

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Testování pájitelnosti pomocí Concoat MUST  
SYSTEM II**

**vedoucí práce: Ing. Tomáš Novák**

**2012**

**autor: Jan Novotný**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**Fakulta elektrotechnická**

**Akademický rok: 2011/2012**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan NOVOTNÝ**  
Osobní číslo: **E09B0166P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Testování pážitelnosti pomocí Concoat MUST SYSTEM II**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou měření pážitelnosti.
2. Navrhněte experiment pro měření pážitelnosti pomocí MUST SYSTEM II.
3. Proveďte vyhodnocení a porovnání naměřených výsledků.

## **Anotace**

Předkládaná bakalářská práce se zabývá problematikou pájitelnosti a jejího měření. V úvodních kapitolách jsou vysvětleny základní pojmy a popsány metody testování pájitelnosti.

Dále pak popisuje metodiku návrhu experimentu a realizovaný experiment pro testování pájitelnosti na drátových vývodech za použití různých tavidel a materiálů. Test byl proveden metodou smáčecích vah, pomocí testeru pájitelnosti Concoat MUST SYSTEM II. V závěrečné kapitole jsou vyhodnoceny výsledky experimentu.

## **Klíčová slova**

Pájitelnost, pájení, smáčivost, tavidlo, experiment, smáčecí síla.

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with solderability and its measurement. The basic concepts and solderability testing methods are explained in the opening chapters.

The following chapters describe the methodology and implementation an experiment to test the solderability of wired outlets. The test was performed by using the wetting balance method with tester Concoat MUST SYSTEM II using different materials and fluxes. Experiment results are evaluated in the final chapters.

## **Key words**

Solderability, soldering, wetting, flux, experiment, wetting force.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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 28.5.2012

Jan Novotný

.....

## **Poděkování**

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

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	7
<b>ÚVOD</b> .....	8
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	9
<b>1 TEORIE PÁJENÍ</b> .....	10
1.1 Pájení .....	10
1.2 Olovnaté a bezolvnaté pájky .....	10
1.3 Tavidla .....	13
<b>2 PÁJITELNOST A JEJÍ MĚŘENÍ</b> .....	15
2.1 Základní charakteristika .....	15
2.1.1 Smáčení .....	16
2.1.2 Teplotní požadavek .....	17
2.1.3 Teplená odolnost při pájení .....	18
2.2 Metody testování pájitelnosti .....	18
2.2.1 Metoda smáčecích vah .....	19
2.2.2 Kuličkový test .....	22
2.2.3 Otočně ponořovací metoda .....	23
2.2.4 Metoda stoupání menisku .....	24
2.2.5 Test roztékavosti .....	25
2.2.6 Ponořovací metody .....	26
<b>3 TEORIE NÁVRHU EXPERIMENTŮ</b> .....	28
3.1 Tvorba experimentů .....	28
3.2 Technika pájování experimentu .....	30
<b>4 EXPERIMENT PRO MĚŘENÍ PÁJITELNOSTI POMOCÍ MUST SYSTEM II</b> .....	32
4.1 Drátové vývody .....	32
4.2 Tavidla .....	33
4.3 Stárnutí .....	34
4.4 Nastavení testeru .....	34
4.5 Měření pájitelnosti .....	34
<b>5 ZHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ</b> .....	37
<b>ZÁVĚR</b> .....	38
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	39

## Úvod

Jedním z velice důležitých úkonů v oblasti montáže v elektronice je propojování součástek. Funkčnost zařízení přímo závisí na kvalitě propojení součástek.

Mezi nejrozšířenější metodu propojování součástek v elektronice patří měkké pájení, které se s příchodem nových materiálů a technologií výroby stalo obtížnějším. Zhotovení kvalitního spoje závisí na pájitelnosti použitých materiálů. Z tohoto důvodu je měření pájitelnosti v procesu výroby elektrických zařízení nedílnou součástí, bez které se elektrotechnická výroba téměř neobejde.

Předkládaná práce pojednává o problematice pájitelnosti a jejího měření. V úvodní kapitole je stručně popsána teorie pájení spolu se základními vlastnostmi tavidel. Dále pak pojednává o metodě plánování a tvorby experimentů.

Cílem práce bylo především navrhnout a realizovat experiment pro měření pájitelnosti pomocí testeru MUST SYSTEM II, který by objasnil změny úrovní pájitelnosti při aplikaci různých druhů tavidel a materiálů. Tento experiment dále poukazuje na změny pájitelnosti při časové degradaci materiálů vlivem skladování.

Realizace tohoto, či podobného experimentu by mohla být přínosem pro zkvalitnění propojování součástek v elektronice. Správnou volbou materiálů a tavidel vzhledem k dalším faktorům ovlivňující pájitelnosti se dá zaručit spolehlivý a kvalitní spoj, tím i delší životnost a funkčnost elektrických zařízení.



## Seznam symbolů a zkratek

$\theta$ [°]	Kontaktní úhel
h [mm]	Výška
D [mm]	Průměr
$\gamma$ [Nm <sup>-1</sup> ]	Povrchové napětí
S [-]	Faktor šíření
F [mN]	Síla
mm	Milimetr
ppm	Parts per milion (částice na milion)
R	Rosin (kalafuna)
RMA	Rosin mildly activated (kalafuna mírně aktivovaná)
RSA	Rosin strongly activated (kalafuna silně aktivovaná)
RA	Rosin activated (kalafuna aktivovaná)
IEC	International Electrotechnical Commission (Mezinárodní elektrotechnické komise)

# 1 Teorie pájení

V této kapitole budou nastíněny základní informace, které s danou problematikou úzce souvisí.

## 1.1 Pájení

Pájení je definováno jako způsob metalurgického spojování dvou kovů, třetím roztaveným kovem – pájkou. Teplota tavení pájky je vždy nižší, než teplota tavení pájených součástí. Povrchové atomy základního materiálu se dostanou do styku s atomy roztavené pájky, v takové vzdálenosti, že se vytvoří podmínky pro účinek adhezních a kohezních sil (adheze = přilnavost, koheze = soudržnost). Vzniká tak mezifázové rozhraní mezi pevným a tekutým kovem. [1][4]

Pájení obecně rozdělujeme na měkké a tvrdé. Měkké pájení je takové, kdy se teplota tavení pájky pohybuje pod 450 °C. Je-li teplota tavení vyšší než 450 °C, jedná se o pájení tvrdé. [1][4]

## 1.2 Olovnaté a bezolvnaté pájky

Z důvodu ochrany a zlepšení stavu životního prostředí bylo upuštěno od používání pájek na bázi olova. Hlavním důvodem je fakt, že olovo je toxický kov, který může způsobit vážné zdravotní potíže. Jelikož se nedá olovo z desek plošných spojů recyklovat, mohou se tyto vyřazené komponenty s obsahem olova ocitnout na skládkách, kde tímto těžkým kovem hrozí kontaminace spodních i povrchových vod. Následné vniknutí kontaminované vody do lidského organismu může způsobit vážná onemocnění. [1]

Pájecí slitiny na bázi olova, které se používaly, měly složení od 60%Sn/40%Pb až po 65%Sn/35%Pb. Pro náhradu olova v pájecích slitinách se volí prvky s ohledem na tyto kritéria: [1] [4]

- Netoxické
- Dostupné a cenově přiměřené
- Úzký teplotní rozsah plasticity
- Nízké povrchové napětí a přijatelné smáčení
- Materiálově vyrobitelné
- Přijatelná teplotní zpracování
- Vytvoření spolehlivých spojů

V souladu s výše uvedenými kritérii byly vytvořeny bezolovnaté slitiny s různými vlastnostmi v závislosti na procentuálním zastoupení prvků. Mnoho slitin navíc obsahuje přídavek třetího nebo čtvrtého prvku, s cílem snížit bod tavení a zvýšit smáčení a spolehlivost. Následující bezolovnaté pájecí slitiny jsou považovány za nejvhodnější náhradu olovnatých pájecích slitin.

#### Sn96.5/Ag3.5 (Sn96/Ag4)

Slitina Sn96.5/Ag3,5 je podle německých studií jednou z nejvhodnějších slitin. Existuje již mnoho zkušeností s používáním této slitiny. Tato slitina se ale vyznačuje nejhorším smáčením při pájení přetavením mezi slitinami s vysokým obsahem Sn. Teplota tavení je 221 °C [1][4].

#### Sn99.3/Cu0.7 (Sn99/Cu1)

Vzhledem k nízké ceně materiálu se tato slitina s obsahem mědi přednostně využívá k pájení vlnou. Nevýhodou může být nižší mechanická pevnost. Teplota tavení je 227 °C [1][4].

#### Sn/Ag/Cu

Slitina cínu, stříbra a mědi (Sn/Ag/Cu) je souhrnně nazývána SAC, podle začátečních písmen chemických prvků. Přidáním Cu do slitiny Sn/Ag se zajistí nižší teplota tavení, lepší smáčivost, lepší charakteristiky tečení a tepelné únavy. Podle firmy Nokia a Multicore se jedná o srovnatelnou nebo lepší slitinu než slitina Sn/Pb [1]. Kompozice složení bývá např. Sn96,75/Ag1.25/Cu2. Teploty tavení pájecích slitin SAC jsou vyšší než u Sn/Pb, a to v rozmezí 224-332 °C [4].

