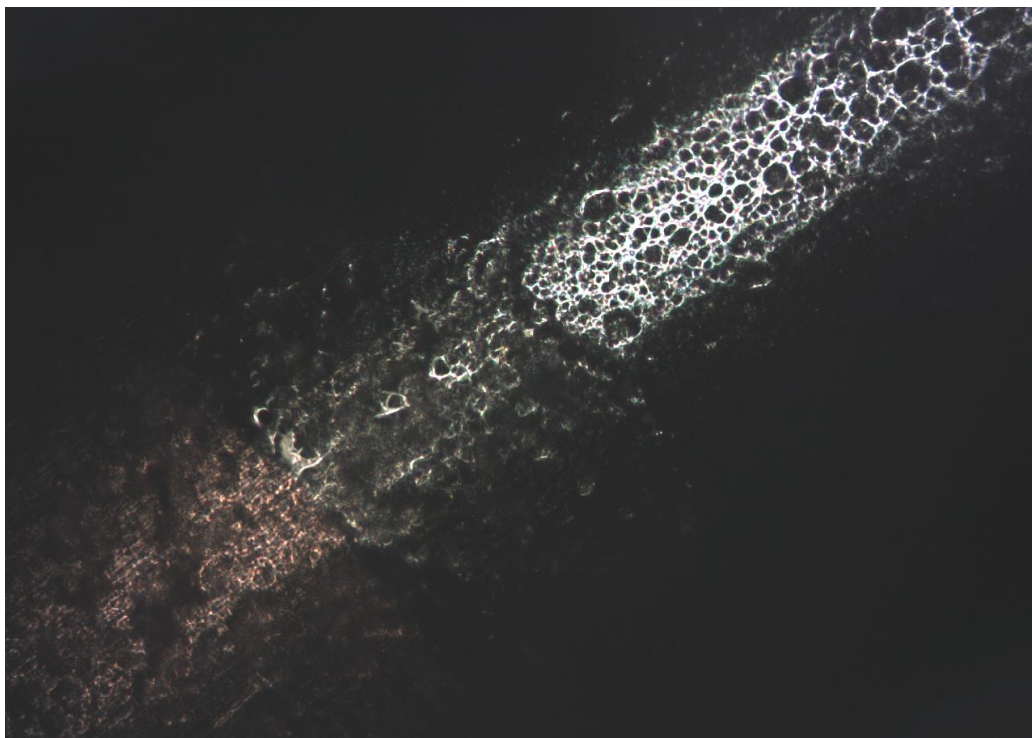
Obrázek č. 20 Pb37Sn63 na rozhraní smáčení mědi – nestárnutý vzorek



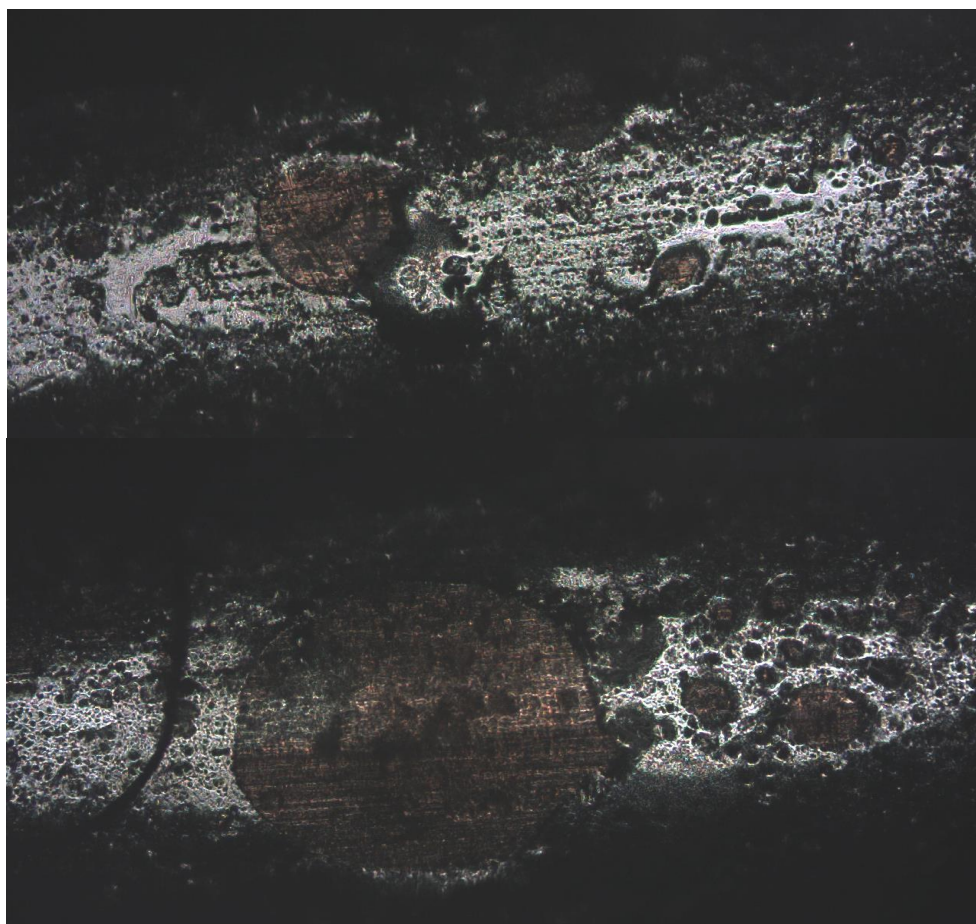
Obrázek č. 21 Pb37Sn63 na rozhraní smáčení mědi – degradace v acetonu



