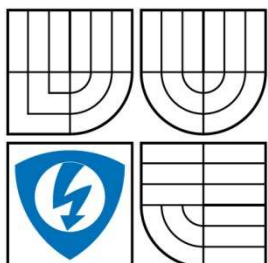


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

# HODNOCENÍ MATERIÁLOVÝCH A PROCESNÍCH FAKTORŮ NA DPS METODOU SMÁČECÍCH VAH

WETTING BALANCE METHOD - EVALUATION OF PCB MATERIAL AND PROCESS FACTORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. TOMÁŠ CHLOUPEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ STARÝ, Ph.D.

BRNO 2009

# Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Tomáš Chloupek  
Bytem: Rerychova 12, Brno, 63500  
Narozen/a (datum a místo): 9. 8. 1984, Brno

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
Prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Hodnocení materiálových a procesních faktorů na DPS  
metodou smáčecích vah

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Datum obhajoby VŠKP: 10. 6. 2009

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě – počet exemplářů 2
- elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 29. 5. 2009

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## Abstrakt:

Tato práce se zabývá problematikou smáčecích sil při pájení. Hodnotí materiálové a procesní vlivy na průběhy smáčecích sil. Cílem je nastavení technologických operací vedoucí k maximální kvalitě pájeného spoje. Náplní praktické části je měření a vyhodnocení různých procesních a materiálových faktorů, které ovlivňují smáčecí proces. Výstupem je vyhodnocení těchto veličin.

## Abstract:

This work deals with issues of the wetting forces during soldering and evaluates material and procedural effects on the soldering process. The aim is to set the technology operations to get best quality of soldered joints. The content of the practical part is measuring and comparing different material and process factors. These parameters affects the wetting process. The output is to rate these variables.

## Klíčová slova:

Meniskograf, smáčecí síla, pájecí slitina, tavidlo, deska plošného spoje, předehřev, spolehlivost.

## Keywords:

Meniscograph, wetting force, soldering alloy, flux, printed circuit board, preheating, reliability.

## Bibliografická citace díla:

CHLOUPEK, T. *Hodnocení materiálových a procesních faktorů na DPS metodou smáčecích vah*. Brno, 2009. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D. FEKT VUT v Brně

## Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. 5. 2009

.....

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu této diplomové práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na zadání a naplnění této diplomové práce.

# Obsah

Seznam obrázků .....	9
Úvod.....	10
1. Teoretický úvod .....	12
1.1. Pájky .....	12
1.1.1. <i>Legislativa a požadavky na pájecí slitinu</i> .....	12
1.1.2. <i>Bezolovnaté pájecí slitiny SAC 305 a SNI00C, SNI00CP</i> .....	12
1.2. Tavidla .....	14
1.2.1. <i>Funkce tavidel</i> .....	14
1.2.2. <i>Klasifikace tavidel</i> .....	15
1.2.3. <i>Tavidla</i> .....	15
1.3. Substrát FR4.....	16
1.4. Povrchové úpravy pájecích ploch .....	17
1.5. Proces pájení .....	17
1.5.1. <i>Pájení</i> .....	17
1.5.2. <i>Pájitelnost</i> .....	18
1.5.3. <i>Smáčení povrchů</i> .....	19
1.6. Metoda smáčecích vah.....	20
1.6.1. <i>Meniskograf</i> .....	20
1.6.2. <i>Působení smáčecích sil</i> .....	21
1.6.3. <i>Korekce na vztlak</i> .....	23
1.6.4. <i>Průběh křivky rovnováhy smáčení</i> .....	24
2. Měření a zpracování výsledků .....	29
2.1. Vyhodnocení různých povrchových úprav DPS.....	29
2.1.1. <i>Cíl měření různých povrchových úprav DPS</i> .....	29
2.1.2. <i>Parametry měření</i> .....	29
2.1.3. <i>Použité vzorky DPS</i> .....	29
2.1.4. <i>Výsledky smáčivosti různých povrchových úprav</i> .....	29
2.1.5. <i>Zhodnocení výšky nastoupání pájky</i> .....	31
2.2. Vyhodnocení vlivu předmontážního čisticího prostředku.....	32

2.2.1.	<i>Výběr čisticích prostředků</i> .....	32
2.2.2.	<i>Vyhodnocení výsledků měření</i> .....	33
2.2.3.	<i>Zhodnocení výšky nastoupaní pájky</i> .....	37
2.3.	Posouzení vlivu VOC a VOC free tavidla na smáčivost .....	39
2.3.1.	<i>Příprava vzorků</i> .....	39
2.3.2.	<i>Vyhodnocení výsledků měření</i> .....	40
2.4.	Sledování vlivu přehřevu na smáčivé charakteristiky .....	43
2.4.1.	<i>Nastavení parametrů měření</i> .....	43
2.4.2.	<i>Vyhodnocení výsledků měření</i> .....	44
2.4.3.	<i>Zhodnocení výšky nastoupaní pájky</i> .....	47
2.5.	Diskuze kontextu spolehlivosti pájeného spoje .....	49
2.5.1.	<i>Hodnocení spolehlivosti rozdílných povrchových úprav</i> .....	49
2.5.2.	<i>Hodnocení vlivu předmontážního čisticího prostředku na spolehlivost</i> .....	49
2.5.3.	<i>Hodnocení vlivu tavidla na spolehlivost spoje</i> .....	50
2.5.4.	<i>Hodnocení vlivu přehřevu na spolehlivost spoje</i> .....	50
3.	Přehled struktury bodů měření a metodika měření .....	52
3.1.	Přehled provedených měření .....	52
3.2.	Metodika měření .....	54
	Závěr .....	55
	Použité zdroje .....	58
	Příloha .....	60

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Zastoupení kovů v eutektické slitině SAC [1].....	13
Obrázek 2 Obecné složení tavidel.....	15
Obrázek 3 Rozdělení smáčivosti podle smáčecích úhlů [1].....	19
Obrázek 4 Schéma zapojení měřicího pracoviště s meniskografem MK6A.....	20
Obrázek 5 Fotografie měřicího pracoviště s meniskografem MK6A.....	21
Obrázek 6 Nesmáčení vzorku v pájce.....	22
Obrázek 7 Smáčení vzorku v pájce.....	22
Obrázek 8 Rozbor křivky smáčecích vah [2].....	24
Obrázek 9 Typické průběhy smáčecích charakteristik [2].....	27
Obrázek 10 Fotografie vzorků s různou povrchovou úpravou.....	30
Obrázek 11 Porovnání smáčivosti různých povrchových úprav bez čištění ultrazvukem.....	31
Obrázek 12 Hodnocení výšky navzlínání pájky.....	32
Obrázek 13 Čištění vzorků v ultrazvukové myčce.....	33
Obrázek 14 Porovnání smáčivosti různých povrchových úprav DPS po UZV oplachu v IPA....	34
Obrázek 15 Porovnání smáčivosti různých povrchových úprav DPS po UZV oplachu v PROTON42.....	34
Obrázek 16 Porovnání smáčivosti různých povrchových úprav DPS po UZV oplachu v F10 ...	35
Obrázek 17 Porovnání smáčivosti NiAu povrchu po použití různých UZV oplachů.....	36
Obrázek 18 Porovnání průběhů kontaktního úhlu při smáčení povrchové úpravy DPS NiAu .	37
Obrázek 19 Hodnocení výšky navzlínání pájky.....	38
Obrázek 20 Porovnání smáčivosti měděných povrchů při použití různých UZV oplachů v kontextu výšky nastoupání pájky.....	39
Obrázek 21 Fotografie celoměděného vzorku.....	40
Obrázek 22 Vliv tavidla na smáčecí charakteristiku při použití pájky SAC 305.....	41
Obrázek 23 Vliv tavidla na smáčecí charakteristiku při použití pájky SN100C.....	42
Obrázek 24 Vliv tavidla na smáčecí charakteristiku při použití pájky SN100C-P.....	42
Obrázek 25 Fotografie měřicího pracoviště předehřevu.....	43
Obrázek 26 Nastavení teplotního profilu pro předehřev pomocí SlimKIC2000.....	44
Obrázek 27 Vliv předehřevu na smáčecí charakteristiku slitiny SAC305.....	45
Obrázek 28 Vliv předehřevu na smáčecí charakteristiku slitiny SN100C.....	46
Obrázek 29 Vliv předehřevu na smáčecí charakteristiku slitiny SN100C-P.....	47
Obrázek 30 Porovnání nastoupání výšky pájky pro různé parametry měření.....	48
Obrázek 31 Povrch pájky na třech různých povrchových úpravách DPS.....	49
Obrázek 32 Povrch pájky na Cu vzorku po UZV čištění.....	50
Obrázek 33 Povrch SAC305 po použití různých tavidel.....	50
Obrázek 34 Povrch SN100C pájky s použitím tavidla Ecofrec 202.....	51
Obrázek 35 Povrch SN100CP pájky s použitím tavidla 979T.....	51
<b>Příloha:</b>	
Obrázek 36 Porovnání průběhů kontaktního úhlu při smáčení povrchové úpravy DPS Cu.....	60
Obrázek 37 Porovnání průběhů kontaktního úhlu při smáčení povrchové úpravy DPS Sn.....	60
Obrázek 38 Porovnání průběhů kontaktního úhlu při smáčení různých povrchových úprav po oplachu v F10.....	61
Obrázek 39 Porovnání průběhů kontaktního úhlu při smáčení různých povrchových úprav po oplachu v IPA.....	61
Obrázek 40 Porovnání průběhů kontaktního úhlu při smáčení různých povrchových úprav po oplachu v PROTON 42.....	62
Obrázek 41 Porovnání průběhů kontaktního úhlu při smáčení bez čištění v UZV.....	62



## Úvod

Výsledná kvalita desek plošných spojů je dána především zvládnutím technologické operace pájení. Zejména kvůli kvalitě osazení se zavádí zkoušky pájitelnosti. Touto zkouškou rozumíme vyhodnocení vhodnosti použití pájecích postupů a materiálů s nimi spojených pro dosažení očekávané kvality vzniklých spojů a celků. Zkoušky pájitelnosti sestávají ze souboru testů, které se při této zkoušce provádějí a patří mezi ně hlavně tzv. kuličkový test, test ponořením, test roztékání pájky a v neposlední řadě také metoda smáčecích vah.

Metoda smáčecích vah slouží jako účinný nástroj pro ověření pájitelnosti. Vzhledem ke konstrukci přístroje, meniskografu, který k tomuto ověření slouží, je možné prověřovat vzorky nejrůznějších tvarů a velikostí, součástky a materiály různých provedení. Při testování pájitelnosti vyhodnocujeme síly, které působí na zkoumaný objekt při jeho ponoření do roztavené pájky. Smáčecí síla a její časový průběh při ponořování vzorku do lázně mají velkou vypovídací hodnotu. Díky ní dokážeme vyvodit, zda vzorek je či není vhodný pro pájení. Díky možnostem meniskografu můžeme přesně nastavovat všechny parametry ponoření, můžeme experimentálně vyhodnocovat vhodnost použití různých tavidel, oplachů, povrchových úprav vzorků, pájecích slitin, tvarů pájených vývodů a plošek atd.

V úvodní části této diplomové práce bych rád uvedl podrobnější teoretické informace o metodě smáčecích vah a postupech při vyhodnocování výsledků získaných z meniskografu. Dále se zaměřím na část teorie o procesu pájení, zejména z oblasti smáčení. Rozvedu některé podrobnější informace o používaných základových materiálech a jejich povrchových úpravách. Nastíním problematiku pájecích slitin, zejména bezolovnatých slitin se základem mědi a cínu. Rozeberu podrobněji technologické parametry použitých materiálů a chemikálií.

Při praktické části, při měření, hodlám prověřit pájitelnost tří různých povrchových úprav vzorků desky plošného spoje. Dalším bodem je vyhodnocení vlivu oplachu a omytí pájených vzorků na jejich smáčecí charakteristiku. Budu hodnotit jak průběhy smáčení, tak výšku nastoupání pájky na vzorky. Všechna měření budou v prvních dvou bodech provedena s pájkou SAC305, která představuje nejběžnějšího zástupce evropské pájecí bezolovnaté slitiny.

Dále hodlám dle zadání práce ověřit vhodnost předehřevu. Předehřev by měl dle předpokladu zkrátit dobu aktivace tavidla. V provozech je předehřev používán běžně a je standardní součástí pájecích linek zejména při pájení vlnou. Meniskograf vlastně simuluje pájení vlnou, tedy pájení, kdy je k dispozici neomezené množství pájky, na rozdíl od pájení přetavením, kde je množství pájky definované.