#### Sn/Ag/Cu/X

Písmeno X představuje další přídavek pro zlepšení vlastností slitiny. Např. Sn96.2/Ag2.5/Cu0.8/Sb0.5 (217 °C) má větší odolnost proti únavě než Sn/Pb, jelikož přidáním právě 0,5% Sb se zvýší pevnost [1][4]. Další slitiny v této kategorii mohou být Sn96.2/Cu2/Sb0.8/Ag0.2 (226-228 °C) a Sn/Ag/Cu/In. [1]

### Sn/Ag/Bi/X

Přídavkem  $\leq 5$  % Bi se sníží teplota tavení a zlepší se smáčivost systémů Sn/Ag. Tyto slitiny vykazují podle firem Indium Corp. a Matsushita nejlepší pájitelnost. Jsou to např. Sn91.8/Ag3.4/Bi4.8 (202-215 °C), Sn93.5/Ag3.5/Bi3 (210-217 °C). [1]

### Sn/Sb

Slitina Sn95/Sb5 s teplotou tavení od 232-240 °C mají špatné smáčení a teplota tavení je příliš vysoká. [1][4]

### Sn/Zn/X

Slitina Sn91/Zn9 je vysoce reaktivní. Zinek způsobuje oxidaci a korozi, při reakci s tavidlem vzniká tvrdá pasta [1][4]. Přidáním Bi se sníží koroze, jako je to např. u slitiny Sn89/Zn8/Bi3. Tyto pájecí slitiny byly přednostně vyrobeny za účelem zlevnění výrobků. Výhodou je nízká teplota tavení (191-199°C), která se pohybuje v blízkosti bodu tavení u Sn/Pb. [1]

### Sn/Bi

Slitina Bi58/Sn42 je určená pro nízkoteplotní aplikace. Bod tání této slitiny je 138,5 °C a vyznačuje se vysokou odolností vůči zhrubnutí [1][4]. Nevýhodou je vysoký podíl Bi, ten je vedlejším produktem při dobývání olova, proto je a stále bude těžko dostupný. [1]

Olovnaté a bezolovnaté pájky mají rozdílné vlastnosti v procesu pájení. Základním problémem bezolovnatých pájek je vyšší teplota tavení a to o 20 až 45 °C. Vyšší rozdíly teplot mohou mít špatný vliv na pájené součástky. Taktéž smáčivost a roztékavost je horší. Tyto dvě vlastnosti ovlivňují kvalitu propojení kontaktu.

### 1.3 Tavidla

Při pájení mají tavidla velký význam vzhledem ke kvalitě vytvoření spoje. Podporují smáčení, odstraňují oxidy a ostatní nečistoty z povrchů, které mají být spojeny.

Tavidla můžeme rozdělit na dvě základní kategorie dle použitého rozpouštědla. Rozpustná vodou a rozpustná rozpouštědlem na organické bázi. Tavidla rozpustná v rozpouštědle jsou založena na borovicové pryskyřici, známé jako kalafuna. [1]

U tavidel se udává jejich aktivita. Ideální tavidlo by mělo být vysoce aktivní a zároveň chemicky nečinné. V praxi těchto vlastností ale nelze dosáhnout. Jelikož vysoce aktivní tavidla jsou činné, musí se po dokončení pájení odstranit, aby nepřispívali korozi. [1]

Nekorozní, kalafunová tavidla na bázi kalafuny obsahují aktivní přísadu kyselinu abietovou. Tato aktivní přísada se stává plně aktivní až při teplotách od 127 °C do 300 °C. Po přesáhnutí maximální teplotní hodnoty se začíná rozkládat. Kalafunová tavidla se využívají v elektrotechnickém průmyslu, jelikož jsou nekorozní a nevodivá. [9]

Pryskyřičná tavidla na bázi kalafuny můžeme dále rozdělit podle úrovně aktivity na čtyři typy:

#### Typ R

Tento typ tavidla se skládá z čisté bílé pryskyřice (kalafuna), která je rozpuštěná v lihovém ředidle. Má nejnižší aktivitu, a proto relativně špatnou čistící schopnost. Nejvhodnější využití bude na vysoce pájitelné kovy (Au, Ag) [1][9]. U zbytků tavidla tohoto typu nehrozí žádná koroze. [9]

#### Typ RMA (pryskyřičné tavidlo s aktivátory)

Přidáním vhodných organických směsí lze dosáhnout vyšší aktivity tavidla. Tavidlo RMA obsahuje právě malé množství těchto směsí, a proto je aktivnější než tavidlo typu R. Používá se na snadněji pájitelné materiály, jako jsou např. měď, zlato a cíno-olověné pájky [1][9]. Zbytek tavidla je považován za netečný, nemusí být odstraněno. Avšak mohou být účinně odstraněny pomocí směsi polárních a nepolárních rozpouštědel. [9]

Typ RA (pryskyřičné tavidlo s větší účinností aktivátorů)

Tavidla typu RA obsahují více aktivních přísad než u typu RMA. Využívají se tam, kde tavidla typu R a RMA nemají takovou účinnost. Jelikož toto tavidlo je již vysoce aktivní, měly by se jeho zbytky po ukončení pájení odstranit. Jejich přítomnost na spoji by mohla podpořit dlouhodobou korozi [1][9].

Typ RSA (pryskyřičné tavidlo velmi silně aktivováno)

Jedná se o velmi silně aktivované tavidlo. Stejně jako u tavidla typu RA, musí být zbytky tavidla po použití kompletně odstraněny. [1]

## 2 Pájitelnost a její měření

V rámci zvyšování produkce výroby plošných spojů se časem přešlo z ručního pájení na automatizované pájení vlnou. To ale přineslo několik komplikací. Při ručním pájení problémových spojů stačilo např. zvýšit teplotu páječky nebo přidat více aktivované tavidlo. I když tento proces výroby je z hlediska kontroly ideální, je příliš zdlouhavý. Od doby, kdy se začalo využívat automatizovaného pájení vlnou, se výroba sice zrychlila, nic méně nastaly komplikace. Pájení začalo být obtížnější z důvodu nedostatečného přivedení tepla na kontakt a kratšího času pro celý proces pájení. Proto bylo zapotřebí vyvinutí metod, které by mohly analyzovat a následně zlepšit vlastnosti pájeného spoje ve výrobě. [2]

### 2.1 Základní charakteristika

Termín pájitelnost povrchu je použit jako popis schopnosti povrchu být smáčen během pájení. [1]

Podle norem IEC (Mezinárodní elektrotechnické komise) pájitelnost určuje vhodnost určité metody průmyslového pájení, vzhledem k použitému materiálu. Definují ji tři vlastnosti: smáčení, teplotní požadavek a tepelná odolnost při pájení. [2]

Pájitelnost ovlivňuje několik faktorů. Mezi tyto faktory patří vlastnosti materiálů použitých při pájení a vnější vlivy. Oba tyto aspekty spolu korespondují v čase. U použitých materiálů jsou důležité vlastnosti pájky, druh substrátu a typ tavidla. Nepříznivé vlivy, které pájitelnost zhoršují, mohou být např. povrchové usazeniny (nečistoty) na substrátu nebo vývodech součástek, oxidace vlivem styku s kyslíkem a intermetalické změny při skladování desek plošných spojů. [1][3]

Správné zvolení materiálů spolu s vhodným typem tavidla za minimalizace nepříznivých vnějších vlivů zajistí lepší pájitelnost, tudíž i kvalitnější spoj.

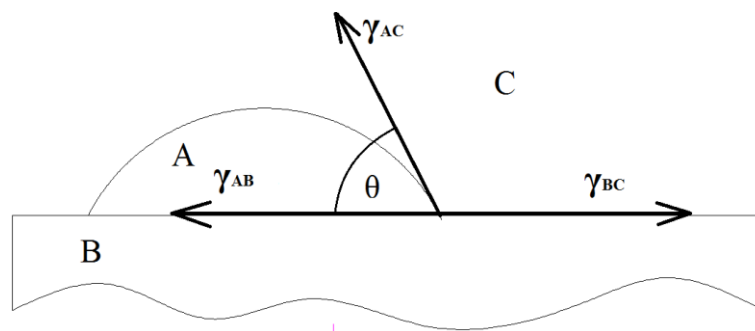
### 2.1.1 Smáčení

Smáčení a pájitelnost spolu úzce souvisí. Smáčení lze definovat jako schopnost povrchu být smáčen pájkou.

Za podmínky, kdy povrchová energie čistého povrchu je vyšší, než povrchová energie roztavené pájky, pájka smočí povrch a vytvoří na rozhraní metalurgickou vazbu [1]. Jak smáčení postupuje, tak roste na rozhraní intermetalická vrstva. Vznik této vrstvy je podmínkou dobrého smočení a vytvoření pevné vazby mezi pájkou a povrchem. [1][4]

Při procesu smáčení na sebe působí síly povrchových napětí. Tyto síly, jež jsou zobrazeny na obr. 2.1, se vytvoří při roztékání látky po povrchu tuhého tělesa. Platí pro ně vztah, který popisuje Youngova rovnice (1). [4]

$$\gamma_{AC} - \gamma_{AB} = \gamma_{BC} \cos\theta \quad (1)$$



Obr. 2.1 Grafické znázornění Youngovi rovnice [6]

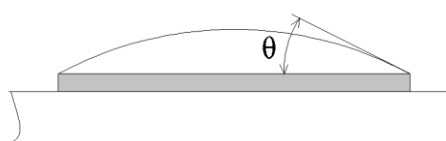
Kde

- $\gamma_{AB}$  povrchové napětí rozhraní kapalně a plynné fáze,  $\text{Nm}^{-1}$
- $\gamma_{BC}$  povrchové napětí rozhraní plynné a pevné fáze,  $\text{Nm}^{-1}$
- $\gamma_{AC}$  povrchové napětí rozhraní plynné a kapalně fáze,  $\text{Nm}^{-1}$
- $\theta$  úhel smáčení,  $^{\circ}$

Hlavním kritériem smáčivosti je hodnota úhlu smáčení  $\theta$ . Tento úhel se může pohybovat v rozmezí  $0 - 180^{\circ}$ . Přičemž přímo úměrně platí, čím menší je úhel smáčení  $\theta$ , tím lepší je smáčivost a naopak. [1]

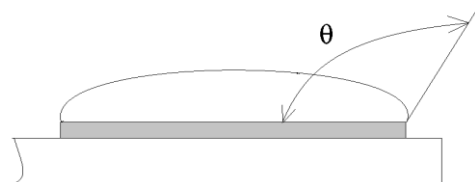


Na obrázku 2.2 můžeme vidět kritéria dle úhlu smáčení  $\theta$ .