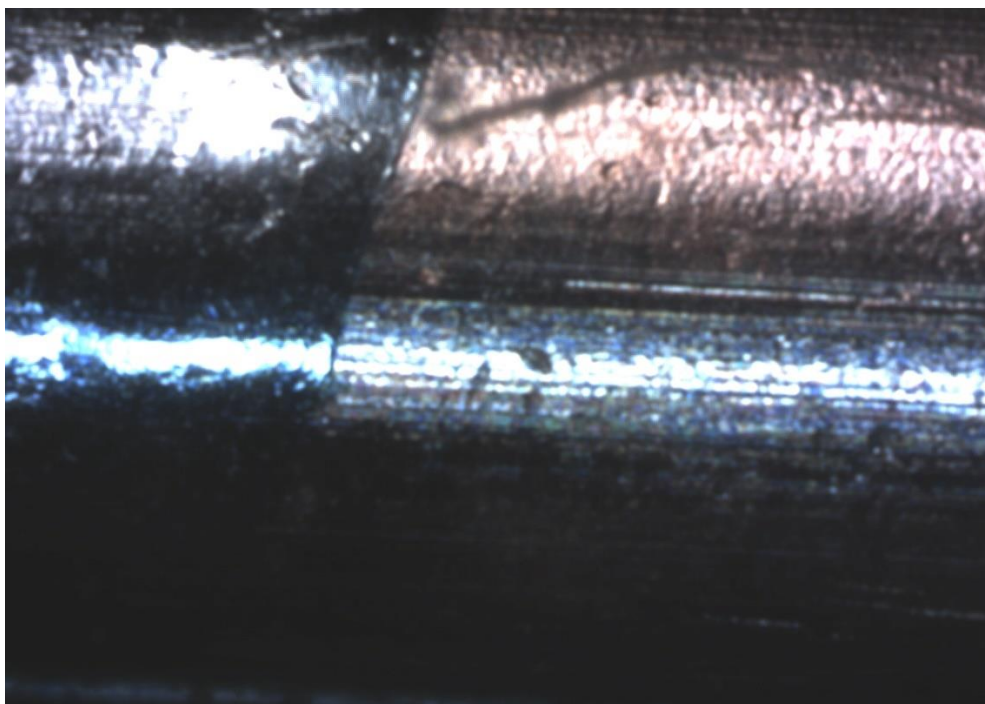
Obrázek č. 22 SnAgCu na rozhraní smáčení mědi – nestárnutý vzorek



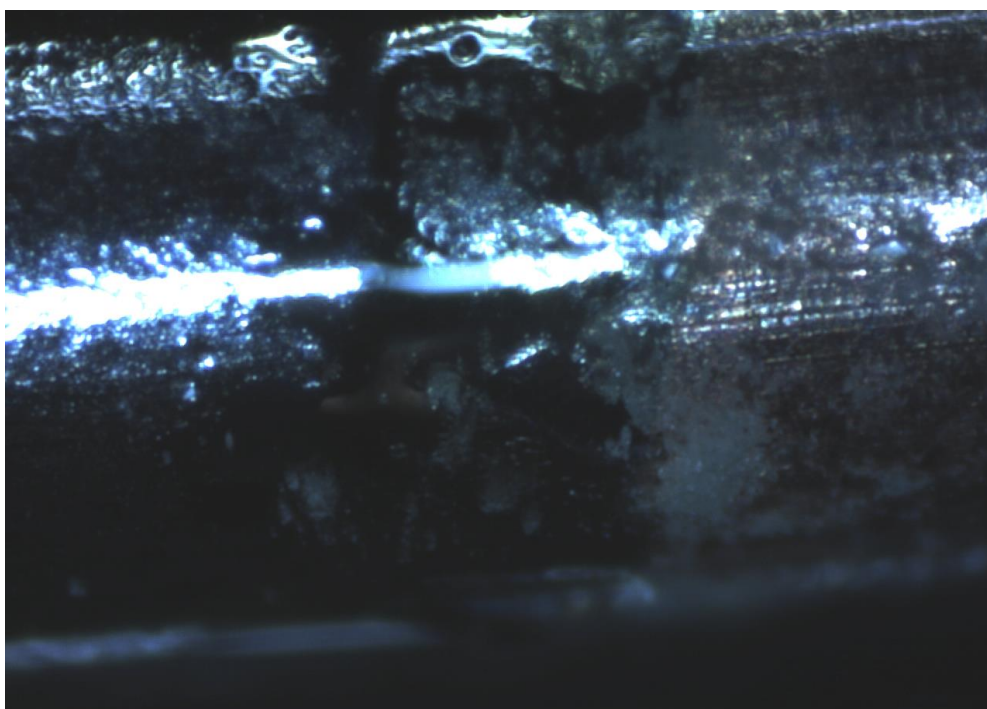
*Obrázek č. 23 SnAgCu na rozhraní smáčení mědi – degradace v acetonu*



*Obrázek č. 24 SnAgCu nesmáčená místa vlivem zvýšené koroze – degradace v acetonu*