V navazující práci bych se rád věnoval problematice tavidel, která mají dle mého názoru zásadní dopad na smáčivost. Zhodnotím proti sobě tavidla s obsahem VOC (volatile organic compounds) a VOC free vzhledem k jejich velmi škodlivému dopadu na životní prostředí a zdraví lidí.

V poslední fázi bych prověřil kvalitu vzniklých spojení, zejména z pohledu vzhledu a struktury vzniklé po zapájení a zatuhnutí. Vzhled pájky po zatuhnutí je důležitým hodnotícím faktorem. V ideálním případě by měl být rovnoměrný, lesklý, bez prasklin, zrn a podobných vad. Parametrem hodnocení budou různé slitiny, tavidla, povrchové úpravy a formy přípravy vzorků před pájecím procesem, tedy vliv předeřevu, oplachu a čištění.

# 1. Teoretický úvod

## 1.1. Pájky

### 1.1.1. *Legislativa a požadavky na pájecí slitinu*

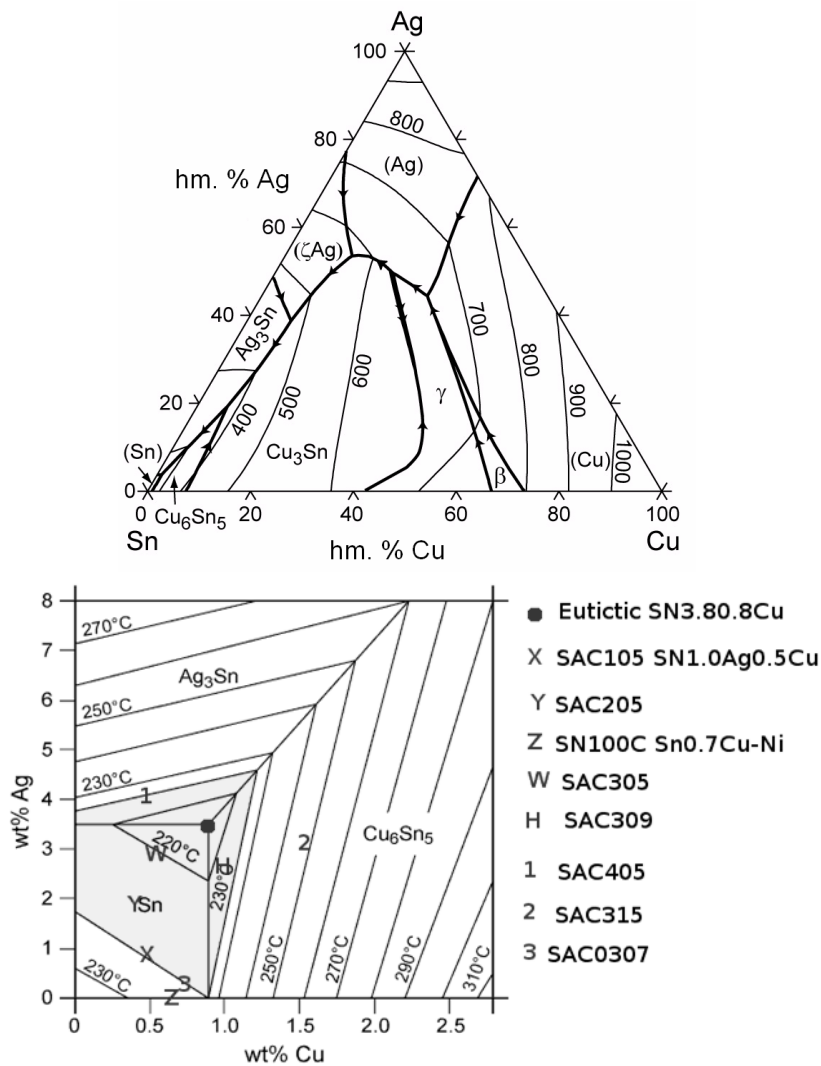
Pro měkké pájení využíváme olovnaté a bezolvnaté pájecí slitiny. Z důvodů šetrnosti k životnímu prostředí a také z důvodů dodržování nařízení WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) a RoHS (The restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment) měl průmysl přecházet na pájení pomocí bezolvnatých slitin ke dni 1. 7. 2006. Kritériem pro úspěšný přechod bylo navržení vhodných bezolvnatých alternativ ke slitinám obsahujícím olovo. Nejvíce se parametrově přiblížily zejména slitiny na bázi cínu a mědi SnCu. Přídavkem dalších kovů lze korigovat parametry pro aplikace, které potřebujeme pájet bezolvnatě. Proto je při volbě pájecí slitiny třeba znát její základní charakteristiky. Mezi ně patří zejména:

- teplotní průběh křivky solidus-liquidus. Teplotní rozsah výrazným způsobem ovlivňuje praskliny v pájeném spoji, lesklost pájeného spoje, opracovatelnost, kvalitu spoje a spolehlivost.
- smáčivost a roztékavost pájky (smáčecí doba, smáčecí síla, smáčecí stres, roztečení při smáčení). Smáčivost je ovlivněna viskozitou, hustotou, povrchovým napětím a stavem pájeného povrchu a reakce s podkladovým materiálem.
- úroveň oxidace pájky
- únavová odolnost pájky

Při procesu zapájení má pájka několik hlavních funkcí. Hlavním požadavkem je samozřejmě elektrické propojení komponent. Další nutnou funkcí je mechanická fixace součástek na desce plošného spoje. Pájka dále zajišťuje ochrannou funkci před oxidací a nakonec má za úkol odvádět ztrátové teplo vzniklé na součástkách. Volba vhodné pájecí slitiny významně ovlivňuje dosaženou kvalitu pájených spojů jak z hlediska pevnosti, tak z hlediska smáčivosti. Podílí se také velkou měrou na konečné ceně výrobku. Vliv má také na ekologii celého výrobního mechanismu.

### 1.1.2. *Bezolvnaté pájecí slitiny SAC 305 a SN100C, SN100CP*

Největší pozornost je věnována bezolvnatým slitinám se základem kovů SnAgCu zejména SAC305. Jedná se o ternární pájecí slitinu s bodem tavení v rozmezí teplot 217°C – 219°C podle poměrného zastoupení jednotlivých složek ve slitině. Více o teplotách a vzájemném poměru je patrné z obrázku č. 1.



**Obrázek 1** Zastoupení kovů v eutektické slitině SAC [1]

SnAgCu slitina je tvořena tzv. neuniformní mikrostrukturou (nejednotná struktura malých celků). Na cínové matrici jsou naneseny intermetalické fáze přidaných kovů, tedy krystaly  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  a  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ . Tato struktura je zajištěna rychlým tuhnutím při chlazení slitiny při výrobě. Obecně dosahují SAC pájky dobrých výsledků. Problémem je větší povrchové napětí oproti pájkám SnPb a je ho tedy třeba problematicky překonávat většími pracovními teplotami a také prodloužením času pro zajištění dobré smáčivosti pájených povrchů.

Bezolovnatá pájka SN100C je niklem stabilizované eutektikum cín-měď, mimořádně vhodné pro mechanickou úpravu povrchu. Ve srovnání s pájkou SAC305 má vyšší bod tavení a to 227°C. SN100C se ve výrobě efektivně používá již několik let. Doporučení pro pájení vlnou, jednoduchou nebo dvojitou vlnou, pro pájení ponorem, tažením a selektivním pájením.

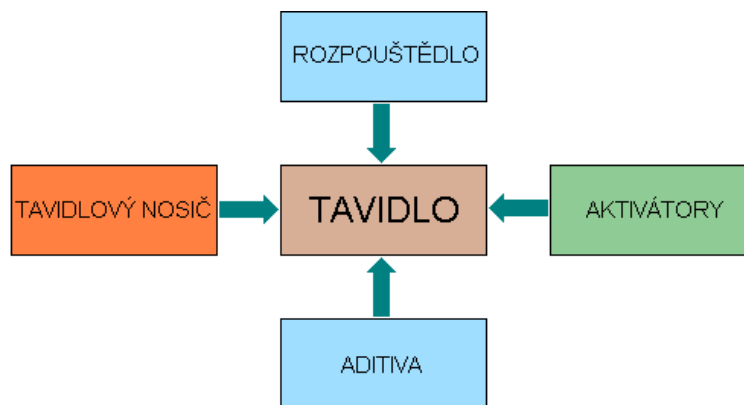
**Tabulka 1** Složení vybraných bezolovnatých pájek

prvek	Pájka		
	SAC 305	SN100C	SN100CP
Sn	hlavní prvek	hlavní prvek	hlavní prvek
Cu	3	0,6	0,6
Ni	max. 0,003	0,1	0,1
Al	max. 0,003	max 0,001	max 0,001
Au	max. 0,05	max 0,05	max 0,05
Cd	max. 0,001	max 0,002	max 0,002
Fe	max. 0,01	max 0,02	max 0,02
In	max. 0,1	max 0,05	max 0,05
Pb	max. 0,05	max 0,05	max 0,05
Zn	max. 0,001	max 0,001	max 0,001
Bi	max. 0,01	max 0,03	max 0,03
As	max. 0,01	max. 0,03	max. 0,03
<i>pozn.</i>			<i>100 ppm P</i>

## 1.2. Tavidla

### 1.2.1. Funkce tavidel

V zásadě se v bezolovnatých aplikacích používají tavidla mírně agresivnější s podobným složením jako u aplikací s použitím olovnatých pájek (SnPb). Vzhledem k nutnostem použití vyšších teplot je využíváno zejména tavidel bezoplachových s úzkým technologickým oknem (kombinace aktivačních teplot a časů). Bezoplachová tavidla na bázi pryskyřic mají další výhody v podobě nízké ekologické zátěže a výhodné cenové hladiny. Tavidla obsahují několik složek, které vykazují jak fyzikální, tak chemické funkce. Tavidla obsahují kyseliny, které reagují s oxidy na pájených površích. Dále obsahují aktivátory pro usnadnění smáčení. Toho dosahují snížením povrchového napětí pájky a zvýšením napětí na pájeném povrchu, což zvyšuje roztékavost a vzlínavost pájky. Samotná pryskyřice zajišťuje zejména ochranu před oxidací pájky při pájení. Celkově tavidla zlepšují přenos tepla.



**Obrázek 2** Obecné složení tavidel

### **1.2.2. Klasifikace tavidel**

Tavidla jsou k dispozici ve třech skupenských formách – kapalná, pevná, plynná. Podle základních složek rozlišujeme tavidla na:

- tavidla na anorganické bázi
- tavidla na bázi přírodních nebo syntetických pryskyřic
- tavidla na bázi organických kyselin

Kromě této klasifikace obsahují tavidla složky aktivátorů a ty rozlišujeme na bázi kyselin (R-COOH), halidů (chlóru, fluór, bróm, jód) a aminů (R-NH). Dále tavidla rozlišujeme dle rozpouštědel na anorganická (voda – VOC free) a organická (VOC).

### **1.2.3. Tavidla**

Při posuzování vlivu tavidel pro metodu smáčecích vah byla vybrána tři tavidla jako zástupci skupin tavidel na bázi přírodních pryskyřic, tavidel s organickými rozpouštědly VOC a tavidla s nejmenším škodlivým dopadem na zdraví člověka a přírody, a sice tavidlo označené jako VOC free.

- tavidlo na bázi přírodní pryskyřice – jedná se o tavidlo vzniklé rozpouštěním přírodní kalafuny v izopropylalkoholu pro dosažení tekutého stavu tavidla. Standardně rozpouštíme kalafunu v izopropylalkoholu v poměru 1:3.
- tavidlo VOC – ECOFREC 202 – výrobce Avantec - toto je zástupce tavidel s velmi nízkým obsahem netěkavých složek. Po strojním pájení vlnou dochází zcela k eliminaci bezhalogenidového aktivačního systému tavidla. Tavidlo po pájení nezanechává žádné viditelné tavidlové zbytky. Tavidlo je zejména vhodné pro strojní pájení bezolovnatými pájecími slitinami. Může být

nanášeno i formou pěny. Má dobré smáčecí vlastnosti, je tedy snadné ho nanášet na různé kovy a povrchové úpravy základových materiálů.