$0^\circ < \theta < 20^\circ$  Výborné až dokonalé smáčení

$20^\circ < \theta < 40^\circ$  Dobré až velmi dobré smáčení



$40^\circ < \theta < 55^\circ$  Postačující smáčení

$55^\circ < \theta < 90^\circ$  Špatné smáčení

$90^\circ < \theta$  Nesmáčivost

Obr. 2.2 Smáčecí úhel [1]

Aby materiál byl dobře smáčen, musí být povrch zbaven nečistot. Dalším faktorem, který ovlivňuje smáčení je také drsnost povrchu a správná volba slitiny pájky spolu s pájeným povrchem. [2] V tabulce 2.1 můžeme vidět smáčivost nejpoužívanějších prvků.

Tab. 2.1 Prvky a jejich smáčivost [2]

Název prvku	Chemické značení prvku	Smáčivost
Cín	Sn	Výborná
Zlato	Au	Výborná
Měď	Cu	Dobrá
Mosaz	Cu/Zn	Dobrá
Ocel	Fe	Postačující
Nikl	Ni	Postačující
Hliník	Al	Obtížná
Nerezová ocel	Fe/Cr	Obtížná
Titan	Ti	Velmi obtížná

### 2.1.2 Teplotní požadavek

Musí být zajištěn dostatečný přívod tepla do pájecí oblasti. Při pájení se teplo přenáší jak na desku plošného spoje, tak i na okolní součástky. To zapříčiní, že v pájecí oblasti se teplota nepříznivě sníží, což je nežádoucí. Proto by měly být součástky navrženy tak, aby přenos tepla mezi spojem a součástkou byl co nejmenší. [2]

### 2.1.3 Tepelná odolnost při pájení

Jak je uvedeno výše, při pájení se teplo přenáší do okolního prostředí, zejména na součástky a desku plošného spoje. Tyto součástky musí být navrženy tak, aby vydržely tepelné namáhání při pájení a nedošlo k jejich přímé destrukci nebo nesprávné funkčnosti. [2]

## 2.2 Metody testování pájitelnosti

Zkoušky pájitelnosti součástek se dělí na dvě skupiny. První obsahuje zkoušky navržené pro předpověď, jak dobře budou součástky pájitelné ve výrobě. Druhá definuje zkoušky pro akceptovatelné materiály vývodů součástek a výrobní procesy. [1]

Pokud by existující zkoušky pájitelnosti mohly přesně předpovědět, jak dobře budou součástky pájitelné během výrobního procesu, uživatelé by nepotřebovali fyzikální kontrolu jednotlivých částí. Avšak vzhledem ke komplikovanosti celého procesu, na který působí řada ovlivňujících činitelů, žádná univerzální kontrola neexistuje. Proto je nutné provádět kontroly pájitelnosti. [1]

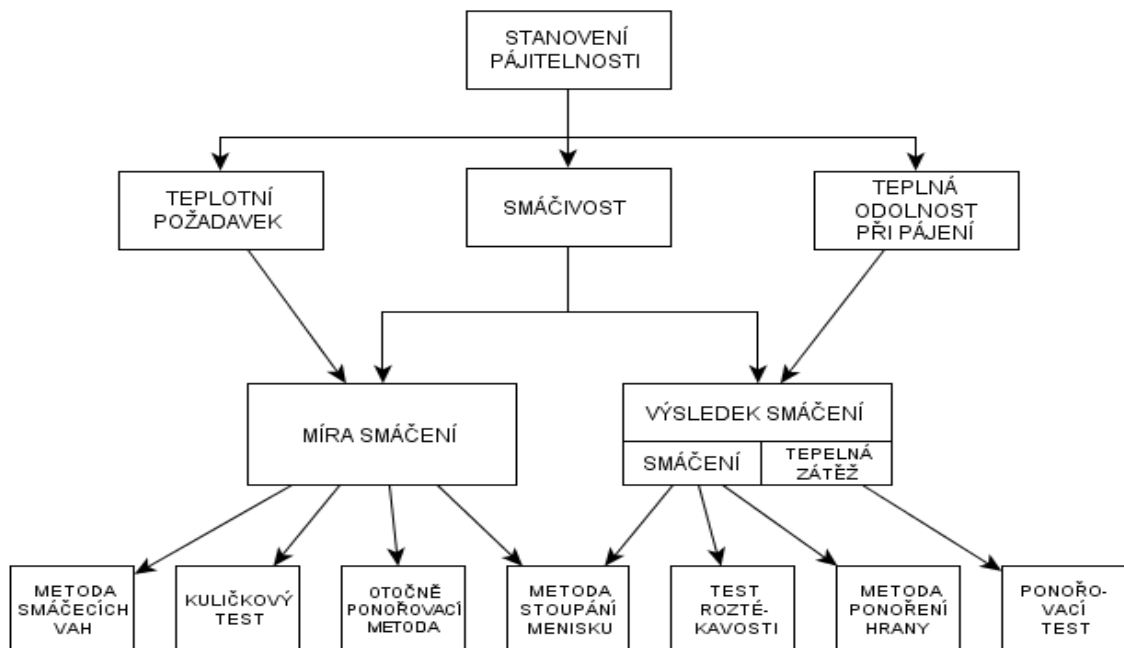
Byly vyvinuty mnohé metody testování pájitelnosti, které se zabývají vyhodnocením na úrovni kvalitativní i kvantitativní. Kvalitativní (vizuální) zkoušky jsou závislé na vizuálních kritériích (např. ponořovací test), zatím co kvantitativní zkoušky jsou založeny na měření skutečných fyzikálních vlastností při smáčení (např. metoda smáčecích vah). [1][5]

Podle druhu měření můžeme testování pájitelnosti rozdělit na: [5]

- Měření nerovnovážných situací, vyšetřující míru smáčení.
- Měření konečného výsledku smáčecího procesu, vyšetřující celkový stupeň dosažený smáčením

Testy, které se zabývají měřením míry smáčení, bývají většinou zdlouhavé a finančně náročné, ale za to poskytují velice přesný kvantitativní výsledek. Pro rychlejší stanovení pájitelnosti se volí testy vyšetřující celkový stupeň dosažený smáčením. Zde je přesnost výsledku snížena.

Na obr. 2.3 je znázorněn diagram rozdělení hlavních metod pro testování pájitelnosti.



Obr. 2.3 Diagram ukazující metody testování pájitelnosti [5]

### 2.2.1 Metoda smáčecích vah

Jedná se o nejuniverzálnější testovací metodu, vhodnou pro kvantitativní vyšetření vzorků libovolného tvaru. Lze ji využít k testování pájitelnosti vývodů součástek, substrátů i tavidel. Test je příznačný pro specializované laboratoře nebo velké firmy. Podmínky testu jsou stanoveny normami ČSN EN 60068-2-69, ČSN 34 5791-2-54, ČSN EN ISO 12224-3, ČSN EN ISO 9455-16, nebo normami IPC a MIL. [1][5]

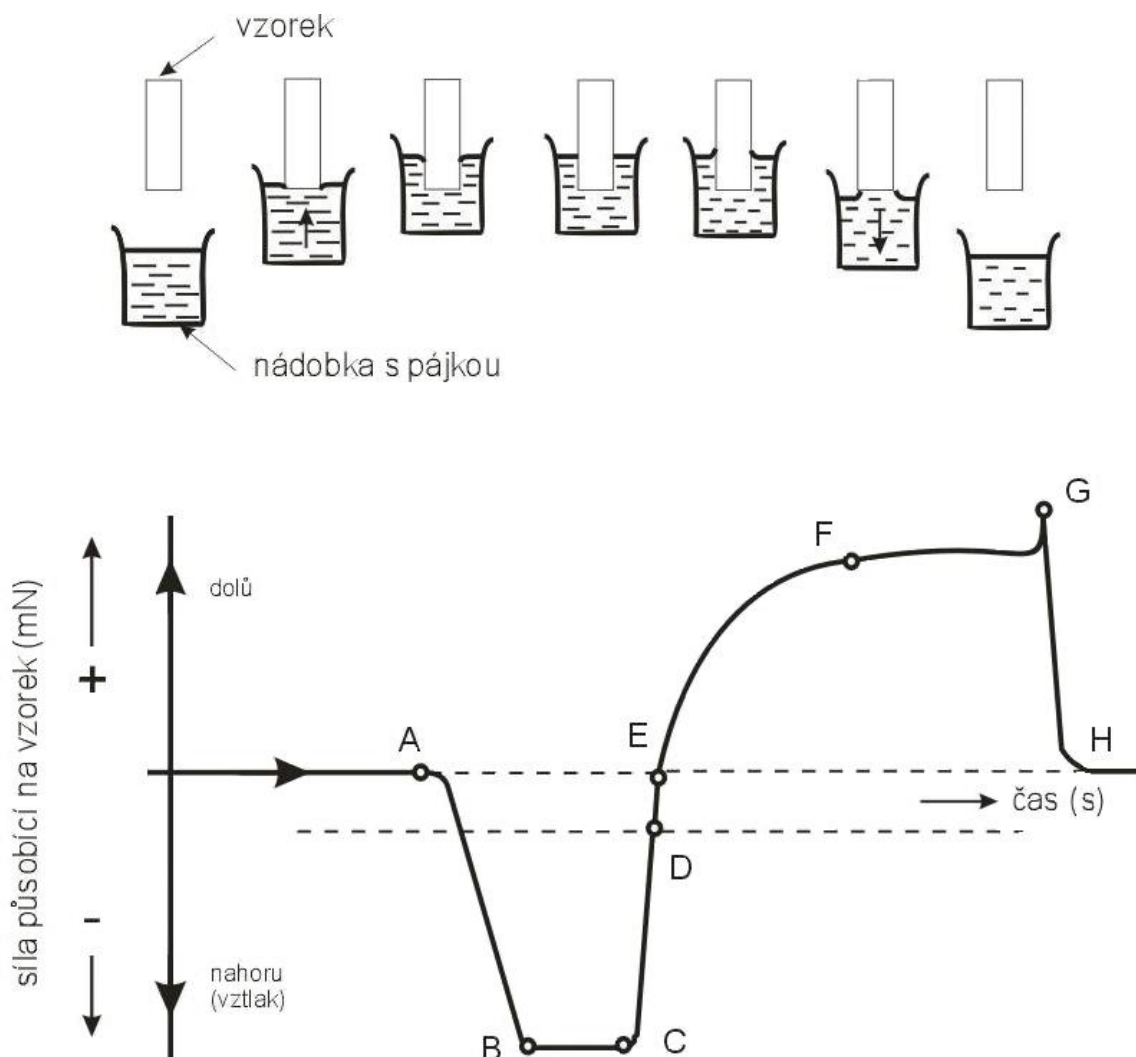
#### Princip metody smáčecích vah

Měřený vzorek je upevněn na citlivý siloměr, který je umístěn nad nádobou s roztavenou pájkou. Pomocí zdvihacího mechanismu s předem definovanou rychlostí se nádoba zvedne směrem k testovanému vzorku, který je následně ponořen do pájky. V pájce je po určitou dobu ponechán. Poté začne nádoba s pájecí lázní klesat a vzorek se vynoří.