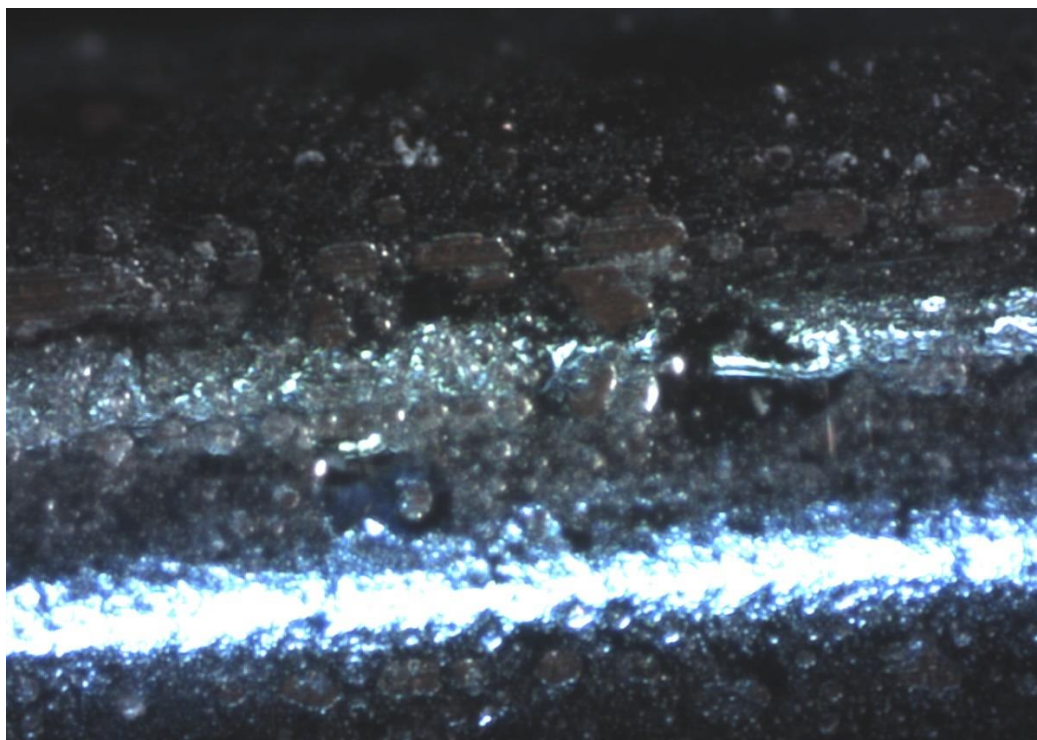


Obrázek č. 25 SnAgCuBi viditelným pás intermetalické vrstvy – nestárnutý vzorek

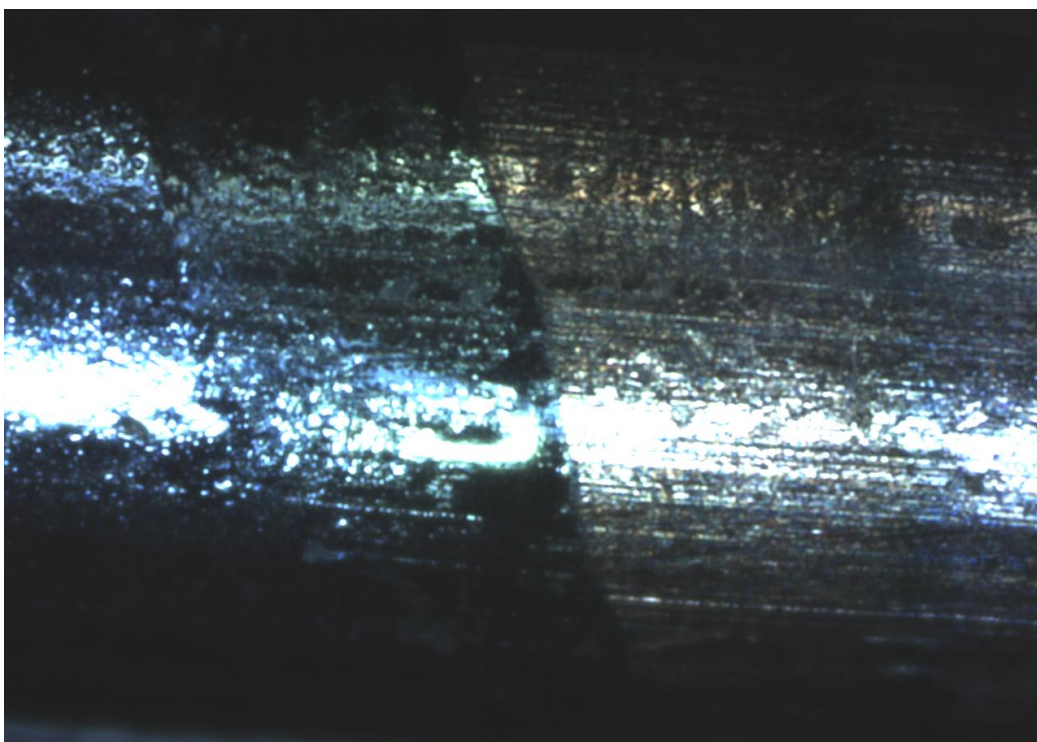


Obrázek č. 26 SnAgCuBi okraj neostře smáčený na rozhraní mědi – degradace v acetonu