Specifikace ECOFREC 202:

- Hustota při 20°C – 818 kg.m<sup>-3</sup>
  - teplota vznícení 16°C
  - obsah netěkavých složek 1,9%
  - bez obsahu halogenidů
  - S.I.R. – surface insulation resistance – řádově 10<sup>10</sup> Ω
- tavidlo VOC free – 979T – výrobce Litton Kester Solder – jedná se o 100% VOC free bezoplachové tavidlo. Je navrženo pro dosažení dobrých výsledků při bezolovnatém pájení. Obsahuje výběr organických aktivátorů pro dobré smáčení složitějších útvarů, poskytuje po zapájení lesklý povrch pájky bez poruch. Zvláště dobře reaguje s OSP (organic surface protection) úpravou povrchu desky plošných spojů. Dobře odolává vzniku kuliček a zbytků pájek na nevhodných místech desky. Po zapájení zanechává minimum tavidlových zbytků na povrchu pájené desky. Specifikace:
    - Hustota při 25°C – 1015 kg.m<sup>-3</sup>
    - obsah pevných složek – 4,2%
    - S.I.R. – řádově 10<sup>10</sup> Ω podle normy IPC B25
    - optimální teplota přehřevu 110 – 150°C

### 1.3. Substrát FR4

Základním materiálem při výrobě DPS je bezesporu materiál FR4. Zkratka pochází z anglického flame retardant. Jedná se o pevný podkladový materiál desky plošného spoje. Je tvořen tkaninou ze skelných vláken vytvrzený epoxidovou pryskyřicí. Vodivá vrstva je realizovaná nalaminovanou vrstvou mědi, do které realizujeme motiv desky. FR4 se vyznačuje dobrými dielektrickými, mechanickými, chemickými a teplotními vlastnostmi. Přidáním aditiv do epoxidové pryskyřice upravujeme její materiálové vlastnosti, zvýšení bodu skelného přechodu a snížení součinitele tepelné roztažnosti, což je důležité při montáži součástek nebo materiálů, které mají odlišný teplotní součinitel roztažnosti. FR4 je anizotropní základový materiál, vykazuje různou roztažnost v různých osách.

Materiál FR-4 se vyrábí kladením impregnovaných skelných tkanin a jejich laminací. Působením tlaku a tepla dochází k vytvrzení pryskyřice a pevnému propojení jednotlivých vrstev desky. V konečné fázi je na povrch nalaminována tenká Cu folie, která později tvoří vodivý motiv desky plošného spoje. Její vhodná povrchová úprava je základem pro provedení

technologických operací pájení a tedy pro vysokou výslednou spolehlivost desky. Podstatná je také příznivá výrobní cena.

#### **1.4. Povrchové úpravy pájecích ploch**

Vzhledem k náchylnosti měděného plátování na DPS je třeba ji při skladování chránit. Běžnou ochranu při výrobě poskytuje nepájivá maska. Pro nezapájené kontaktní plochy je potřeba užít nějakou z variant povrchových úprav. V podstatě se jedná o nanesení vrstvy kovu zajišťující ochranu před oxidací. Nanesení je prováděno chemicky, galvanicky nebo žárem. Základními variantami běžných povrchových úprav je HAL, OSP a NiAu.

- HAL – hot air levelling. Podstatou této úpravy je žárové nanesení vrstvy SnPb na desku plošného spoje. Problematickou oblastí HALu je zejména tepelné zatížení desky, při tepelném šoku dochází k prohýbání a deformacím. Dalším záporem je povrch získaný HALem, který je nerovný, nerovnoměrný zejména v krytí otvorů. Vzhledem k požadavkům na bezolovnatý pájecí proces jsou nyní k dispozici i slitiny vhodné pro HAL, které již neobsahují žádné olovo. Jedná se zejména o SAC pájku s přísadkou antimonu.
- OSP – organic solder preservatives. Chemická metoda nanášení organických inhibitorů zabráňujících oxidaci měděných kontaktních ploch. Výhody oproti HALu jsou zejména ve vynikající rovinnosti povrchu a také v nižší ceně (až o 50 procent). Spolehlivost spojů při pájení je podobná jako u HALu. Nevýhodou jsou doporučené kratší doby skladování oproti HALu
- NiAu – nikl - zlato. Galvanická nebo chemická metoda nanesení ochranného kovového povlaku. Podklad tvoří nikl a na něj je postupně nanášena vrstva zlata. Nevýhodou oproti jiným povrchovým úpravám je značná difuze zlata do pájeného spoje. Dochází tak k vytvoření intermetalických zrn. Ty mohou narušovat pevnost spoje a působit jeho zkřehnutí. Naopak díky zlatu je povrch dokonale chráněn proti oxidaci.

#### **1.5. Proces pájení**

##### **1.5.1. Pájení**

Pájení je proces spojování kovových součástí metalurgickou cestou. Roztavenou pájkou při teplotách do 450 °C při měkkém pájení propojujeme součástky, kovové nebo prokovené díly aj. Zřejmá je snaha o vytvoření co nejpevnějšího a nejodolnějšího spoje. Kvalita propojení terminálu součástky s odpovídající pájecí ploškou na základovém materiálu je rozhodující. Aby vznikl po všech stránkách kvality dobrý spoj, je třeba pájet čisté povrchy



bez zoxidovaných vrstev. Dále je třeba dodržet odpovídající procesní teploty pájení. Atomy pájených kovů musí vykazovat vysoké přílnavé a soudržné síly.

Z hlediska pájitelnosti je třeba zajistit vzájemnou kompatibilitu povrchů a pájecích procesů a dobrou smáčivost. Při pájení rozlišujeme dva technologické postupy, z hlediska distribuce tepla a množství pájky. Jedná se o systémy reflow, kdy definovanému množství nanesené pájky postupně dodáváme teplo pro přetavení. Druhou variantou je dodání již roztaveného neomezeného množství pájky, v praxi se jedná o pájení vlnou.

Ideální pájený spoj u vývodové montáže je charakterizován konkávním pájecím kuželem, lesklým a hladkým povrchem pájky s dokonale smočeným vývodem součástky i pájecí plošky DPS. Takto vizuálně popsaný pájený spoj má i dostatečnou pevnost, která odpovídá úrovni jeho pájecího procesu. Kritéria pro posouzení dobře zapájeného spoje jsou následující:

- dobrá smáčivost povrchů
- tvar a vzhled pájeného spoje dle normy J-STD-001B
- žádné perličky v blízkosti pájeného spoje
- žádná rozstříkaná pájka
- žádné dutiny ve vzniklém pájeném spoji

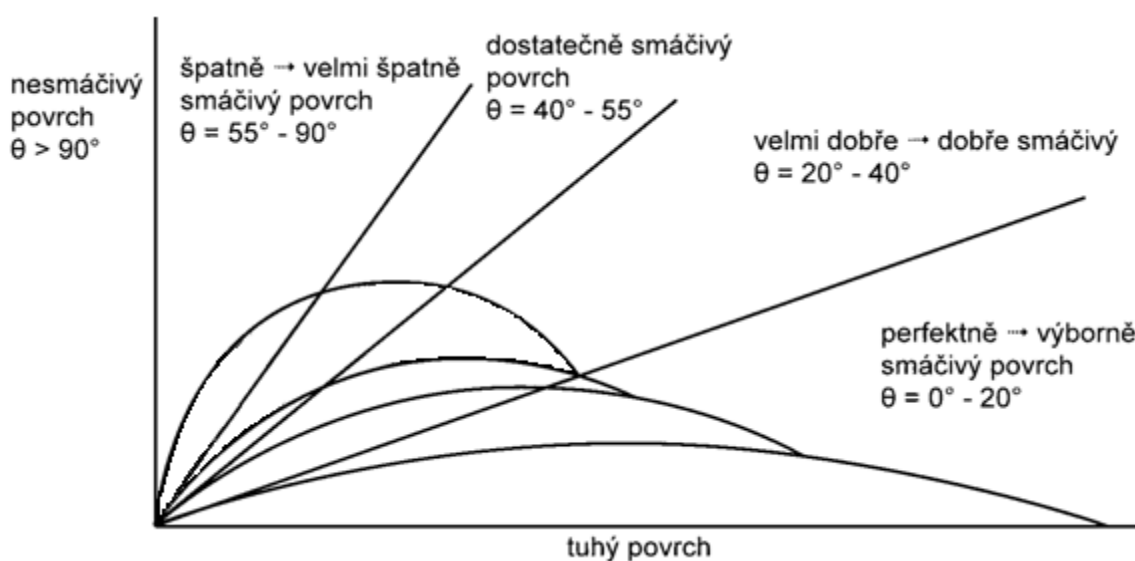
### **1.5.2. Pájitelnost**

Jedná se soubor společně souvisejících vlastností, udávajících míru vhodnosti pro průmyslové pájení. Základními kritérii pájitelnosti jsou zejména smáčivost pájených povrchů, odolnost součástek a substrátu vůči teplotám dosaženým při pájení a teplotní kompatibilita systému z hlediska tepelné distribuce. Pokud nazveme systém jako „pájitelný“, musí vykazovat následující kritéria. Musí dojít k odpovídajícímu smáčení spoje a to během doby, kdy působí horká pájka a teplo. Tato doba musí být natolik krátká, aby nedošlo k tepelnému poškození součástky nebo narušení substrátu, například prohybem atd. Nakonec musí být systém schopen distribuovat dostatek tepla pro dostatečné prohřátí spojů a to v odpovídajícím čase s odpovídající teplotou.

Vzhledem k náchylnosti pájecího procesu na nedostatky spojené právě se smáčením, distribucí tepla a tepelnou odolností je nutné klást na optimalizaci pájecího procesu zvýšený důraz. A to při výběru materiálů, pájky, tavidel a teplotních profilů. Vady spojené se špatnou optimalizací se podílejí až na třech čtvrtinách celkově vzniklých závad.

### 1.5.3. Smáčení povrchů

Při smáčení začínají působit meziatomární síly. Na místech mezifázového 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, tedy roztavená pájka a tuhý kov, mění v jedno mezifázové rozhraní. Na tomto mezifázovém rozhraní přechází atomy roztaveného kovu do mřížky tuhého kovu. Dochází ke spojování valenčních elektronů jednotlivých kovů a k vytvoření kovové vazby. Pokud nedojde k vytvoření tohoto spojení, nedochází ani k odpovídajícímu smáčení povrchů. Podle úrovně roztečení pájky na povrchu rozlišujeme základní míry smáčivosti.



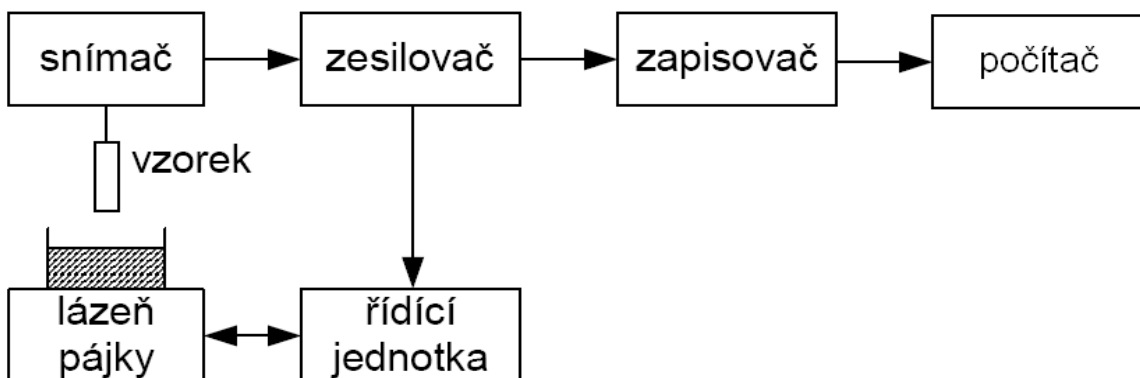
Obrázek 3 Rozdělení smáčivosti podle smáčecích úhlů [1]

- nesmáčivý povrch: Pájka nepokryje povrch, nedojde k roztečení či navzlínání pájky na pájený kov. Důvodem může být špatné tavidlo nebo přítomnost nečistot a oxidů na pájeném povrchu.
- částečně smáčivý povrch: Na povrchu nedojde k jeho úplnému pokrytí. Pájka se rozlévá nerovnoměrně, nedosáhne okrajů nebo rohů povrchu. Navzlínání pájky není vysoké.
- dobře smáčivý povrch: Pájka se dobře rozteče po celé ploše. Roztečení je rovnoměrné, povrch je hladký a jednotný. Pájka dosahuje i do rohů a navzlínání je vysoké. Výsledná tloušťka pájky je při dobrém smáčení nízká.
- odsmáčivý povrch: Jedná se o případ, kdy pájka nejprve smočí povrch, ale následně dojde pouze k vytvoření kapek pájky.