Na ponořený vzorek působí vztlková síla a povrchové napětí tekutiny. Výslednice těchto sil je měřena siloměrem a poté převodníkem přeměněna na signál, který je zaznamenáván v závislosti na čase. [5]

Rychlost zdvihu a poklesu lze přes elektronické zařízení ovládat. Stejně tak lze nastavit i teplota pájky v nádobě.

V následujícím obrázku 2.4 je graficky znázorněn celý proces testu, spolu s výsledným grafem naměřené síly v závislosti na čase.



Obr. 2.4: Metoda smáčecích vah [1]

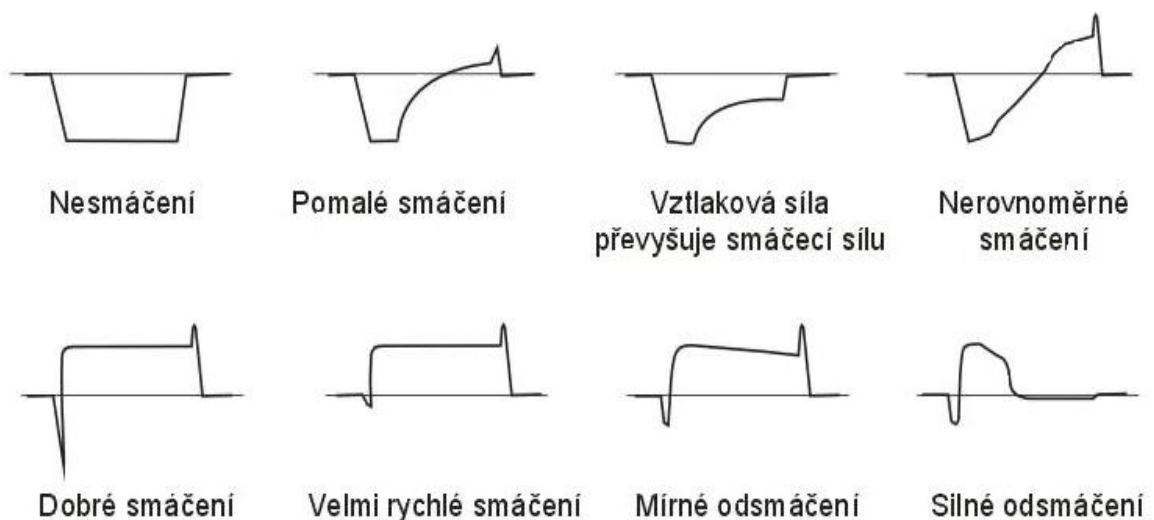
Bod A označuje prvotní kontakt vzorku s pájkou. Do této chvíle nepůsobí na vzorek žádná síla. Jelikož rozdílná teplota nepodporuje smáčení, musí být vzorek do pájky vtlačován silou, která je znázorněna mezi A a B. Sklon této křivky je dán rychlostí ponoření vzorku. Časový interval z B do C je úměrný rychlosti přesunu tepla mezi pájkou a vzorkem. V bodě C začíná být vzorek smáčen pájkou. Smáčení vzorku pájkou probíhá až

do bodu D, kde se vyrovná vztlaková síla a povrchové napětí. Zde je povrch pájky kolmý ke vzorku. Na vytažení vzorku z pájky musí být vynaložena síla, která je znázorněna od D do F. V bodě E jsou působící síly rovny nule. G pak naznačuje hranici, kdy je vzorek vytažen z pájecí lázně.

### Vyhodnocení metody

Výsledná křivka určuje úroveň pájitelnosti, která byla dosažena na měřeném vzorku. Pro vyhodnocení pájitelnosti se volí grafické porovnání průběhu sil působících na vzorek v závislosti na čase. [1]

Na obrázku 2.5 jsou jako příklad uvedeny typy průběhů časové závislosti smáčecí síly.



Obr. 2.5 Průběhy smáčecí síly v závislosti na čase [1]

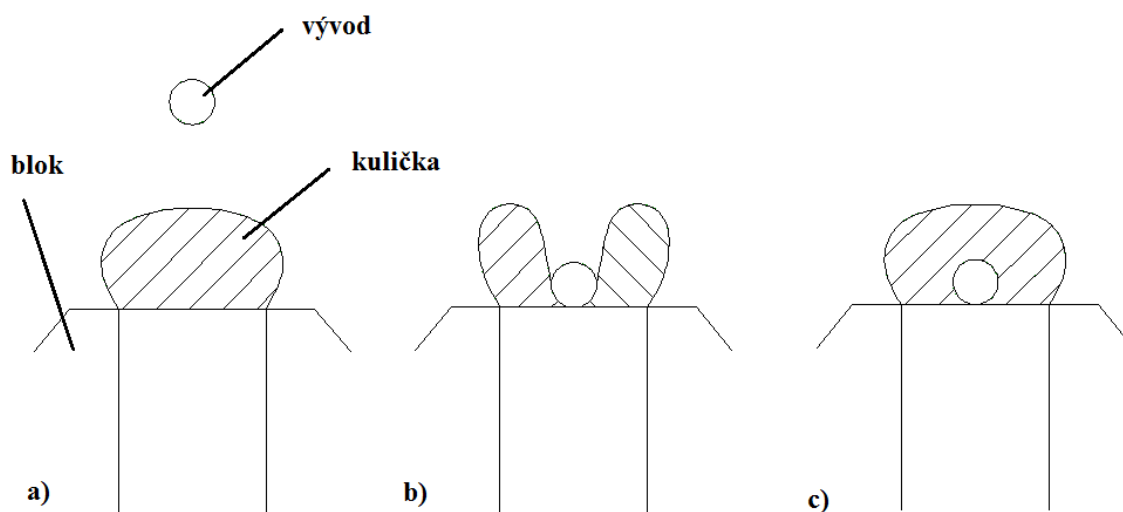
Metoda smáčecích vah se vyznačuje velmi dobrou přesností. Poskytuje detailní analýzu procesu smáčení, která je důležitá pro stanovení a řešení problému pájitelnosti součástek. Nevýhodou této metody může být ekonomická náročnost, jelikož celé zařízení potřebné k realizaci testu je poměrně drahé.

## 2.2.2 Kuličkový test

Je to nejstarší metoda navržená pro testování pájitelnosti vývodů součástek a pokovených otvorů (nejčastěji válcového průřezu). Jelikož metoda smáčecích vah pracuje na podobném principu a poskytuje přesnější výsledky, je tato metoda spíše určena pro rutinní vnitropodnikové testování referenčního významu. Podmínky testování jsou stanoveny v mezinárodních normách IEC. [5]

### Princip kuličkového testu

Vývod měřené součástky je horizontálně umístěn do středu roztavené kapky pájky. Tato kapka je umístěna na čepu zahřátého bloku (obr. 2.6a). Vývod kapku nejdříve rozdělí na dvě části (obr. 2.6b). Se zvyšujícím se smáčením se obě části kapky začnou k sobě přibližovat, až do chvíle kdy vývod obklopí a spojí se v celek (obr. 2.6c). Časová perioda mezi rozdělením a spojením kapky je pak měřena.



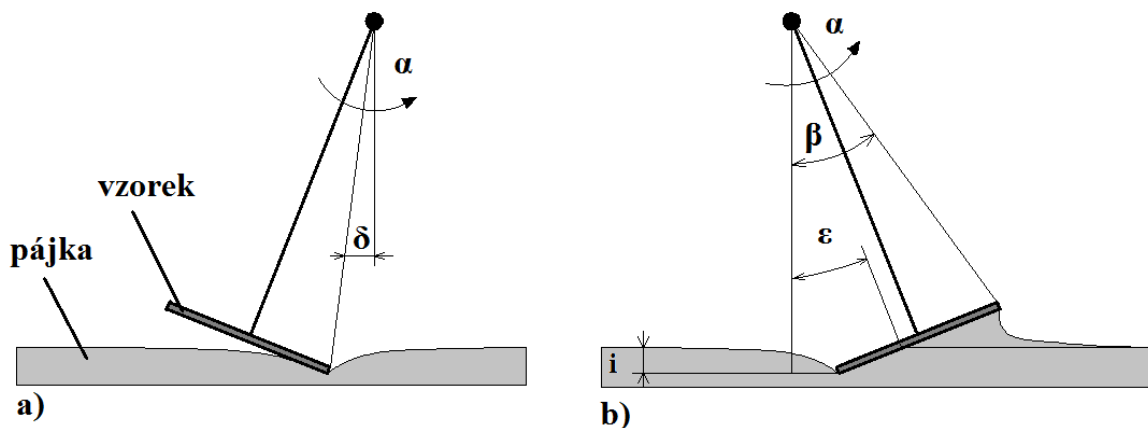
Obr. 2.6 Postup umístění vývodu při kuličkovém testu [5]