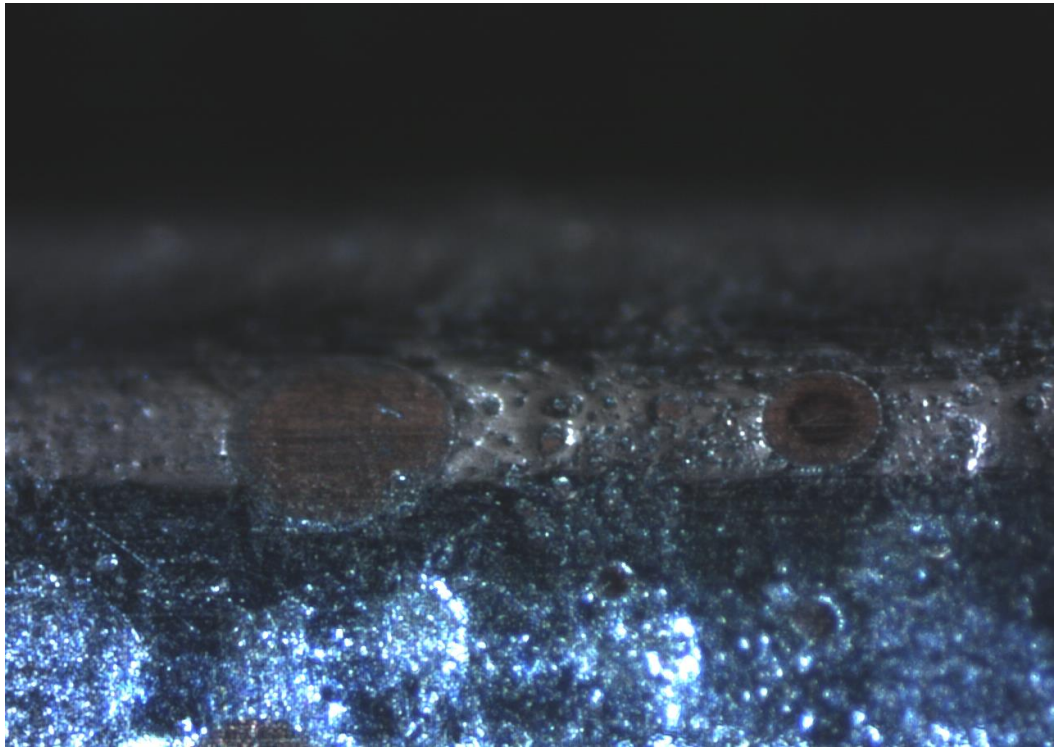




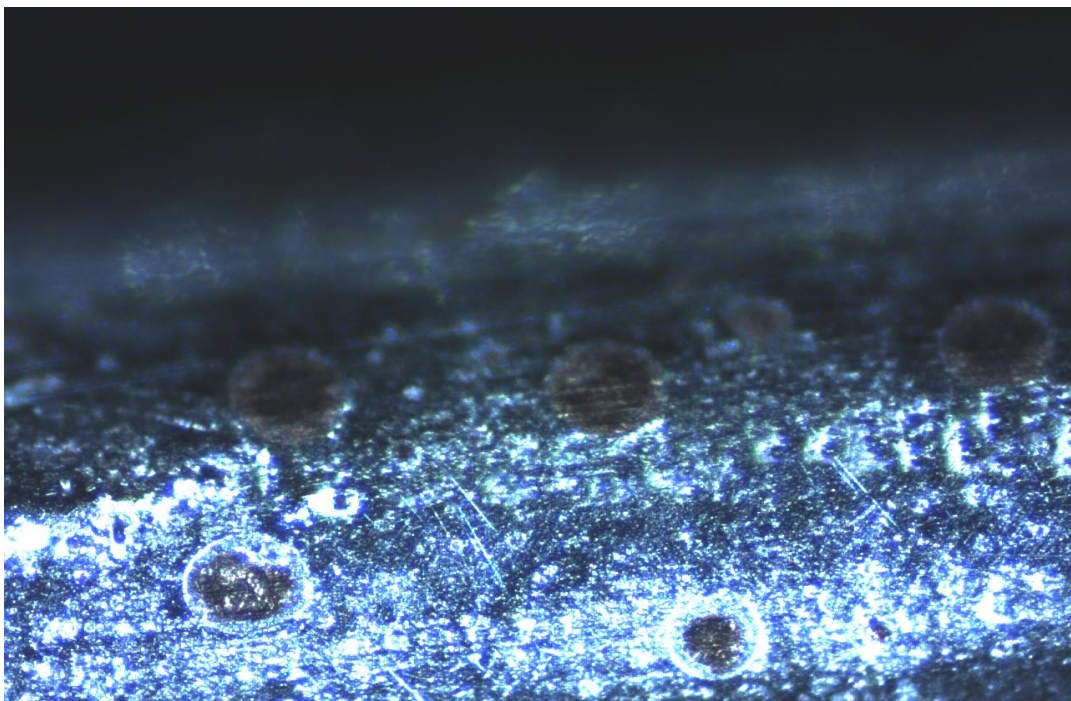
Obrázek č. 27 SnAgCuBi nesmáčené místo – degradace v acetonu



Obrázek č. 28 SnAgSb viditelným pásem intermetalické vrstvy – nestárnutý vzorek



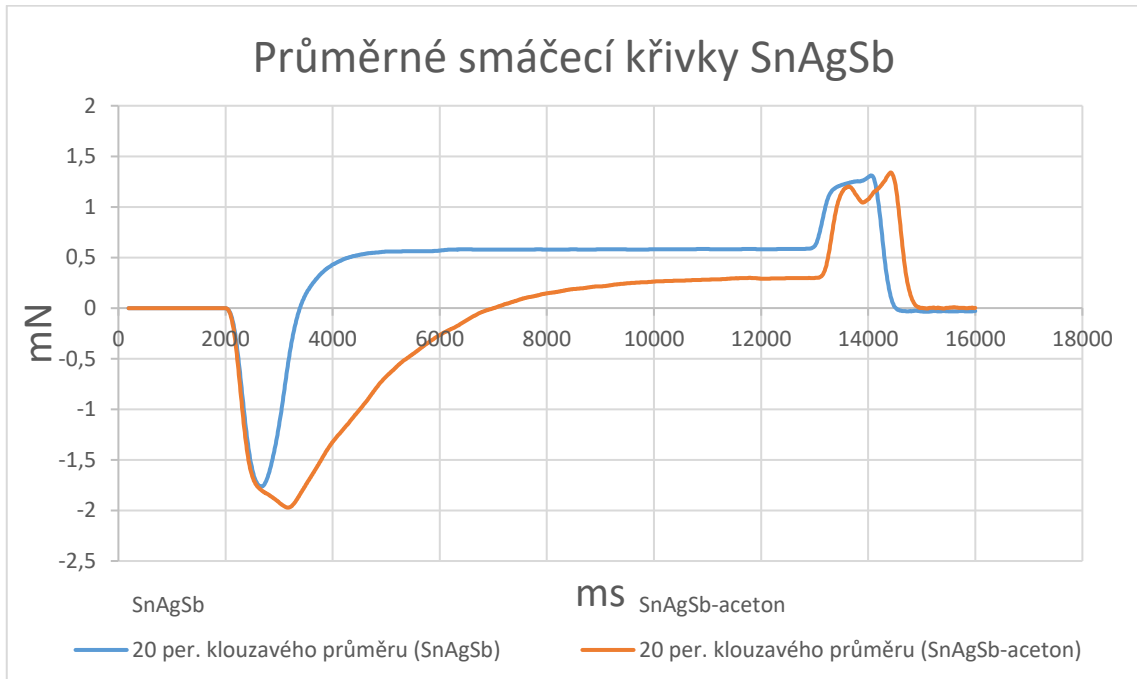
Obrázek č. 29 SnAgSb nesmáčené místo s bodovou korozí 1. – degradace v acetonu