## 1.6. Metoda smáčecích vah

### 1.6.1. Meniskograf

Zařízení speciálně konstruované pro měření smáčivosti povrchů v roztavené pájce. Meniskograf, jehož název je odvozen od obchodního názvu, je digitální měřicí zařízení schopné pomocí mikrovah citlivě měřit změny sil působících na volně zavěšený vzorek při jeho noření do roztavené pájky. Pomocí krokového motoru meniskograf ovládá zdvih kalichu s pájkovou lázní. Můžeme tak přesně nastavit rychlost ponoru, hloubku ponoru a délku ponoru. Dále meniskograf zajišťuje přesný ohřev pájky na požadovanou teplotu. Teplotu snímá přímo z roztavené pájky. Meniskograf je schopen zaznamenat s dostatečnou přesností průběh sil, které působí na vzorek při jeho ponoření. Všechna data jsou přeposílána přímo do počítače, kde jsou vynesena do grafu s možností exportu ve formátu MS Excel. Meniskograf umožňuje širokou škálu nastavení všech parametrů průběhu ponoru. Umožňuje nastavení velmi malých normných hloubek díky systému sledování dotyku hladiny s vodivým vzorkem. Umožňuje tak přesně stanovit povrchové napětí testovaných slitin použitím referenčního nesmáčivého vzorku. Díky tomu, že je vybaven vyjímatelným nerezovým kalichem pro roztavenou pájku, je možné provádět měření s rychlou výměnou slitiny, aniž by docházelo ke vzájemné kontaminaci testovaných pájek. Velikost kalichu odpovídá při vrchovatém naplnění asi kilogramu pájecí slitiny, což je dostatečné množství, které udržuje stálou teplotu při noření vzorků s vyšší tepelnou kapacitou, které pájku ochlazují. Meniskograf MK6A anglické výroby, na kterém jsou prováděna všechna měření z této práce, je s počítačem propojen přes USB rozhraní dle obr. 4 a obr. 5.



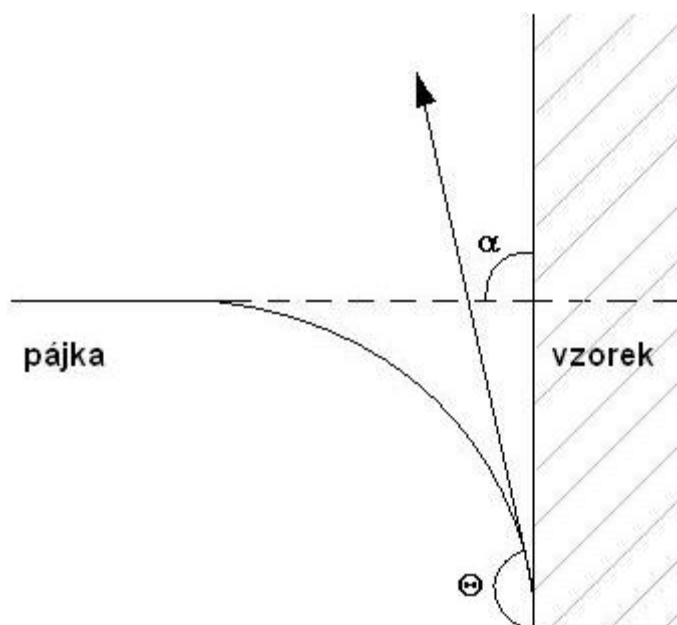
**Obrázek 4** Schéma zapojení měřicího pracoviště s meniskografem MK6A



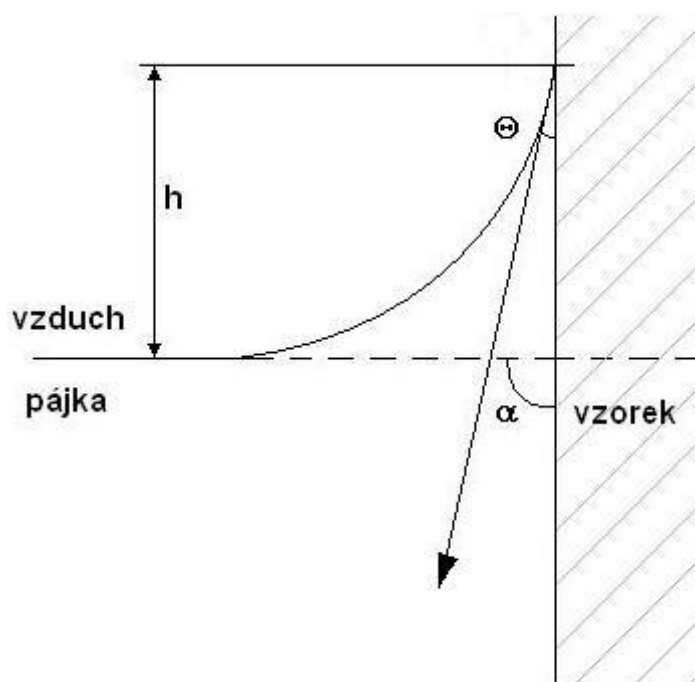
**Obrázek 5** Fotografie měřicího pracoviště s meniskografem MK6A

### **1.6.2. Působení smáčecích sil**

Metodikou sledování rovnováhy smáčecích sil určujeme smáčivost součástek nebo povrchů. Využívá se měření sil působících na vzorky, které ponořujeme do lázně s roztavenou pájkou netemperovanou na požadovanou pracovní teplotu. Sledujeme tedy vertikální síly, které vznikají během ponoření, sledujeme jejich průběh po dobu ponoření a nakonec i jejich změnu při vynoření tělesa z pájky.



**Obrázek 6** Nesmáčení vzorku v pájce



**Obrázek 7** Smáčení vzorku v pájce

Při ponořování tělesa do pájky vzniká podle Archimédova zákona vztlková síla, která je rovna tíze pájky vytlačené ponořenou částí tělesa. Vztlková síla působí proti směru ponoření a nadnáší tedy vnořený vzorek v pájce. Velikost této síly je tak úměrná hustotě pájky  $\rho$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ], ponořenému objemu  $v$  [ $\text{m}^3$ ] a tíhovému zrychlení  $g$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]. Vztlková síla je přítomna po celou dobu ponoření tělesa v pájce. Nejvyšší je právě od momentu, kdy je maximální ponor. V tomto bodě je tělesem vytlačený objem pájky nejvyšší. Těleso je ponořením vzhledem ke hladině pájky pod úhlem  $\alpha$  [ $^\circ$ ] (ideálně  $90^\circ$ ). Kontaktní úhel  $\Theta$  [ $^\circ$ ], který svírá povrch vzorku a tvar pájky, je vyznačen na obrázku 4 a 5 a jeho velikost se v průběhu testu mění. V momentě, kdy ještě nenastalo smáčení, je jeho velikost maximální.

V momentě, kdy dojde k prohřátí vzorku a aktivaci tavidel, začne na povrch vzorku vzlínat pájka. V bodě, kdy je úhel  $\alpha$  [°] a kontaktní úhel  $\Theta$  [°] stejný - v případech na obrázku by byly oba rovny  $90^\circ$  - působí povrchové napětí kolmo na stěnu vzorku, jedinou vertikálně působící silou zůstává tedy síla vztlaková. Poté, co je navzlínání maximální, můžeme stanovit jeho výšku  $h$  [m]. Smáčecí úhel dosahuje svého minima. V tomto momentě působí kromě vztlakové síly také povrchová síla, která má opačný směr. Má snahu vtahovat těleso do pájky. Maximální navzlínání je tedy určeno velikostí povrchového napětí a hustotou pájky.

Průběh během ponoření zaznamenává změnu vertikálních složek povrchových sil. Vyhodnocujeme velikost kontaktního úhlu v čase. Tyto síly jsou úměrné kosinu smáčecího úhlu  $\cos\theta$  [-], povrchovému napětí roztavené pájky  $\gamma$  [ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ] a obvodu ponořené části vzorku  $p$  [m]. Rovnovážnou sílu  $F$  [N] tedy můžeme popsat jako rozdíl smáčecí síly a vztlakové síly. Vzájemný vztah vyjadřuje rovnice (1):

$$F = \gamma p \cos\theta - v \rho g \quad (1)$$

kde je:

- $F$  - rovnovážná vztlaková síla [N]
- $\gamma$  - povrchové napětí roztavené pájky pod tavidlem [ $\text{Nm}^{-1}$ ].
- $p$  - obvod vzorku [m].
- $g$  - gravitační zrychlení  $9,81$  [ $\text{ms}^{-2}$ ].
- $v$  - objem ponořené části vzorku [ $\text{m}^3$ ].
- $\theta$  - kontaktní úhel [°].
- $\rho$  - hustota pájky [ $\text{kgm}^3$ ]

### 1.6.3. Korekce na vztlak

Aby smáčecí váhy určovaly hodnoty síly smáčení, které jsou vzájemně opakovatelné, je nutné provádět korekci na velikost vzorku. Toto se provádí korekcí na objem výběru ponořeného do pájky. Pro výpočet korekce na vztlakovou sílu použijeme jednoduše vztah pro tíhu objemu pájky vytlačené vzorkem při ponoru a sice:

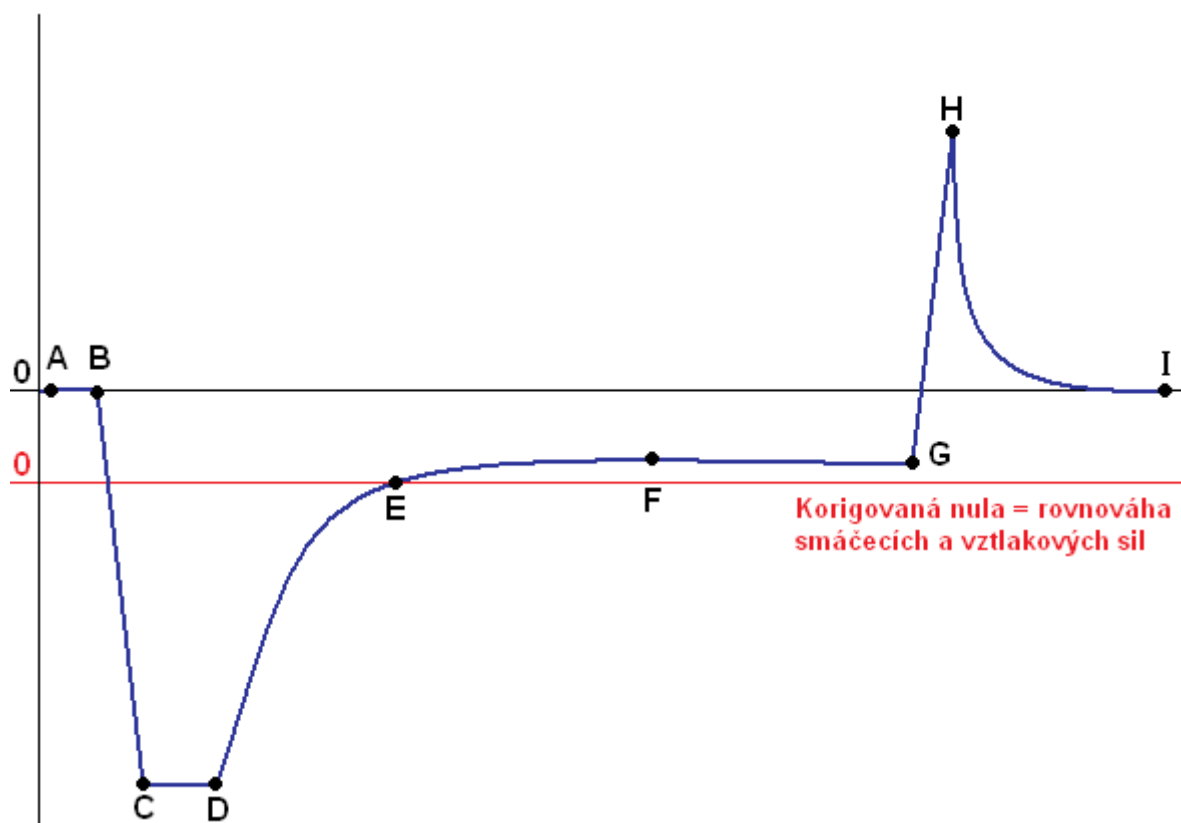
$$F_{vz} = v \rho g \quad (2)$$

Důležité je uvědomit si, že každá změna parametrů ovlivňuje pozici korigované nuly. Je tedy třeba při měření dbát na tuto korekci. Dále je také nutno podotknout, že pokud vzorek vnoříme hlouběji do pájky, je vzrostlý objem třeba i minimální, avšak dramaticky se může zvětšit kontaktní plocha vzorku a tedy i množství a rychlost, se kterou vzorek absorbuje teplo

potřebné pro svůj ohřev. Díky tomuto jevu se mění strmosti křivky a také prodleva při ohřevu vzorku na teplotu potřebnou pro zahájení smáčecího procesu.