### 2.2.3 Otočně ponořovací metoda

Tento test je určen pro měření pájitelnosti rovných povrchů (např. desky plošných spojů), který emuluje technologický proces pájení vlnou. Zařízení, které je určeno pro toto měření se nazývá TRI-Moore tester. Metoda byla standardizována IEC. [5][7]

#### Princip otočně ponořovací metody

Vzorek je připevněn na otočné rameno, které vytváří horizontální rotační pohyb. Rotační pohyb ramena se vzorkem nahrazuje relativní pohyb pájky při procesu pájení vlnou. Během otáčení je vzorek ponořen na určitý čas do pájecí lázně (Obr. 2.7). Časový interval kontaktu vzorku s pájkou lze měnit nastavením délky ramene, změnou rychlosti otáčení ramene a přerušením otáčení ramene v době kontaktu vzorku s pájkou. [5][7]



Obr. 2.7 Rotační pohyb ramene otočně ponořovací metody (zleva doprava), kde  $\alpha$  znázorňuje směr, celkový opsaný oblouk je dán vztahem  $\delta + \beta$ , zatímco úhel opsaný jehlou je  $2\epsilon$ . Proto jmenovitá časová perioda je dána podílem  $\delta + \beta$  a  $2\epsilon$  [5]

Po dokončení testu je pájitelnost vzorku vizuálně vyhodnocena. Jmenovitá časová perioda kontaktu pájky a vzorku je měřena pomocí jehly, která opisuje stejnou trajektorii jako samotný vzorek. Aby jehla neovlivňovala pájecí proces, je vytvořena z nesmáčivého materiálu a umístěna v dostatečné vzdálenosti od měřeného vzorku. [5]

## 2.2.4 Metoda stoupání menisku

### Princip metody stoupání menisku

Upevněný vzorek vývodu je vertikálně ponořen do pájecí lázně. V průběhu smáčení, začne pájka stoupat po vývodu. Vzestup pájky (menisku) po okraji vývodu je pak v předem stanoveném čase měřen mikroskopem. Z výšky nárůstu menisku lze matematicky vypočítat kontaktní úhel  $\theta$ , kde hodnota  $\theta$  je rovna určité úrovni smáčení [5].

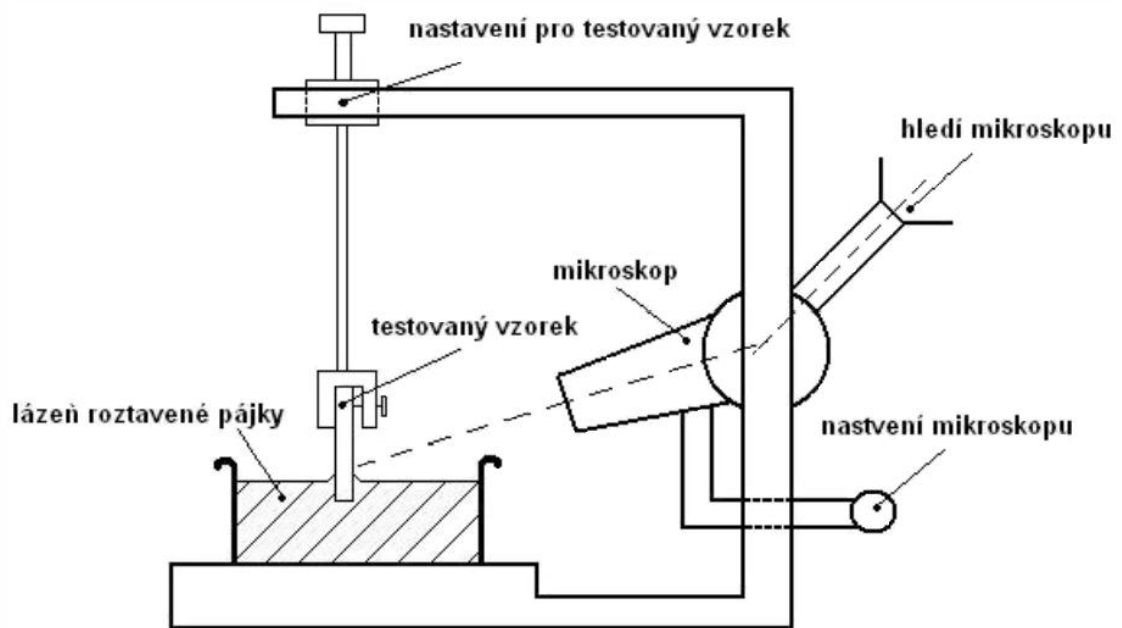
Například pro vzorek ponořený po dobu 4 vteřin do roztavené pájky byly podle kontaktního úhlu navrženy tyto úrovni smáčení:

$0^\circ < \theta < 10^\circ$	dokonalé
$10^\circ < \theta < 20^\circ$	výborné
$20^\circ < \theta < 30^\circ$	velmi dobré
$30^\circ < \theta < 40^\circ$	dobré
$40^\circ < \theta < 55^\circ$	postačující
$55^\circ < \theta < 70^\circ$	špatné
$70^\circ < \theta$	velmi špatné

Nárůst menisku a kontaktní úhel mohou být také měřeny laserem, kde laserový paprsek směřuje na kapalinu pájky v blízkosti ponořeného vývodu a následně je odražen v závislosti na elevaci pájené plochy v daném místě [5].

Zařízení, které je určeno pro realizaci měření se nazývá meniskometr (obr. 2.8).





Obr. 2.8 Meniskometr [5]

### 2.2.5 Test roztékavosti

Test roztékavosti se často využívá jak v laboratoři, tak i ve výrobě. Poskytuje snadnou a rychlou představu o pájitelnosti základního kovu a pájecí slitiny. Mimo jiné se dá využít i k měření aktivity tavidel [1][5].

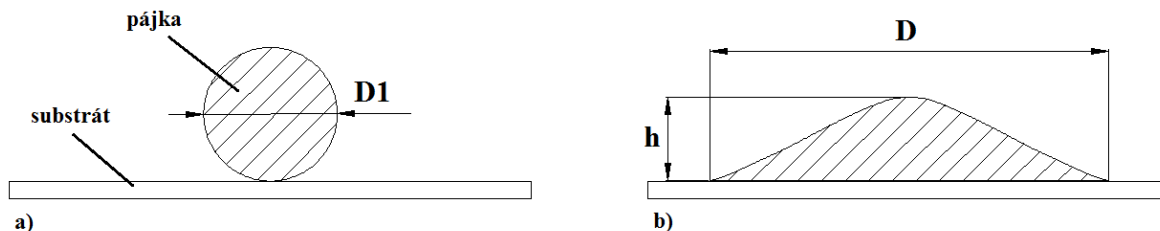
#### Princip testu roztékavosti

Předem definované množství pájky o průměru  $D$  je umístěno na substrát (obr. 2.9a), kde se po zahřátí na teplotu tavení pájka rozteče (obr. 2.9b). Velikost plochy vytvořené rozteklou pájkou závisí na typu použitého tavidla, druhu slitiny a povrchové úpravy substrátu. K určení kontaktního úhlu se pak odečítá výška a šířka roztavené pájky. [1][5]

Výsledek testu bývá také často vyjádřen jako faktor šíření  $S$  (2). Za předpokladu, že parametr  $h$  je výška a parametr  $D$  je průměr hypotetické koule vycházející z rozteklé pájky. [5]

$$S = \frac{D-h}{D} 100\% \quad (2)$$

Z důvodu snížení složitosti, některé normy (MIL) dávají přednost vyhodnocení pouze z naměřené výšky  $h$  [1].

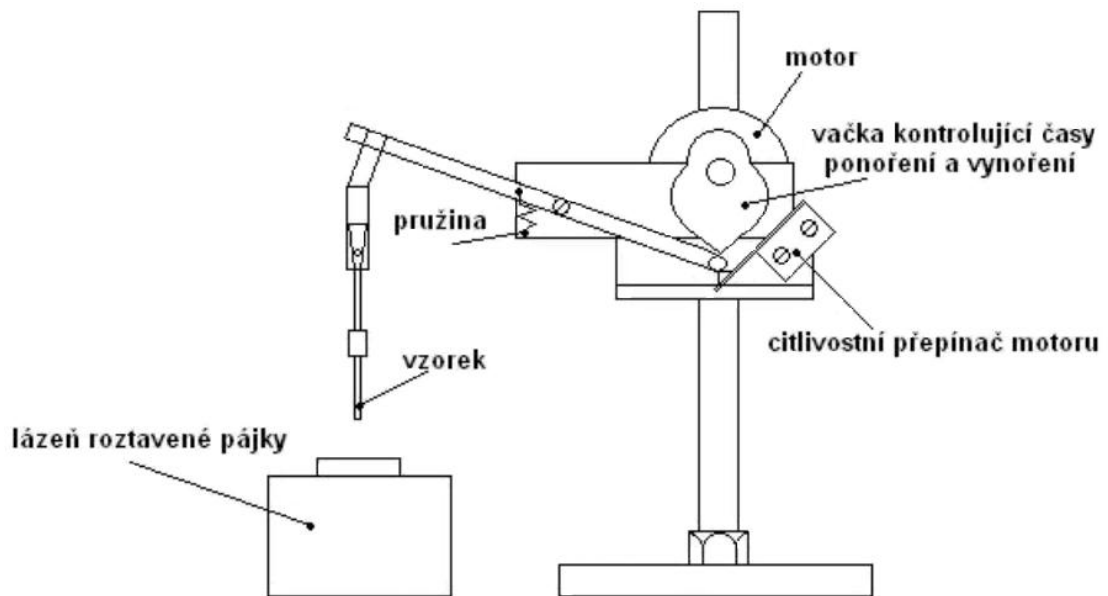


Obr. 2.9 Test roztékavosti [1]

### 2.2.6 Ponořovací metody

Jedná se o nejjednodušší a nejrychlejší metody pro zjištění pájitelnosti součástek. Obě metody (metoda ponoření hrany, ponořovací test) pracují na stejném principu, který spočívá v ponoření vzorku do pájecí lázně po určitý časový interval. Po vytažení vzorku z lázně se dosažená úroveň pájitelnosti vyhodnotí pouze vizuálně [1][5]. Podle obr. 2.3, který je uveden výše, se metoda ponoření hrany zaměřuje na výsledek smáčení, zatímco ponořovací test se zabývá tepelnou zátěží [5].