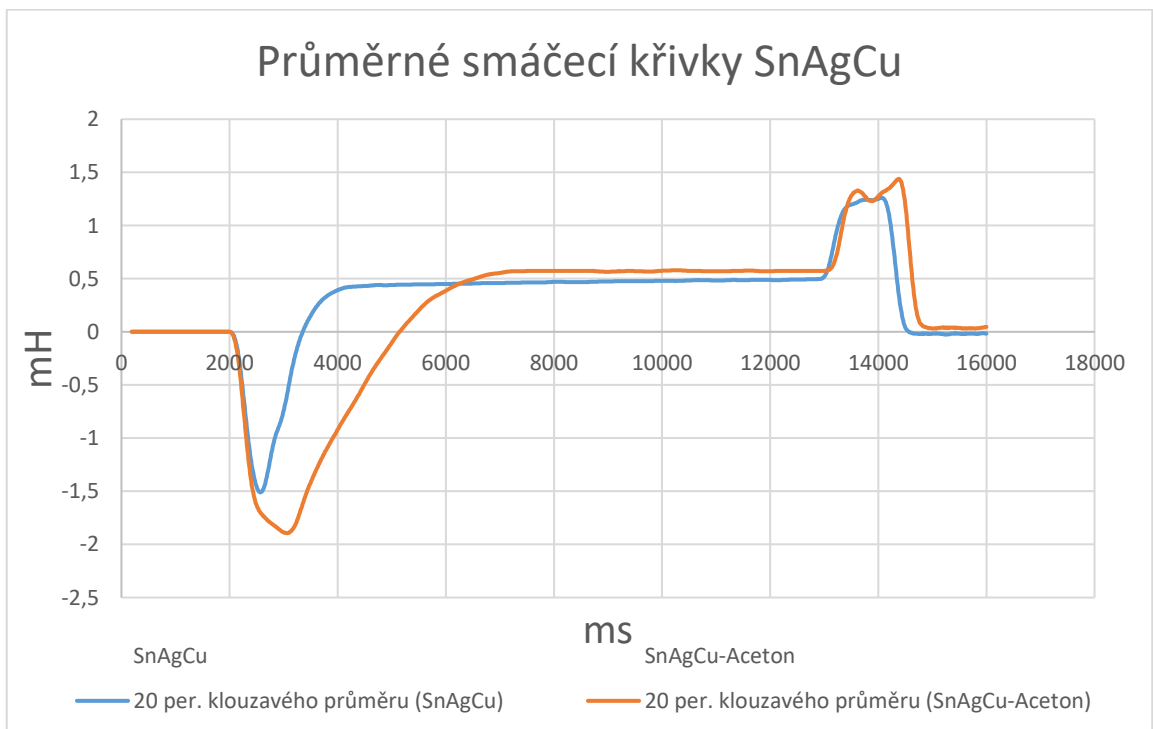
Obrázek č. 30 SnAgSb nesmáčené místo s bodovou korozí 2. – degradace v acetonu