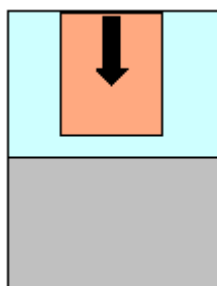
#### 1.6.4. Průběh křivky rovnováhy smáčení

Křivka rovnováhy smáčení vykazuje charakteristické rysy, díky kterým je možné určit kvalitu procesu smáčení. Obrázek 5 popisuje klíčové, hodnotící body na křivce. Na ose x je vynesena čas a na ose y je vynesena výslednice sil působících na ponořený vzorek.

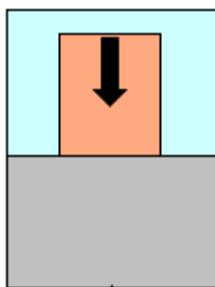


Obrázek 8 Rozbor křivky smáčecích vah [2]

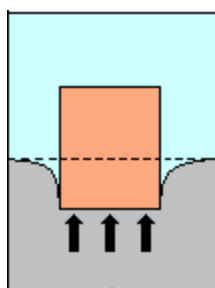
- A – Bod před dotykem hladiny pájky a vzorku výsledná síla je 0 až do bodu B.



- B – Bod, ve kterém počíná vlastní měření. Jedná se o okamžik, kdy se do roztavené pájky začíná nořit vzorek. Jedná se o nastavenou nulu přístroje. Je odečtena měřením odporu, který klesá při dotyku vodivého vzorku a vodivé pájky.



- C – Tohoto bodu dosáhneme při úplném dosažení nastavené hloubky ponoru za předpokladu, že ještě nedochází ke smáčení. V případě, že by ke smáčení došlo již před dosažením maximálního ponoru, by byl bod C umístěn výše na ose Y. Obecně v tomto bodě překonáváme povrchové napětí pájky. Strmost křivky B – C je dána rychlostí ponoru vzorku do lázně. Působí tu vztlaková síla, která má snahu vytlačovat vzorek z pájky a stejně působí i povrchové napětí hladiny.

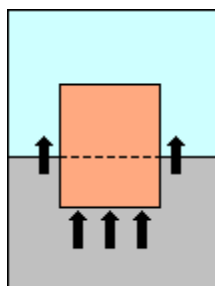


- D – Bod, kdy začíná smáčení. Oblast C – D je dána tepelnou kapacitou vzorku. U menších objektů s lepší distribucí tepla bude tento úsek krátký a naopak se prodlužuje u větších objektů s vyšší tepelnou kapacitou. Smáčení tedy začíná po prohřátí vzorku, dochází zde k aktivaci tavidel.
- E – Bod, kde dochází k protnutí tzv. korigované nuly, která je vypočítána ze vztahu pro  $F_{vz}$ . V tomto bodě je v rovnováze Archimédova vztlaková síla a smáčecí síla viz vztah (3).

$$F_{vz} = F_s \quad (3)$$

po dosazení (4):

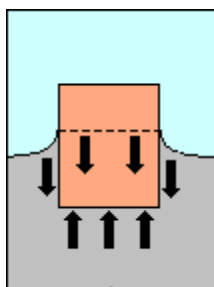
$$\gamma p \cos \theta = v \rho g \quad (4)$$



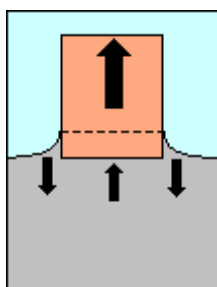
- F – Zde dosahuje nastoupání pájky maxima, pokud křivka dále klesá, tak dochází k odsmáčení, podle strmosti odhadujeme jeho míru. Bod F je také oblastí, kdy pájka



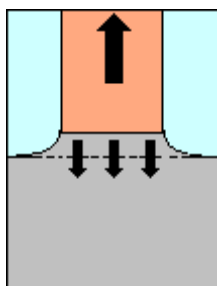
navzhlíná do maximální výšky, kterou můžeme snadno změřit a porovnávat s jinými vzorky. Působí tu síla smáčecí proti vztlakové.



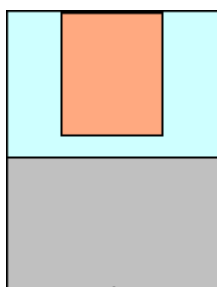
- G – V tomto momentě začíná vzorek opouštět roztavenou pájku. Smáčecí síla působí proti síle, která vytahuje vzorek z lázně. S klesajícím ponořeným objemem se snižuje i vztlaková síla.



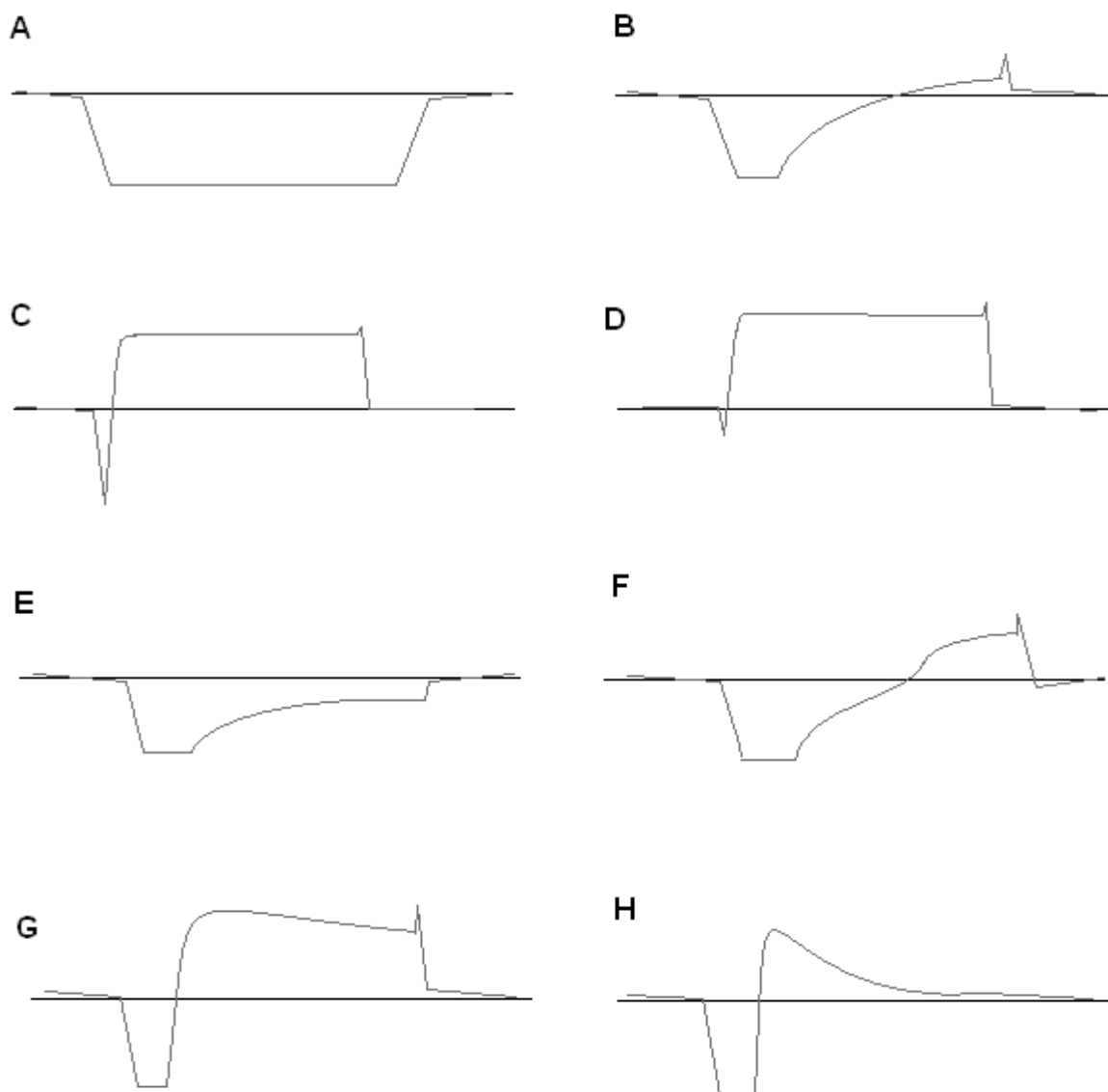
- H – Vrchol křivky, kdy smáčivá síla teoreticky odpovídá hmotnosti objemu pájky, který vzorek na svých stěnách vytahuje z lázně. Je to zajímavé místo charakteristiky. Odtud jsme schopni počítat přesně, neboť již nepůsobí vztlaková síla, díky čemuž se upřesní odečet smáčecí síly.



- I – Zde již vzorek není v kontaktu s pájkou, křivka dosahuje svojí původní hodnoty, nekorigované nuly.



Křivky rovnováhy smáčení lze rozdělit podle jejich průběhů do osmi základních tvarů, podle kterých můžeme na první pohled odhadnout, jak je zkoumaný vzorek smáčen. Následující obrázek popisuje 8 nejčastějších případů, ke kterým při smáčení může docházet.



**Obrázek 9** Typické průběhy smáčecích charakteristik [2]

- A – nesmáčení – u ponořeného vzorku nedojde ke smáčení, jedinými silami působícími na vzorek je odporová síla povrchového napětí hladiny pájky a vztlaková síla.
- B – pomalé smáčení – ponořený vzorek se smáčí postupně. Nejprve dochází k jeho prohřátí a aktivaci tavidla. Následně postupně stoupá pájka na stěnu vzorku, až překoná korigovanou nulu a smáčecí síla tak překoná sílu vztlakovou.
- C – dobré smáčení – vzorek se po ponoření rychle prohřívá na požadovanou teplotu. Tavidlo je aktivováno a pájka rychle nastoupá na stěny vzorku.

- D – velmi rychlé smáčení – proces smáčení začíná, ještě než dojde k úplnému ponoření do lázně roztavené pájky. Smáčení je velmi strmé a nastoupání pájky je vysoké. Takový průběh hodnotíme jako téměř ideální.
- E – vztlková síla je vyšší než smáčecí – smáčení není ideální. Příliš slabé tavidlo, nečistoty vzorku, případně nevhodná povrchová úprava – toto jsou faktory, které jsou typické při podobném průběhu smáčecí charakteristiky.
- F – nerovnoměrný průběh smáčení – ke smáčení vzorku dochází nerovnoměrně. Například část vzorku se smáčí lépe a část hůře. Muže to být způsobeno nesourodostí vlastností vzorku. Vzorek také může být nevhodně uchycen, tak, že nedochází k rovnoměrné distribuci tepla, nebo je vzorek uchycen jinak, než kolmo ke klidné hladině pájky.
- G – mírné odsmáčení – vzorek se zpočátku dobře smočí jako u průběhu C nebo D, avšak v dalším průběhu dochází k oslabení účinnosti faktorů majících vliv pro smáčení. Zde je obtížné hodnotit, co způsobilo odsmáčení. Pokud je odsmáčení pouze mírné, můžeme ho zanedbat.
- H – značné odsmáčení – podobně jako v bodě G, avšak odsmáčení je již nezanedbatelné a musíme hledat jeho příčinu.

## 2. Měření a zpracování výsledků

### 2.1. Vyhodnocení různých povrchových úprav DPS

#### 2.1.1. Cíl měření různých povrchových úprav DPS

Hlavním cílem měření bylo seznámení se s měřicím zařízením a vyhodnotit smáčivost pro tři různé povrchové úpravy substrátu. V dalším bodě byl hodnocen postup přípravy substrátu před zapájením z hlediska jeho očištění a oplachu. Na počátku bylo nutné stanovit hlavní parametry meniskografu a určit vhodný měřicí postup v souladu s požadavky zadání.