Oba testy lze realizovat v principu ručně, ale dává se přednost jednoduchému ponořovacímu zařízení, který je zobrazen na obr. 2.10. Výhodou tohoto zařízení je možnost přesného měření časového intervalu spolu s nastavením rychlosti ponoru. [5]



Obr. 2.10 Zařízení pro ponořovací test [5]

Nevýhodou těchto metod je nízká přesnost, a to z důvodu vizuálního vyhodnocení, které vychází ze zkušenosti operátora a závisí na subjektivní interpretaci výsledku. [1]

### 3 Teorie návrhu experimentů

Navrhování a tvorba experimentů je potřebná ve všech odvětvích lidského bádání. Své uplatnění najde v disciplínách technických, biologických, lékařských, ale i v přírodovědeckých nebo ekonomických. Cílem experimentu je získat na menším počtu vzorků dostatečnou informaci o sledovaném ději nebo jevu tak, aby bylo možné s určitou pravděpodobností rozhodnout např. o výrobě, léčbě či jiné činnosti [8].

Předmětem experimentu je zkoumání vlastností tzv. základního souboru. Tento soubor může obsahovat velké množství prvků a jeho celkové zkoumání by mohlo být značně časově i ekonomicky nákladné, často i nemožné. Proto se používá většinou výběrový soubor, který obsahuje  $n$  prvků ze základního souboru. Podmínkou výběru prvků ze základního do výběrového souboru je jejich dostatečná reprezentativnost, která se zabezpečuje tzv. náhodným nebo záměrným výběrem [8].

#### 3.1 Tvorba experimentů

Experiment je souhrn pokusů, kterými vyšetřujeme sledovaný jev či děj. Jeho cílem je získání maximálního množství informací, při minimalizaci nákladů na jeho tvorbu.

Dělení experimentů:

##### Pasivní experiment

Objektem zkoumání je proces, který probíhá samovolně, bez jakéhokoliv ovlivnění experimentátorem. Tento typ experimentu je příznačný v astronomii, sociálních vědách apod. [8].

##### Aktivní experiment

Na rozdíl od pasivního experimentu, zde experimentátor aktivně zasahuje do sledovaného procesu. Výhodou je, že po dosažení výsledků může upravovat a tím i řídit celý experiment (např. v biologii, v medicíně apod.) [8].

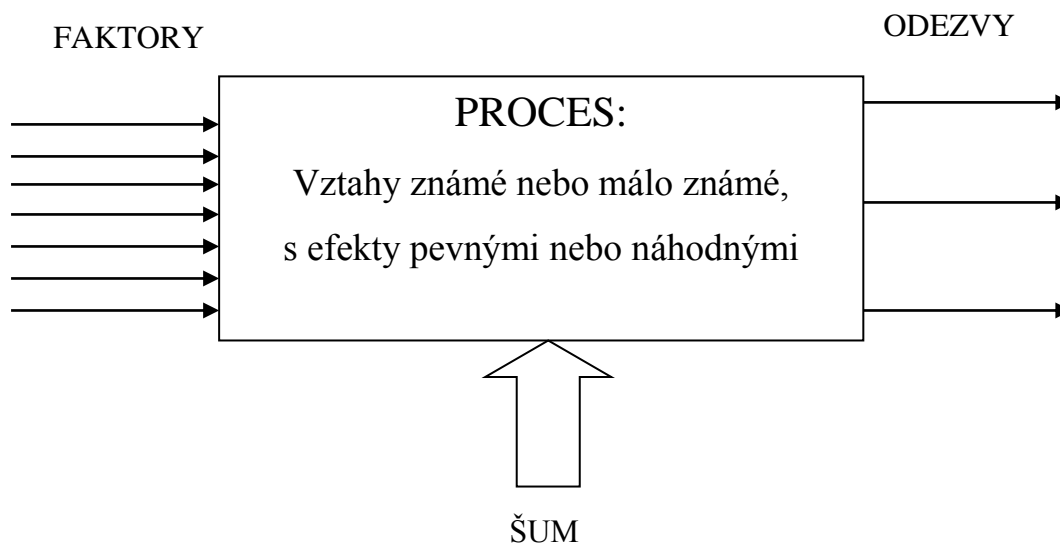
##### Sekvenční experiment

Tento experiment je prováděn postupně. Délka trvání experimentu není předem určená a volí se podle výsledku jednotlivých dílčích pokusů [8].

### Extrémní experiment

Extrémním experimentem se hledají optimální podmínky vzhledem k extrému sledované vlastnosti (např. minimální čas výroby, maximální produkce, minimální ztráty apod.). [8]

Model měřeného systému, jenž je zobrazen na obr. 3.1, představuje celý proces experimentu. Do tohoto procesu vstupují veličiny a vlivy, které označujeme jako faktory ovlivňující charakter experimentu. Tyto faktory jsou regulovatelné a kontrolovatelné (v průběhu experimentu je lze nastavit a udržovat na určitých úrovních). Mezi další vstupní faktor ovlivňující vlivy patří také šumy. Šumové faktory jsou nežádoucí a mohou zkreslit údaje o účincích těch veličin, které byly při pokusu důležité. Proto je nutné tyto vedlejší nežádoucí účinky eliminovat. Výsledek, který z procesu vystupuje, je veličina přímo nebo nepřímo měřitelná. Obecně se nazývá odezva. [8]



Obr. 3.1 Model měřeného systému [8]

## 3.2 Technika plánování experimentu

Plánem experimentu se rozumí stanovení počtu faktorů a jejich kombinací. Kombinace úrovní experimentálních faktorů představují jeden pokus. Návrh experimentu je tvořen vhodně zvoleným počtem faktorů a jejich uspořádáním. A při realizaci se provede předem stanovený počet pokusů, přičemž se u každého změří odezva. [8]

Postup celkového vytváření experimentu můžeme rozdělit do několika na sebe navazujících činností: [8]

- a) Plánování experimentu.
- b) Návrh experimentu.
- c) Provedení experimentu za předepsaných podmínek
- d) Zhodnocení výsledků
- e) Závěr, aplikace výsledků

### *Ad a) Plánování experimentu*

Plánování experimentu je jeden z nejdůležitějších kroků, protože špatným naplánováním experimentu, např. vynecháním některého faktoru nebo vzájemného vztahu se v závěru celý experiment stává bezcenným. Jako první aspekt je určení cíle experimentu, stanovení definice problému. Dále je vhodné shromáždit všechny existující informace o objektu zájmu a podle požadavků na experiment identifikovat faktory, které chceme vyhodnotit.

### *Ad b) Návrh experimentu*

V této fázi návrhu se vybere určité množství faktorů, ve správné kombinaci. Výběr proběhne s ohledem na omezení, která vznikají u každého experimentu. Jsou to:

- Časová omezení – při velkém počtu faktorů je nutné provést velké množství experimentů
- Ekonomická omezení – vznikají při velkém počtu faktorů
- Procesní omezení – samostatný proces neumožní nastavit jednotlivé úrovně faktorů na hodnoty, které byly pro experiment naplánovány
- Proměnlivost výsledků – i při správně zvolených faktorech, získáme odlišné výsledky, je potřeba provést replikace experimentu

V zájmu zvýšení přesnosti měření je vhodné opakované měření téže veličiny za stejných podmínek. Těsnost shody mezi po sobě jdoucími naměřenými výsledky pak zajistí dostatečnou přesnost.

***Ad c) Provedení experiment za předepsaných podmínek***

Experiment se může provádět v laboratořích, provozních podmínkách a v nahodilém prostředí, aby byl vyloučen systematický vliv (např. únava materiálu, apod.). Na experiment působí časové změny ovlivňující výsledek, proto by měl být experiment prováděn v co nejkratším čase.

***Ad d) a e) Zhodnocení, závěr a aplikace výsledků***

Poslední fáze experimentu slouží k nalezení takové kombinace faktorů, která dává nejlepší výsledek. Z výsledku pak lze získat jak důležité závěry, tak i další otázky, které mohou být podnětem pro vytvoření dalšího experimentu.

## 4 Experiment pro měření pájitelnosti pomocí MUST SYSTEM II

Experiment pro měření pájitelnosti byl realizován metodou smáčekcích vah (viz. podkapitola 2.2.1), za pomoci testeru pájitelnosti MUST SYSTEM II.



Obr. 4.1 Tester pájitelnosti Concoat MUST SYSTEM II [2]

Experiment můžeme rozdělit na dvě části. V první části byly pro testování pájitelnosti zvoleny dva druhy drátových vývodů, kde u každého byla aplikována různě aktivovaná tavidla. Zatímco v druhé části byly zvoleny stejné druhy vývodů, které ovšem byly podrobeny zrychlenému stárnutí v peci.

Cílem experimentu bylo změřit a posoudit pájitelnosti těchto vývodů v závislosti na změně tavidel a stárnutí materiálu.

### 4.1 Drátové vývody

Pro testování byly zvoleny válcové drátové vývody o délce 2,5mm a průměru 0,8mm. Materiál vývodů se lišil v povrchové úpravě. Byly zvoleny dvě povrchové úpravy: čistá měď a galvanicky nanesený cín.



## 4.2 Tavidla

Na drátové vývody byla těsně před samotným testem aplikována tavidla SM/NA, ACTIEC 2 a ACTIEC 5.