## 2.6.6 Naměřené chyarakteristiky

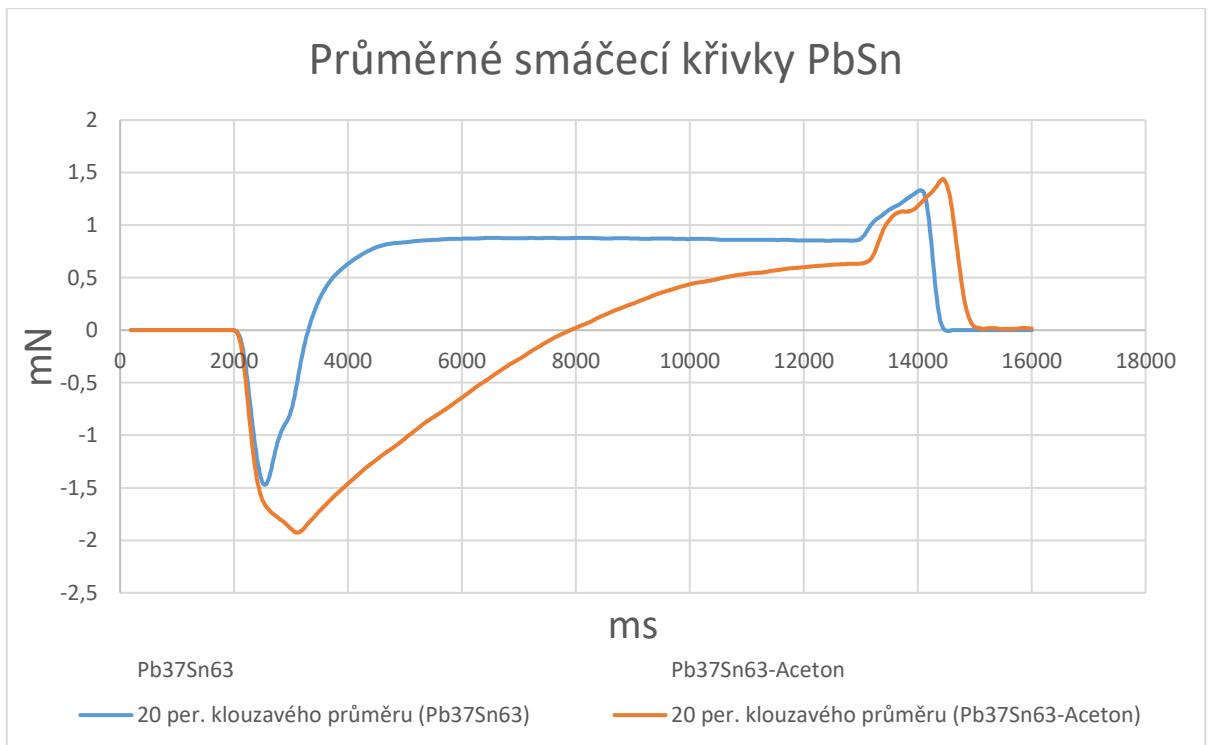
Následující průběhy jsou průměrem všech měření dané pájky. V každém grafu jsou vyneseny dvě křivky, kde oranžová značí vzorek degradovaný v acetonu a modrá křivka vzorkem novým.



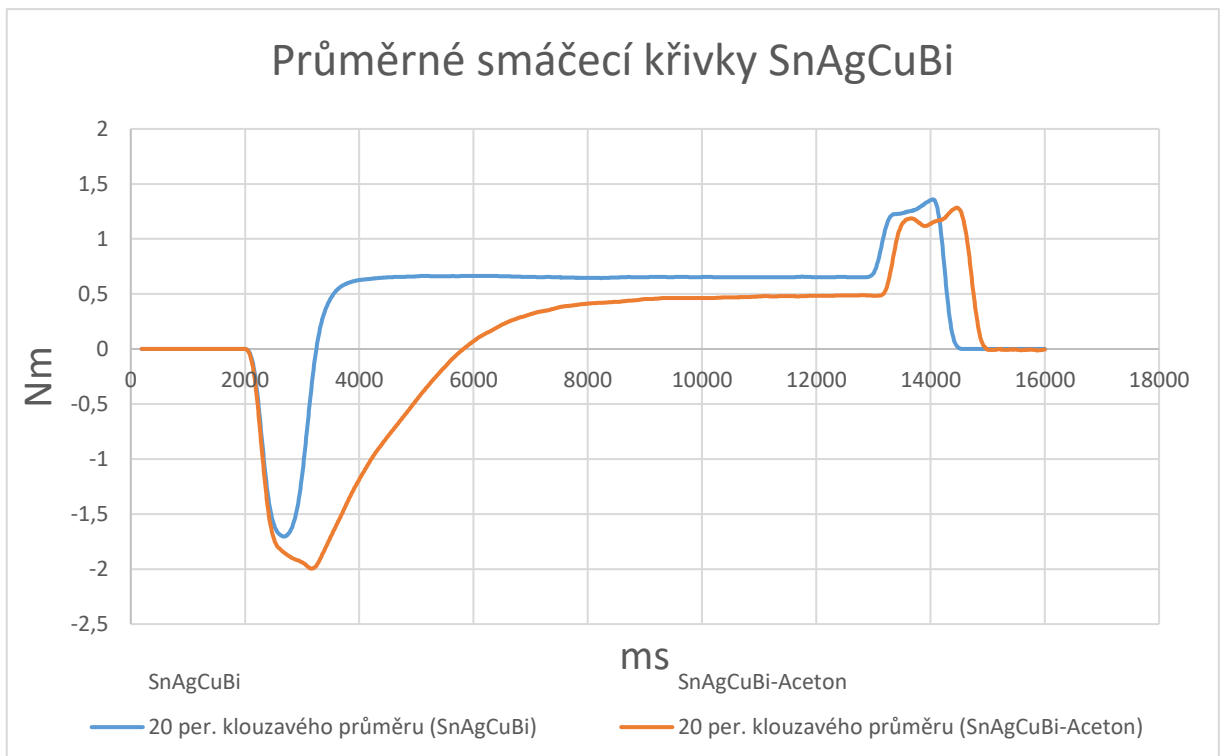
Graf č. 1 Výsledné křivky SnAgSb s porovnáním nového a degradovaného vzorku



Graf č. 2 Výsledné křivky SnAgCu s porovnáním nového a degradovaného vzorku



Graf č. 3 Výsledné křivky PbSn s porovnáním nového a degradovaného vzorku



Graf č. 4 Výsledné křivky SnAgCuBi s porovnáním nového a degradovaného vzorku

### 3. Závěr

V této práci jsem se měl seznámit s pájecími slitinami a jejich vlastnostmi. Obeznámit se s metodami, které slouží k jejich určování. Jako praktickou část jsem si měl vybrat pájecí slitiny a provést měření metodou smáčecích vah.