#### 2.1.2. Parametry měření

Kvůli potřebě porovnávání výsledků bylo nutné používat jednotné vzorky a jednotné nastavení měřicího pracoviště. Po celou dobu pro všechna měření byly nastaveny stejné parametry ponoru. Hloubka ponoru vzhledem k velikosti vzorku byla určena na optimální 3 mm, doba ponoření v pájce 10 s, pro dostatečnou dobu prohřátí vzorků a rychlost ponoru  $0,02 \text{ ms}^{-1}$ . Byla použita výhradně čistá nová bezolovnatá pájka SAC 305 (tedy poměrné zastoupení Sn 96,5 Ag 3,0 Cu 0,5). Teplota pájky byla udržována na hodnotě obsažené v intervalu, který doporučuje výrobce pájky jako pracovní teplotu, tedy  $240^\circ\text{C}$ , což je  $23^\circ\text{C}$  nad bodem tání pájky, který je  $217^\circ\text{C}$ . Jako normované tavidlo byl zvolen roztok čisté kalafuny rozpuštěné v izopropylalkoholu v poměru kalafuna 25% hm. ku izopropylalkoholu 75% hm.

#### 2.1.3. Použité vzorky DPS

Vzhledem ke konstrukci meniskografu byly vybrány vzorky obdélníkového tvaru o rozměrech: výška 16 mm, šířka 8 mm a tloušťka 1 mm. Všechna měření probíhala na vzorcích substrátu FR4 s třemi druhy povrchových úprav, a sice čistá měď, chemicky nanesený cín a chemicky nanesená kombinace nikl – zlato. Všechna měření se opakovala v jedenácti cyklech a bylo vybráno 8 nejsourodějších výsledků. Vzorky byly vždy před ukotvením v meniskografu ponořeny do tavidla a jeho přebytek byl zasušen bezvláknovou utěrkou. Pro všechna měření byl použit meniskograf MK6A anglické výroby popsany výše.

#### 2.1.4. Výsledky smáčivosti různých povrchových úprav

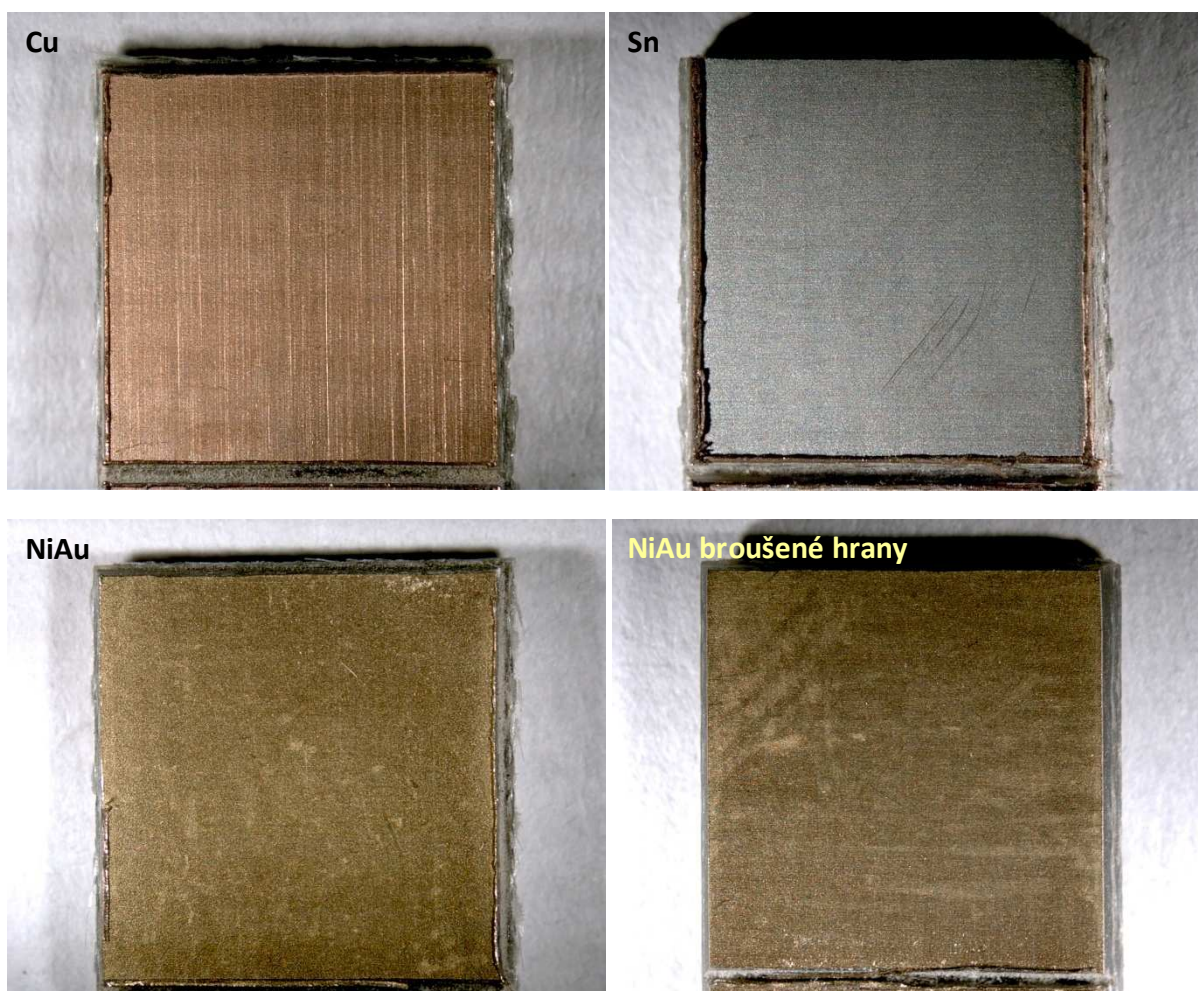
První část měření byla zaměřena na zhodnocení průběhu smáčivosti tří typů povrchových úprav.

- samotné mědi
- chemicky nanesené vrstvy Sn

- chemicky nanesené vrstvy Ni Au.

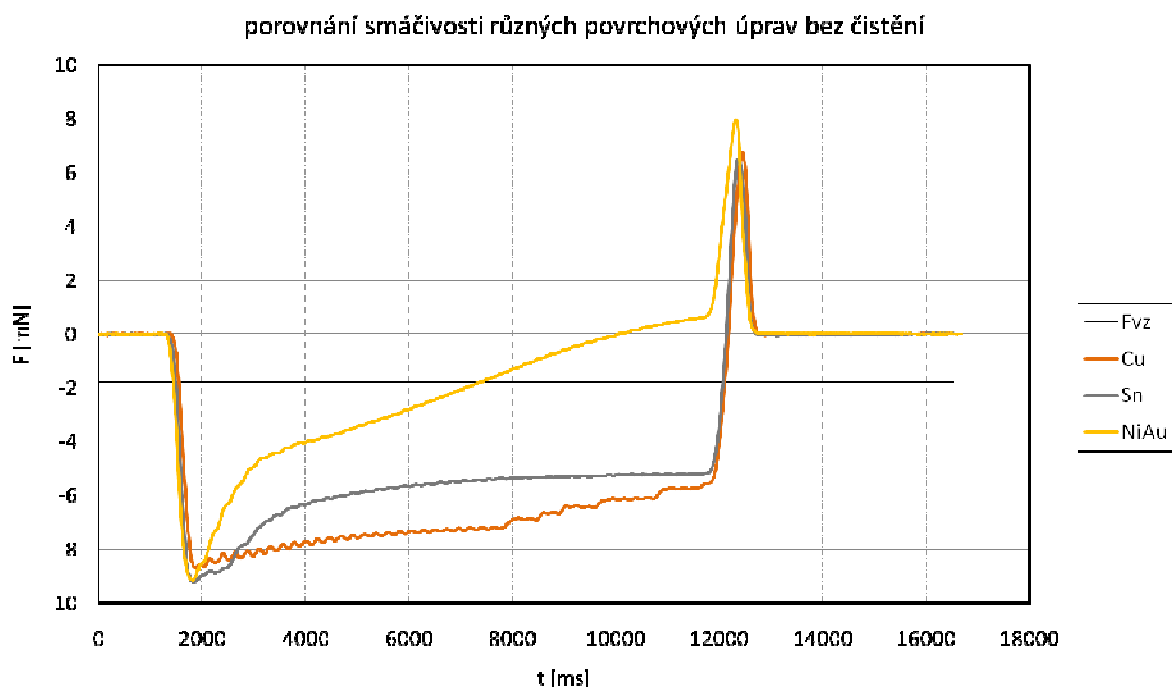
Měření bylo provedeno za použití nové pájky SAC305 v kombinaci s tavidlem na bázi přírodní pryskyřice rozpuštěné v IPA.

Všechny použité vzorky byly pečlivě zbaveny všech kovových špon a nerovností na hranách, které vznikly při drážkování a rozfrézování vzorků z přířezu velké DPS a to pomocí smirkového papíru hrubosti 1000. Všechny vzorky byly následně zbaveny mastnoty a nečistot použitím bezvlákné utěrky napuštěné izopropylalkoholem. Po celou dobu manipulace se vzorky je vhodné používat ochranné rukavice kvůli co možná nejmenší kontaminaci kovových povrchů.



**Obrázek 10** Fotografie vzorků s různou povrchovou úpravou

Vzorky byly očíslovány a seřazeny tak, aby všechny byly ponořovány sesouhlasenou stranou, stejně jak byly původně uloženy před frézováním DPS. Pro dosažení co nejpřesnějších výsledků byla všechna měření opakována na alespoň osmi vzorcích a výsledná křivka je tak dána aritmetickým průměrem všech výsledných hodnot (obr. 11)



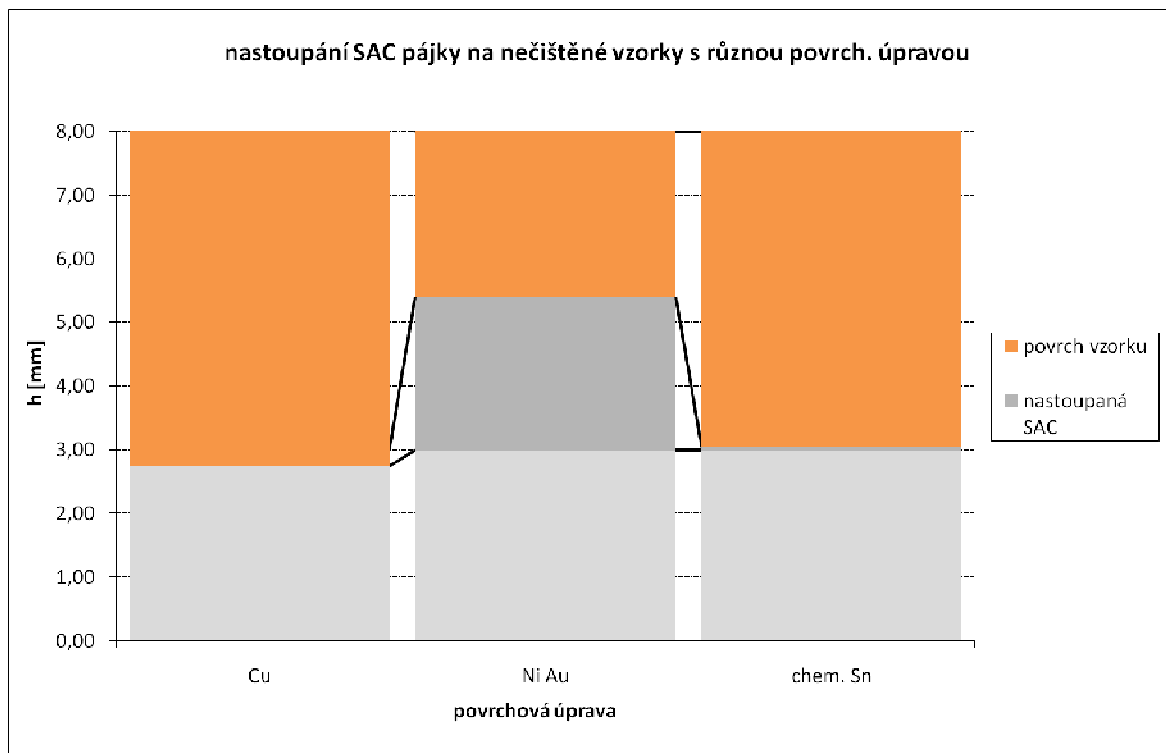
**Obrázek 11** Porovnání smáčivosti různých povrchových úprav bez čištění ultrazvukem

### 2.1.5. Zhodnocení výšky nastoupení pájky

Pro doplnění údajů patrných z tabulky jsem změřil výšku navzlínání pájky na jednotlivé vzorky pomocí posuvného měřidla a tyto údaje jsem zadal do tabulky 2 a vynesl do grafu na obrázku 12.