### SM/NA

Tavidlo SM/NA je neaktivované tekuté tavidlo s obsahem 25 % roztoku kalafuny v 2-propanolu [2].

Tab. 4.1 Vlastnosti tavidla SM/NA[2]

Specifická hustota při 20°C	0,844 g/cm <sup>3</sup>
Obsah sušiny	25+/- 0,5%
Obsah halogenidu	0
Bod varu rozpouštědla	82 °C
Mezní hodnota rozpouštědla	400ppm
Bod vzplanutí rozpouštědla	12 °C

### ACTIEC 2

Tavidlo ACTIEC 2 je aktivní tekuté tavidlo s halogenidovým obsahem sušiny ve výši 0,2 % v 25 % roztoku kalafuny v 2-propanolu, aktivované chloridem diethylamonným [2].

Tab. 4.2 Vlastnosti tavidla ACTIEC 2 [2]

Specifická hustota při 20°C	0,844 g/cm <sup>3</sup>
Obsah sušiny	25+/- 0,5%
Obsah halogenidu	0,2% v sušinách
Bod varu rozpouštědla	82 °C
Mezní hodnota rozpouštědla	400ppm
Bod vzplanutí rozpouštědla	12 °C

### ACTIEC 5

Tavidlo ACTIEC 5 je aktivní tekuté tavidlo s halogenidovým obsahem sušiny ve výši 0,5 % v 25 % roztoku kalafuny v 2-propanolu, aktivované chloridem diethylamonným [2].

Tab. 4.2 Vlastnosti tavidla ACTIEC 5 [2]

Specifická hustota při 20°C	0,844 g/cm <sup>3</sup>
Obsah sušiny	25+/- 0,5%
Obsah halogenidu	0,5% v sušinách
Bod varu rozpouštědla	82 °C
Mezní hodnota rozpouštědla	400ppm
Bod vzplanutí rozpouštědla	12 °C

### 4.3 Stárnutí

Stárnutí je samovolný proces, kde materiál podléhá fyzikálním i chemickým změnám v čase, vlivem molekulární nestability. Stárnutí materiálů ovlivňuje zvláště světlo, teplo, mechanické a atmosférické vlivy, koroze apod.

Za účelem simulace dlouhodobého stárnutí materiálů např. při skladování, byly v druhé části měření oba typy vývodů umístěny do horkovzdušné pece po dobu čtyř hodin při teplotě 150 °C. Zvýšením teploty působící na materiál se stárnutí urychlilo.

### 4.4 Nastavení testeru

Pomocí softwarové podpory testeru MUST SYSTEM II. byly v souladu s normou IPC - J – STD – 002C nastaveny tyto parametry pro měření:

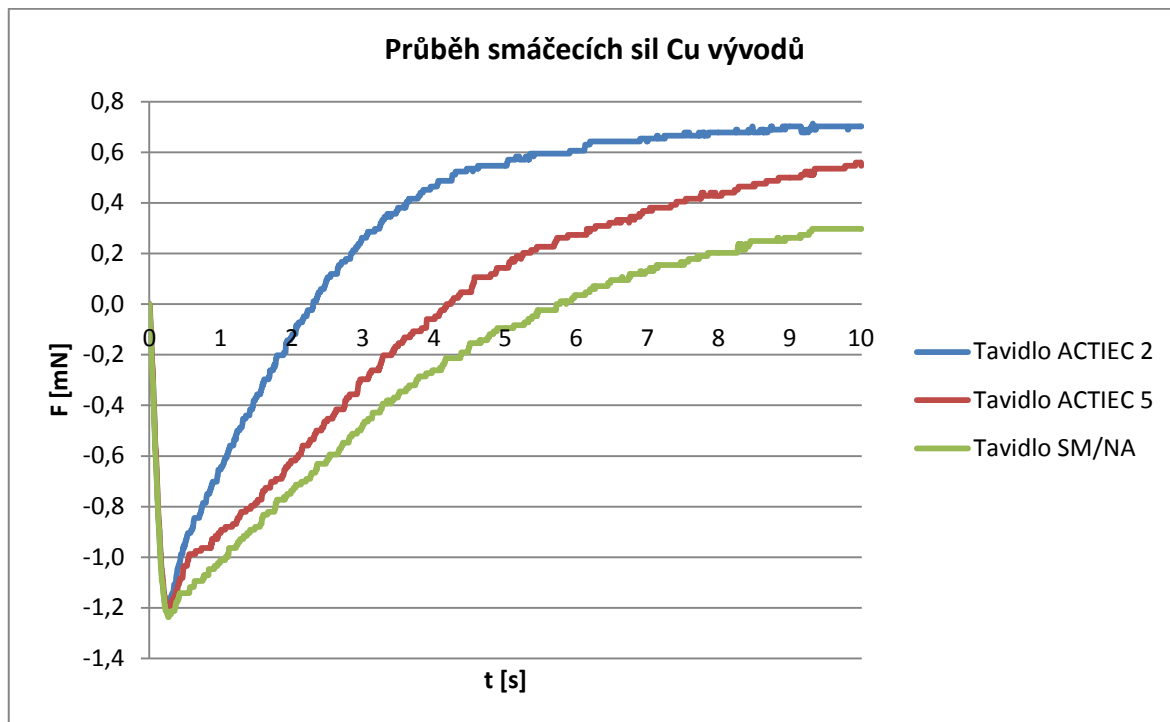
Hloubka ponoru vývodu do pájecí lázně:	3 mm
Ponořovací rychlost	20 mm/sec
Vytahovací rychlost	10 mm/sec
Doba testu	10 sec
Teplota pájky	245 °C

Jako pájecí slitina byla použita pájka SAC 305 se složením Sn96,5Ag3,0Cu0,5.

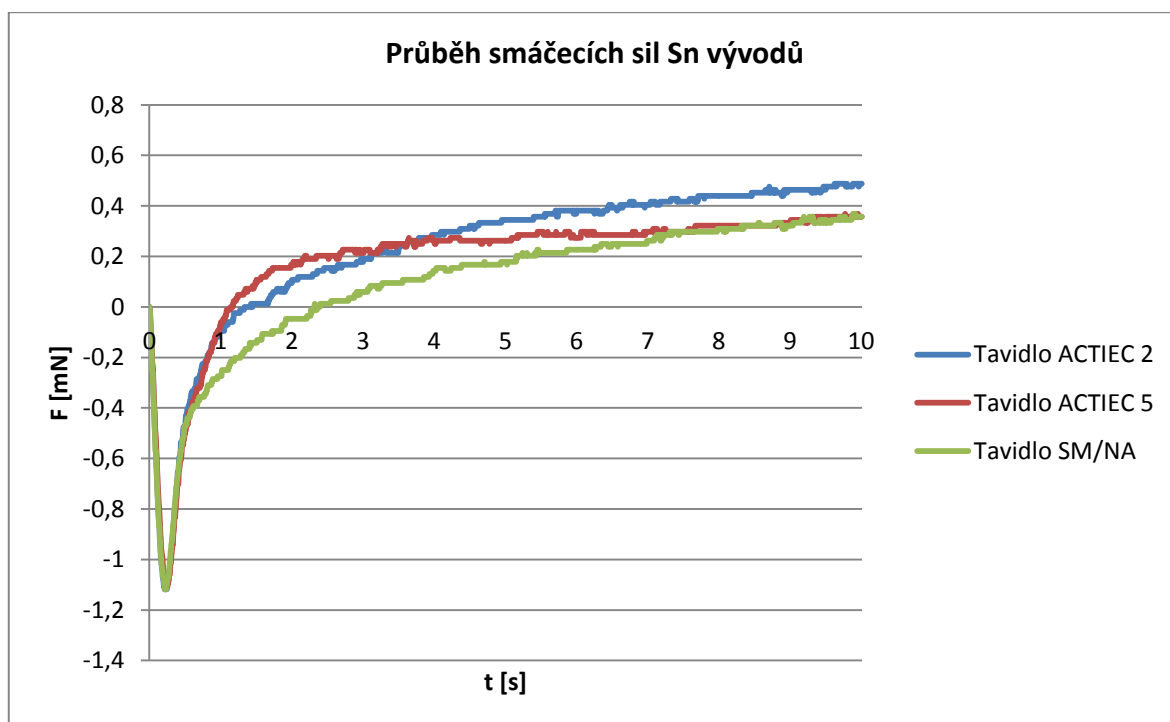
### 4.5 Měření pájitelnosti

Měření bylo realizováno metodou smáčecích vah, která je popsána v podkapitole 2.2.1. Pro každý vzorek bylo jednotlivé měření pětkrát opakováno a následný výsledek byl stanoven aritmetickým průměrem, z důvodu snížení chybové odchylky.