Pro měření smáčecích charakteristik byly zhotoveny sady vzorků. První byla vyrobena a skladována v acetonu 3 týdny. Druhá sada byla zhotovena těsně před měřením. Vzorky byly rozděleny do dvou skupin. První skupina byly nové nestárnuté vzorky a druhá skupina byla vystavena degradaci. Všechny testované vzorky byly vždy připraveny stejným postupem a byl dodržen stejný technologický postup. Pro měření pájek byla stanovena teplota 250°C u bezolovnatých slitin, a 235°C u slitiny olovnaté. Celkem byly testovány 4 pájecí slitiny: Sn63Pb37; Sn95,5Ag3,8Cu0,7; Sn96,5Ag2,5Sb1; Sn98,5Ag0,25Cu0,25Bi1. Naměřené vzorky byly po měření očištěny isopropylem a podrobeny optické analýze, která zkoumala kvalitu smáčení a zda nedošlo na hranici pájka-měď k odsmáčení. Byly porovnány průměrné hodnoty nestárnutých vzorků a vzorků namáhaných v acetonu. Pro stránku osobního zájmu, jak moc může ovlivnit měření smáčecích vah průvan či malé otřesy v prostoru, kde měření probíhá, byl proveden test při těchto nežádoucích jevech.

Z porovnání smáčecích křivek je vidět, že degradovaný materiál má horší tepelnou vodivost, což dokazují delší časy od začátku měření do doby, než je vzorek plně ponořen. Tyto časy jsou delší zhruba o polovinu než u vzorku bez oxidace. Oxidy mají několikanásobně horší tepelnou vodivost a tím prodlužují čas plného ponoru vzorku. Sklon křivek od časové osy v době plného ponoru je u vzorků s degradací mírnější z důvodu pomalejší deoxidace povrchu mědi tavivkem. Z výsledných průběhů lze říct, že pájky obsahující měď lépe smáčejí oxidovaný povrch, jelikož jejich křivky od časové osy v době plného ponoru jsou prudší než u pájek bez obsahu mědi. Pájka SnAgCu má dokonce větší maximální smáčecí sílu u vzorku s oxidací než u nového. Největší smáčecí sílu dosáhla pájka olovněná PbSn i v případě na vzorkách s oxidací.

Z optického porovnání jsme zjistili, že olovnatá pájka má bezchybný přechod mezi mědí a pájkou. Ze vzorků, které byly vystaveny oxidaci je vidět bodová koroze, která bránila dobrému smáčení pájek. Na bezolovnatých pájkách je vidět na rozraní mědi

intermetalická vrstva, která zhoršuje smáčení. Rychlost tvorby intermetalických vrstev je u pájek bezolovnatých rychlejší. Cín reaguje u bezolovnatých slitin s měděným podkladem rychleji, než je tomu při přítomnosti olova v pájce. Intermetalické vrstvy mají horší smáčecí vlastnosti, proto mají bezolovnaté slitiny horší smáčecí sílu ve srovnání s PbSn.

Z provedených testů na zkreslení měření pomocí průvanu a otřesů vyplývá, že časy, kdy pájka dosáhne  $F_{2/3}$  se prodloužili o více než 25 %. V případě průvanu je čas dvojnásobný. Z naměřených hodnot je vidět, že největší ovlivnění testu metodou smáčecích vah je chlazení vzorku v jeho průběhu. Pokud tedy vznikne v měření jeden z těchto zkreslovacích faktorů a nevyločíme průběh z měření, výrazně zkreslí provedený test.

## 4. Seznam použitých zdrojů

[1] ABEL M. , CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice, 2005, ISBN 80-903597-0-1

[2] PIETRIKOVÁ A., ĎURIŠIN J., MACH P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice 2010 ISBN: 978-80-553-0447-2

[3] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001

[4] Ing. Iveta Konvičná : Pájení na měkko, ISSN 1802-4785

[http://www.sossoukyjov.cz/data/file/K\\_technologie/VY\\_32\\_INOVACE\\_3c/VY\\_32\\_INOVACE\\_3c04.pdf](http://www.sossoukyjov.cz/data/file/K_technologie/VY_32_INOVACE_3c/VY_32_INOVACE_3c04.pdf) [online 23.5.2016]

[5] <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:11998/proc-testovat-pajitelnost->

[6] RŮŽA, V.: Pájení, SNTL, Praha, 1988

[7] JELÍNEK JAN, Diplomová práce, : Identifikace pryskyřičných laků v uměleckých dílech pomocí plynové chromatografie, 2010

[8] Technický list k výrobku RAZANT <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.745-062.1.pdf> [online 26.5.2016]

[9] Technický popis: <https://www.gme.cz/gelove-tavidlo-future-rework-jelly-30-g> [online 23.5.2016]

[10] P. Harant 1 , F. Steiner1, : Testování pájitelnosti metodou smáčecích vah, ZČU v Plzni, [online 23.5.2016] <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/392/1/r0c1c8.pdf>

[11] <https://old.vscht.cz/fch/prikladnik/prikladnik/p.12.1.html> [online 23.5.2016]

[12] [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=29171](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29171) [online 13.5.2016]

[13] <https://www.gme.cz/data/attachments/bel.745-017.2.pdf> [online 23.5.2016]

- [14] [http://www.sossoukyjov.cz/data/file/K\\_technologie/VY\\_32\\_INOVACE\\_3c/VY\\_32\\_INOVACE\\_3c05.pdf](http://www.sossoukyjov.cz/data/file/K_technologie/VY_32_INOVACE_3c/VY_32_INOVACE_3c05.pdf)[online 23.5.2016]
- [15] <http://www.ssto-havirov.cz/katalog-obrazku/clanek-171/1967-vy-52-inovace-528-8.pdf>[online 23.5.2016]
- [16] [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_es-001/hesla/uhel\\_smaceni.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/uhel_smaceni.html)[online 26.5.2016]
- [17] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Eutektikum>[online 23.5.2016]
- [18] [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-80-7080-600-1/pdf/024.pdf](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pdf/024.pdf)[online 23.5.2016]
- [19] [https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR\\_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a\\_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCyda4qSAP2hZNnz\\_st-3-A4fw](https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCyda4qSAP2hZNnz_st-3-A4fw)  
[online 23.5.2016]
- [20] <http://journal.masshp.net/wp-content/uploads/Journal/2008/Jilid%202/W.%20Shualdi%2058-64.pdf>  
[online 19.5.2016]
- [21] <http://www.irf.com/ehs/jedec02leadfreepackaging.pdf>  
[online 25.5.2016]
- [22] <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/podzemsky.pdf>  
[online 23.5.2016]
- [23] <http://www.smtcentrum.cz/vyber-tavidel/pryskyricna-tavidla-na-bazi-kalafuny/> [online 23.5.2016]
- [24] <http://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/testovani-pajitelnosti-v-praxi-smaceni-soucastek/> [online 23.5.2016]