**Tabulka 2** Výška navzlínání pájky na DPS s různou povrchovou úpravou

		úprava bez čištění v UZV		
		Cu	Ni Au	chem. Sn
strana 1	vzorek			
	1	2,52	5,30	2,54
	2	2,47	5,60	3,04
	3	2,63	5,84	3,32
	4	2,81	4,72	2,76
	5	3,02	5,62	3,24
	6	2,91	5,48	3,00
	7	2,81	5,38	3,18
strana 2	8	2,54	5,92	2,90
	1	2,67	5,44	2,88
	2	2,53	5,00	2,86
	3	2,71	5,16	2,62
	4	2,95	5,88	3,52
	5	3,11	4,82	2,74
	6	2,98	5,10	3,30
	7	2,72	5,84	4,04
8	2,54	5,32	2,78	
průměr		2,75	5,40	3,04
korekce -3mm		-0,25	2,40	0,04
nastavený ponor		3,00	3,00	3,00
nastoupení		-0,25	2,40	0,04
zbytek do 8mm		5,25	2,60	4,96



**Obrázek 12** Hodnocení výšky navzlínání pájky

Pro přehlednost výsledků bylo zvoleno jejich vynesení do sloupcového grafu (obr. 12) a pro patrnost je doplněna i část ponoru a část, na kterou již pájka nenavzlínala (zbytek do 8 mm). Měření výšky byla prováděna opakovaně na obou stranách osmi vzorků a vynesena do tabulky, kde jsou všechny rozměry uvedeny v mm. Korekce – 3mm znamená korekci ponoru (nastaven na 3 mm), nastoupání je rozdíl ponoru a toho, jak pájka ve skutečnosti nastoupala a zbytek do 8 mm je zbývající část vzorku, která zůstala bez vrstvy pájky. Vše v tabulce 1.

Z obrázku 12 vyplývá, že nejlépe nastoupala pájka na substrát s povrchovou úpravou NiAu (dle očekávání z grafu obr. 11). Na desku plošného spoje s povrchovou úpravou chemický Sn pájka po deseti sekundách v lázni vyrovnala hloubku ponoru a u vzorků, kde byla použita čistá měď, se nepodařilo dosáhnout ani tohoto výsledku a pájka zůstala 0,26 mm pod úrovní nastaveného ponoru do lázně.

## 2.2. Vyhodnocení vlivu předmontážního čisticího prostředku

### 2.2.1. Výběr čisticích prostředků

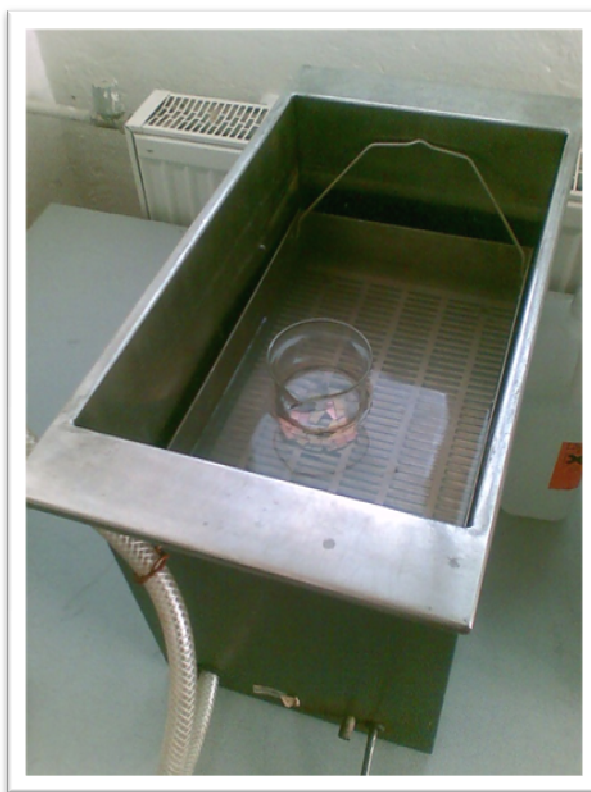
Pro srovnání vlivu oplachu byli vybráni tři zástupci tekutých oplachů určených na ošetření DPS. Vliv ultrazvukového oplachu bude nejvíce patrný při srovnání s průběhy, kdy vzorky nebyly před zkouškou omyty (obr. 11).

Při výběru oplachových kapalin jsme volili z velkého množství výrobků tak, abychom zastoupili tři skupiny – klasická odmašťovací chemikálie, výrobek na vodní bázi a výrobek vodu neobsahující. Jednalo se o rozpouštědlo izopropylalkohol (IPA), dále výrobek firmy DCT Proton42 a výrobek F10 téhož výrobce.

- Proton 42 – zástupce výrobku, který neobsahuje vodu. Popis dle výrobce [3]: „Mycí kapalina určená pro odstranění zbytků tavidel po pájení DPS, určeno pro aplikace, kde není povolen obsah vody v mycí kapalině, rychle schnoucí médium oproti vodní bázi“. Dle tabulek výrobce je proton 42 vhodný pro aplikaci ultrazvukového oplachu.
- Izopropylalkohol –  $\text{CH}_3\text{OH}(\text{CH}_3)$  - propan-2-ol, nebo-li 2-propanol. Jedná se o hořlavou, čirou kapalinu ostrého alkoholového zápachu. Téměř čistý se používá zejména díky jeho vynikajícím odmašťovacím schopnostem.
- Decotron F10 – zástupce výrobků na vodní bázi se směsí modifikovaných alkoholů.

### **2.2.2. Vyhodnocení výsledků měření**

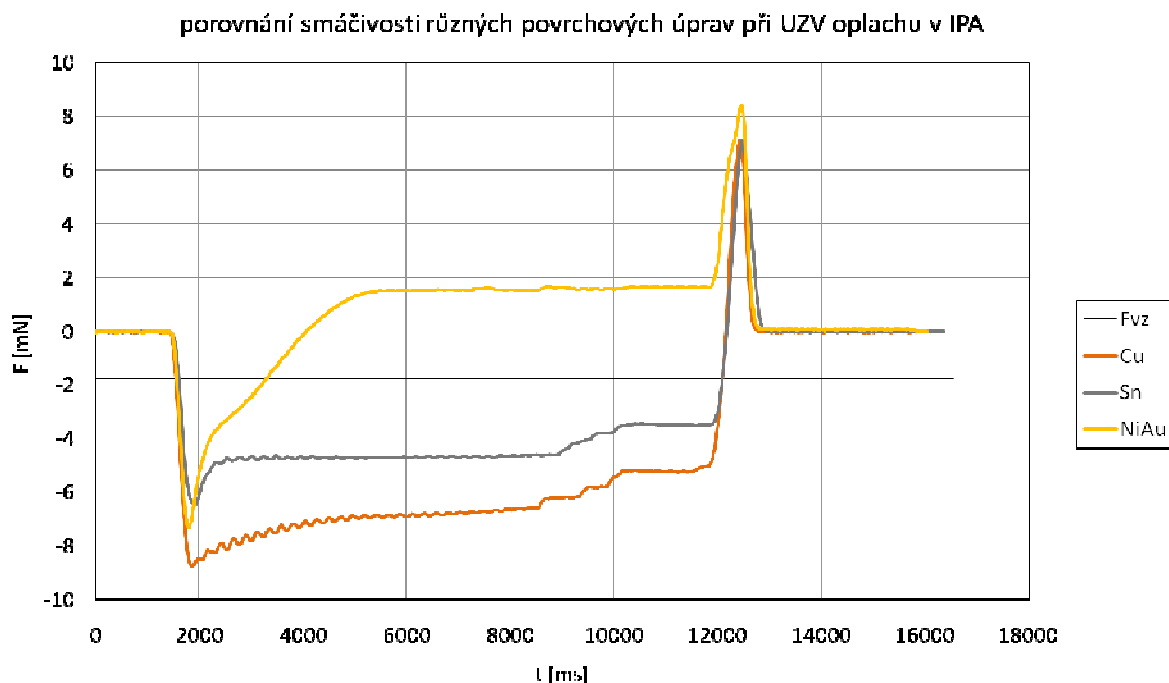
Všechny vzorky tří povrchových úprav byly ponořeny do kádinky s 200 ml lázni příslušných čisticích a po dobu 5 minut vloženy v ultrazvukové čističce. Jako médium pro přenos ultrazvuku byla čistička naplněna deionizovanou vodou (obr. 13).



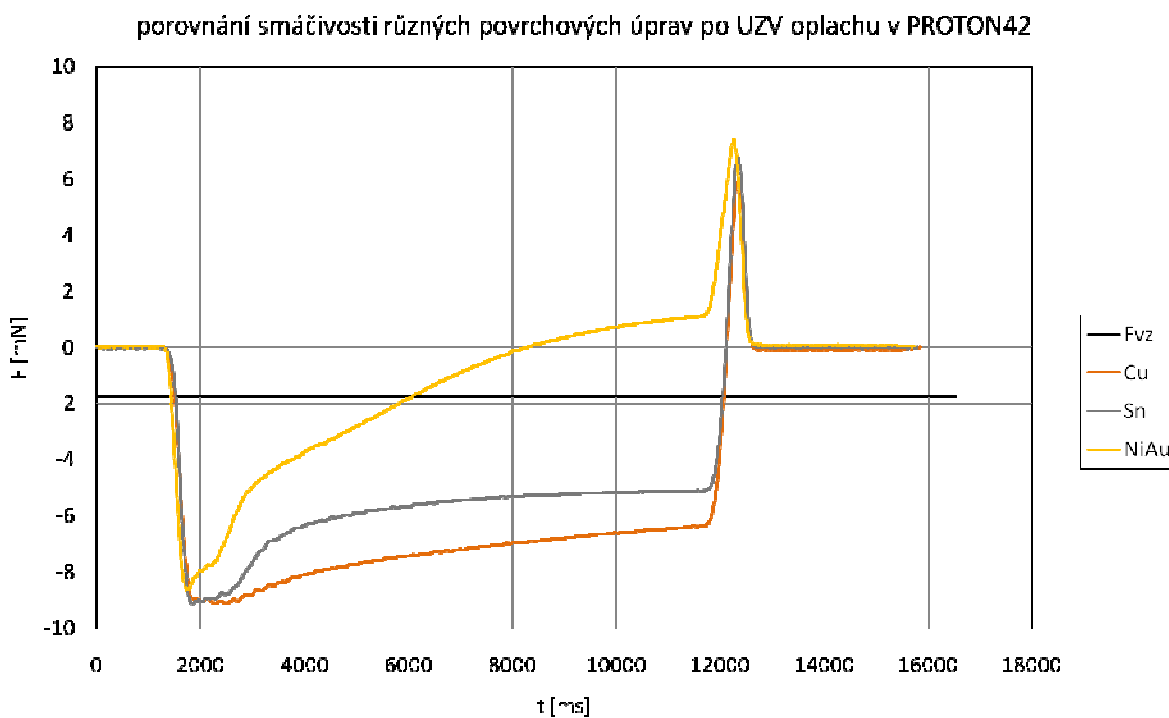
**Obrázek 13** Čištění vzorků v ultrazvukové myčce