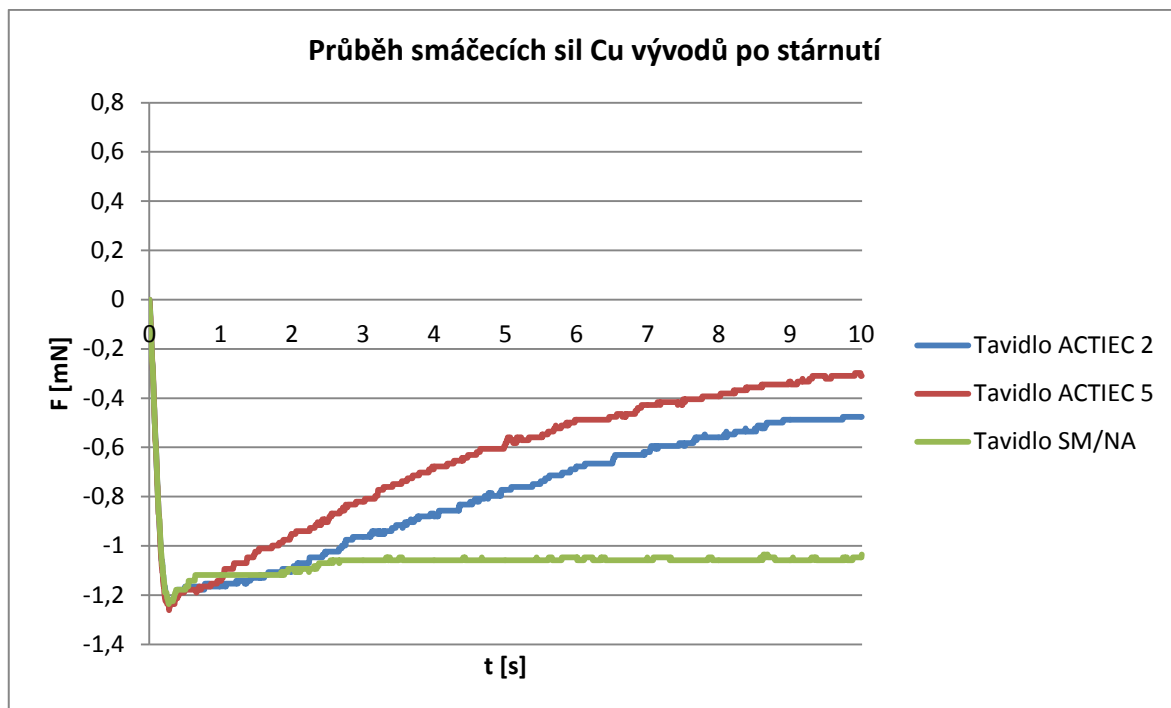
Naměřené hodnoty



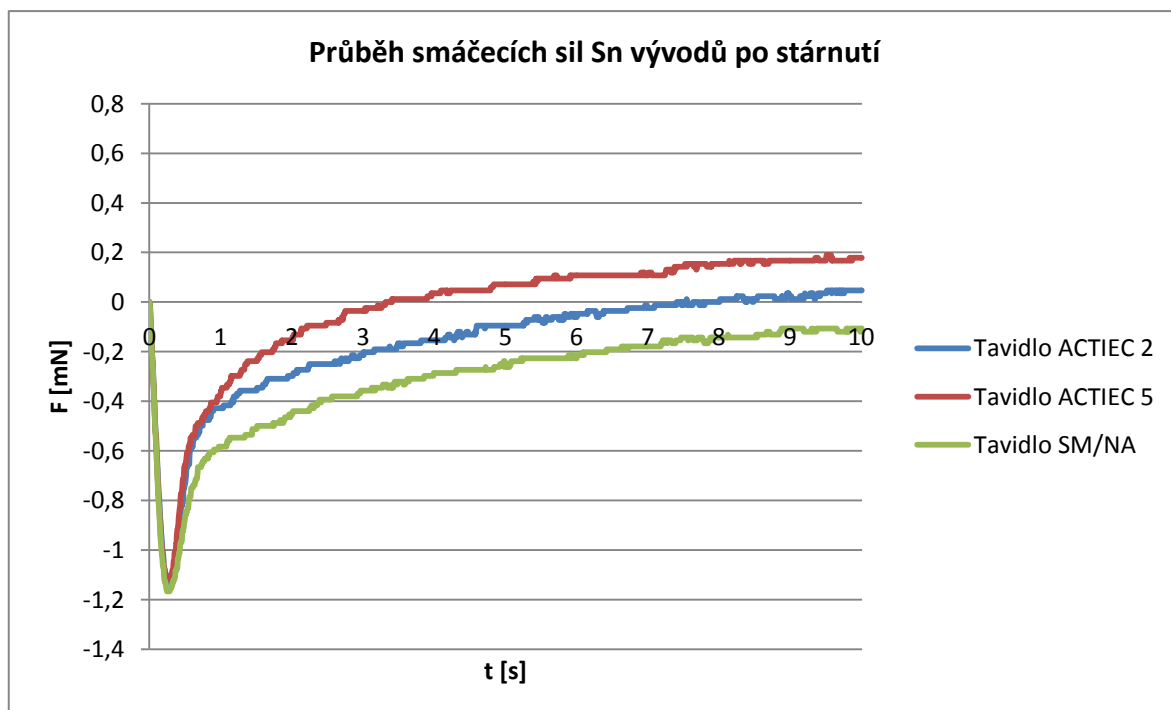
Obr. 4.2 Průběh smáčecích sil měděných vývodů



Obr. 4.3 Průběh smáčecích sil pocínovaných vývodů



Obr. 4.4 Průběh smáčecích sil měděných vývodů po stárnutí



Obr. 4.5 Průběh smáčecích sil pocínovaných vývodů po stárnutí

## 5 Zhodnocení a porovnání výsledků

Byly porovnány časové intervaly v bodech, kdy součet působící vztlakové a smáčecí síly byl nulový. Tedy  $F=0$  mN, a to v závislosti na změně tavidel a typu vývodů.

Z naměřených dat, které jsou znázorněny na obrázku 4.2 vyplývá, že u měděných drátových vývodů bylo po aplikaci tavidla ACTIEC 2 dosaženo nejlepší pájitelnosti, a to v době 2,25 vteřin po kontaktu s hladinou pájecí lázně. Nejhorší pájitelnost pak byla u vzorku s aplikací tavidla SM/NA, kde se vertikální síly vyrovnaly až v 5,75 vteřině.

U měření pájitelnosti pocínovaných vývodů bylo nejlepší pájitelnosti dosaženo s aplikací tavidla ACTIEC 5 v době 1,3 vteřiny. Horší pájitelnost pak vykazovala tavidla ACTIEC 2 a SM/NA. U tavidla SM/NA byla pájitelnost nejhorší, jak můžeme vidět na obrázku 4.3.

Z obrázku 4.4 je na první pohled zřejmé, že u mědi docházelo k velice pomalému smáčení vývodů pájkou u všech použitých tavidel. Během celého měření, tedy po dobu 10 vteřin, nedošlo k vyrovnání vertikálních sil.

U měření pájitelnosti pocínovaných vývodů po stárnutí (obrázek 4.5), bylo nejpříznivějšího výsledku dosaženo s aplikací tavidla ACTIEC 5 ale až po 3,4 vteřinách. Nejhorší pájitelnost vykazovaly vývody s aplikací tavidla SM/NA, kde do 10 vteřin nedošlo k vyrovnání vertikálních sil.

## Závěr

Cílem bakalářské práce bylo podat přehled o metodách testování pájitelnosti, dále pak navrhnout a realizovat experiment pro měření pájitelnosti pomocí testeru MUST SYSTEM II. Získané výsledky tohoto experimentu vedou k následujícím závěrům.

Z hlediska materiálů bylo nejlepší pájitelnosti dosaženo u pocínovaných vývodů, a to i u vývodů, které byly podrobeny stárnutí. Je to způsobeno samotným prvkem cínu, který při pájení nejlépe podporuje smáčení.

Oproti pocínovaným vývodům byl u měděných vývodů zaznamenán výrazný vliv při aplikaci různých druhů tavidel na změnu pájitelnosti. Nejlepší pájitelnosti bylo dosaženo při aplikaci středně aktivního tavidla ACTIEC 2. Zatímco u pocínovaných vývodů byl vliv tavidel na pájitelnost vývodů téměř srovnatelný.

Z toho lze vyvodit, že vhodnější je použít u pocínovaných vývodů chemicky šetrnější, méně aktivní tavidlo, protože rozdíl pájitelnosti je zde minimální.

Stárnutí materiálu velice nepříznivě působilo na testované vzorky. U měděných vývodů po stárnutí byla pájitelnost nejhorší. V časovém intervalu deseti vteřin nebyly působící síly vyrovnány. To znamená, že při ručním nebo strojním pájení by nedošlo k vytvoření spoje a při delší době vedení tepla na spoj, by mohlo dojít k tepelné destrukci součástek na desce plošného spoje. Takto časově degradovaný materiál by mohl být označen jako nesmáčivý. Pocínované vývody po stárnutí vykazovaly lepší pájitelnosti než je to u vývodů měděných. Nejvýrazněji za aplikace více aktivního tavidla ACTIEC 5. Vertikální síly se zde vyrovnaly po třech vteřinách. U méně aktivních tavidel typu ACTIEC 2 a SM/NA docházelo k pomalému smáčení, vyrovnání působících sil bylo dosaženo až po osmi vteřinách.

Z výše uvedených výsledků tedy vyplývá, že tavidla mají zásadní vliv na pájitelnost, zejména na materiály s horší smáčivostí způsobenou stárnutím.

## Použitá literatura

- [1] ABEL, Martin. Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi. 1. vyd. Pardubice: ABE.TEC, 2005, 179 s. ISBN 80-903-5970-1.
- [2] Solderability Test System for Surface Mount and Conventional Components  
MUST II - USER MANUAL, CONCOAT SYSTEMS 2004
- [3] PECHT, Michael. Soldering processes and equipment. New York: Wiley, c1993, 296 s. ISBN 04-715-9167-X.
- [4] MACH, P. Montáž v elektrotechnice. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2001, 440 s. ISBN 8001023923.
- [5] WASSINK, R.J. Klein. Soldering in electronics: a comprehensive treatise on soldering technology for surface mounting and through-hole techniques. 2nd ed. Ayr, Scotland: Electrochemical Publications, 1989. ISBN 09-011-5024-X.
- [6] Youngova rovnice [online]. [cit. 2012-04-16]. Dostupné z:  
[http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_es-001/hesla/youngova\\_rovnice.html](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/youngova_rovnice.html)
- [7] LAU, John H. Solder joint reliability: theory and applications. New York: Van Nostrand Reinhold, c1991, 631 s. ISBN 04-420-0260-2.
- [8] TŮMOVÁ, Olga. Metrologie a hodnocení procesů. 1. vyd. Praha: BEN technická literatura, 2009, 231 s. ISBN 978-80-7300-249-7.
- [9] BATAVEC, Ladislav. Tavidla pro bezolovnaté pájení. Plzeň, 2005. 30 s. Bakalářská práce. ZČU FEL.