## 5. Seznam tabulek

Tabulka č. 1 Prvky a jejich přidané vlastnosti do slitiny.....	16
Tabulka č. 2 Posouzení úhlu smáčivosti z pohledu pájení.....	25
Tabulka č. 3 Tloušťka intermetalické vrstvy v závislosti na použité pájce a počátečních podmínkách [22] .....	32
Tabulka č. 4 Stanovené podmínky testu dle normy ČSN EN 60068-2-69.....	43
Tabulka č. 5 Časový postu zkoušky .....	54
Tabulka č. 6 Měřené slitiny .....	54
Tabulka č. 7 Hustoty prvků .....	58
Tabulka č. 8 Vypočítané hustoty slitin .....	58
Tabulka č. 9 Naměřené a spočtené hodnoty nových vzorků.....	58
Tabulka č. 10 Naměřené hodnoty smáčecí výšky vzorků pomocí Hawk QC 5000 .....	59
Tabulka č. 11 Naměřené a spočtené hodnoty degradovaných vzorků v acetonu .....	60
Tabulka č. 12 Hodnoty simulovaných nepříznivých vlivů při měření (otřesy, průvan)...	60
Tabulka č. 13 Experimentální metoda odparu isopropanolu .....	61

## 6. Seznam obrázků

Obrázek č. 1 Úhel smáčení .....	25
Obrázek č. 2 Smáčivost v závislosti na úhlu .....	25
Obrázek č. 3 Smáčení na kontaktech součástky [24] .....	26
Obrázek č. 4 Hystereze úhlu smáčivosti.....	27
Obrázek č. 5 Fázový diagram cín-olovo [17] .....	30
Obrázek č. 6 Výskyt intermetalické fáze Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub> ve struktuře pájeného spoje. [22].....	32
Obrázek č. 7 Test roztékavosti [1] .....	34
Obrázek č. 8 Kuličkový test[1] .....	36
Obrázek č. 9 Složení měřicího zařízení na metodu smáčecích vah .....	37
Obrázek č. 10 Fáze smáčení metodou smáčecích vah [10].....	38
Obrázek č. 11 Smáčecí křivka [10].....	38
Obrázek č. 12 Možné průběhy smáčecí křivka [24] .....	40
Obrázek č. 13 Rovnání vzorku natažením .....	48
Obrázek č. 14 Rozpouštění kalafuny v isopropanolu .....	49
Obrázek č. 15 Meniskograf MK6 .....	51
Obrázek č. 16 Hawk QC 5000 .....	51
Obrázek č. 17 Mettler Toledo AG245.....	52
Obrázek č. 18 Pracovní stanoviště .....	53
Obrázek č. 19 Oxidace na povrchu roztavené pájky SnAgCu .....	55
Obrázek č. 20 Pb <sub>37</sub> Sn <sub>63</sub> na rozhraní smáčení mědi – nestárnutý vzorek.....	61
Obrázek č. 21 Pb <sub>37</sub> Sn <sub>63</sub> na rozhraní smáčení mědi – degradace v acetonu .....	62
Obrázek č. 22 SnAgCu na rozhraní smáčení mědi – nestárnutý vzorek.....	62
Obrázek č. 23 SnAgCu na rozhraní smáčení mědi – degradace v acetonu .....	63
Obrázek č. 24 SnAgCu nesmáčená místa vlivem zvýšené koroze – degradace v acetonu.....	63
Obrázek č. 25 SnAgCuBi viditelným pás intermetalické vrstvy – nestárnutý vzorek .....	64
Obrázek č. 26 SnAgCuBi okraj neostře smáčený na rozhraní mědi – degradace v acetonu .....	64
Obrázek č. 27 SnAgCuBi nesmáčené místo – degradace v acetonu .....	65
Obrázek č. 28 SnAgSb viditelným pásem intermetalické vrstvy – nestárnutý vzorek .....	65
Obrázek č. 29 SnAgSb nesmáčené místo s bodovou korozí 1. – degradace v acetonu .....	66
Obrázek č. 30 SnAgSb nesmáčené místo s bodovou korozí 2. – degradace v acetonu .....	66

## 7. Seznam grafů

Graf č. 1 Výsledné křivky SnAgSb s porovnáním nového a degradovaného vzorku .....	67
Graf č. 2 Výsledné křivky SnAgCu s porovnáním nového a degradovaného vzorku .....	67
Graf č. 3 Výsledné křivky PbSn s porovnáním nového a degradovaného vzorku .....	68
Graf č. 4 Výsledné křivky SnAgCuBi s porovnáním nového a degradovaného vzorku .....	68

## 8. Seznam příloh

- Naměřené a vypočítané hodnoty vzorků bez degradace v Excel
- Naměřené a vypočítané hodnoty vzorků s degradací v acetonu v Excel
- Foto dokumentace a optické posouzení naměřených vzorků
- Porovnávání hodnot degradovaného vzorku s novým v Excel