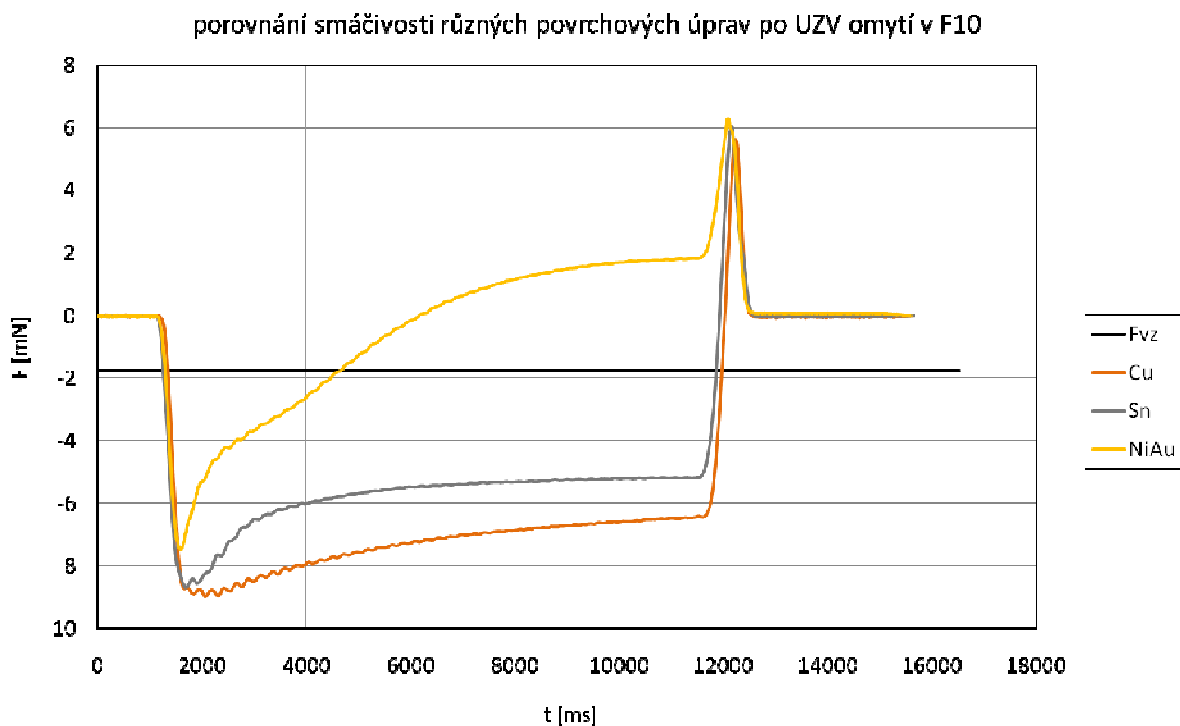
Po vyjmutí z čistících roztoků byly vzorky pečlivě osušeny. Při zkoušce na meniskografu bylo opět použito normované tavidlo z rozpuštěné kalafuny, viz výše. Na jednotlivých obrázcích jsou pro srovnání vždy uvedeny zástupci všech tří povrchových úprav. Opět jsem provedl měření pro deset vzorků každého typu a výsledek je dán výsledným průměrem všech měření.



**Obrázek 14** Porovnání smáčivosti různých povrchových úprav DPS po UZV oplachu v IPA



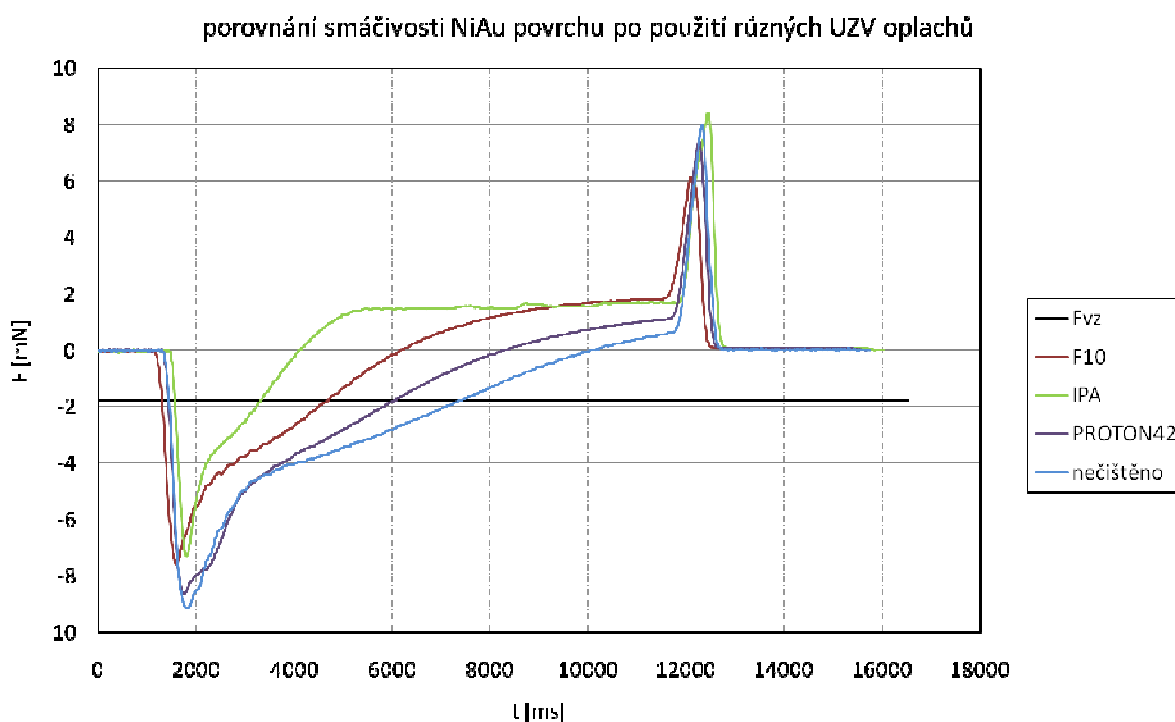
**Obrázek 15** Porovnání smáčivosti různých povrchových úprav DPS po UZV oplachu v PROTON42



**Obrázek 16** Porovnání smáčivosti různých povrchových úprav DPS po UZV oplachu v F10

Z grafů (obr. 14, obr. 15 a obr. 16) lze snadno vyčíst, že povrchová úprava NiAu vykazovala zdaleka největší smáčivost. Vzhledem k použití starších vzorků je patrné, že právě povrchová úprava NiAu vykazuje i po delším čase skladování oproti ostatním poměrně dobrou pájitelnost. Zklamáním byla zejména velmi špatná smáčivost mědi, která byla ošetřena inhibitory, které byly před měřením omyty ředidlem R6000. U všech případů bohužel však nelze označit za pájitelnou ani povrchovou úpravu chemického cínu, který taktéž nebyl schopen při skladování odolat degradaci.

Nicméně cílem této kapitoly je porovnat vliv oplachu, k čemuž výsledky plně postačují. Rozdíly jsou na první pohled patrné. Pokud se zaměřím na průběhy křivky NiAu (obr. 15) je vidět, že zdaleka nejlepšího průběhu dosáhneme při oplachu v IPA, který nejlépe zbavuje vzorek nečistot a mastnoty. Vzorek také dosáhl nevyšší hodnoty smáčecí síly okolo 3,4 mN. Na druhé místo rozhodně zařazuji kapalinu F10, která způsobila nepatrně rychlejší smáčení než Proton42. Stejně hodnoty smáčecí síly 3,4 mN jako u IPA dosahuje však o 6 sekund později, což je poměrně špatný výsledek. Pokud srovnáme výsledky ještě s obr. 11, u kterého byl UZV oplach vynechán zcela, tak všechny tři kapaliny nepochybně urychlily proces smáčení.



**Obrázek 17** Porovnání smáčivosti NiAu povrchu po použití různých UZV oplachů

Díky těmto výsledkům tedy hodnotím jako zásadní vliv na smáčecí charakteristiku zbavení vzorků mastnoty, čemuž nejlépe posloužil k tomu určený izopropylalkohol. Ostatní oplachové kapaliny bych však hodnotil jako nedostatečně účinné. Smáčení probíhalo pomalu a hodnoty smáčecí síly 3,4 mN dosáhla nakonec pouze F10.

Pro další porovnání ještě přikládám graf (obr. 18), který vynáší závislost průběhu kontaktního úhlu na čase. Výsledky jsem získal dosazením do rovnice (6) pro výpočet kontaktního úhlu, kterou jsem odvodil z rovnice (5):

(5)

a z toho:

(6)

Výsledný graf je tvarově invertovaný k obr. 16. Můžeme vyčíst, že při síle 1,8 mN svírala hladina pájky a stěna vzorku úhel asi 63°. Takovýto úhel však stále ještě odpovídá dle rozdělení smáčecích úhlu hodnocení špatně smáčivého povrchu. Avšak na počátku smáčení jsme s IPA dosáhli nejvyššího kontaktního úhlu asi 140°. Pokud vzorek nebyl čištěn vůbec, dosáhl kontaktní úhel dokonce hodnoty maximální, tedy 180°. Grafy průběhů kontaktního úhlu pro zbylé povrchové úpravy a oplachy jsou doloženy v příloze (obr. příloha 1 až 6).



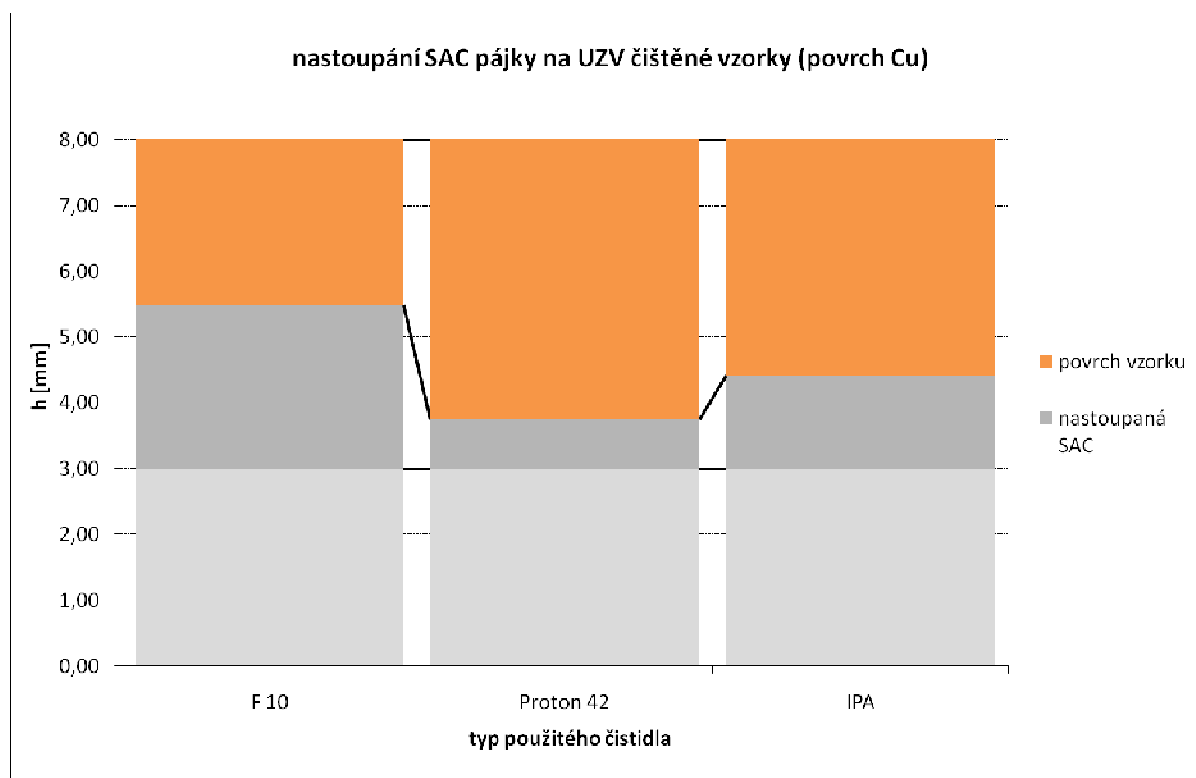
**Obrázek 18** Porovnání průběhů kontaktního úhlu při smáčení povrchové úpravy DPS NiAu

### 2.2.3. Zhodnocení výšky nastoupání pájky

Pro dobře zapájený spoj je důležité kromě smáčecí charakteristiky sledovat také výšku nastoupání pájky na povrch. Pro posouzení byly použity tři typy oplachových chemikálií jako z předchozích měření. Měření jsem provedl na pájce nastoupané na novější vzorky - čistá měď laminovaná na základový substrát FR4. Vzorky byly zbaveny inhibitorů pomocí ředidla R6000. Poté byly vloženy na 5 minut do 200 ml lázně příslušného čistidla, poté byly důkladně usušeny. Aplikoval jsem normované tavidlo 25% kalafuna ku 75% IPA a provedl test smáčivosti na pájce SAC 305 se stejně nastavenými parametry meniskografu jako u předchozích měření. Po zapájení 32 vzorků - každá oplachová chemikálie 8, jsem provedl měření nastoupání pájky na kovový povrch pomocí posuvného měřidla a hodnoty vynesl do tabulky 3.

**Tabulka 3** Výška navzlínání pájky

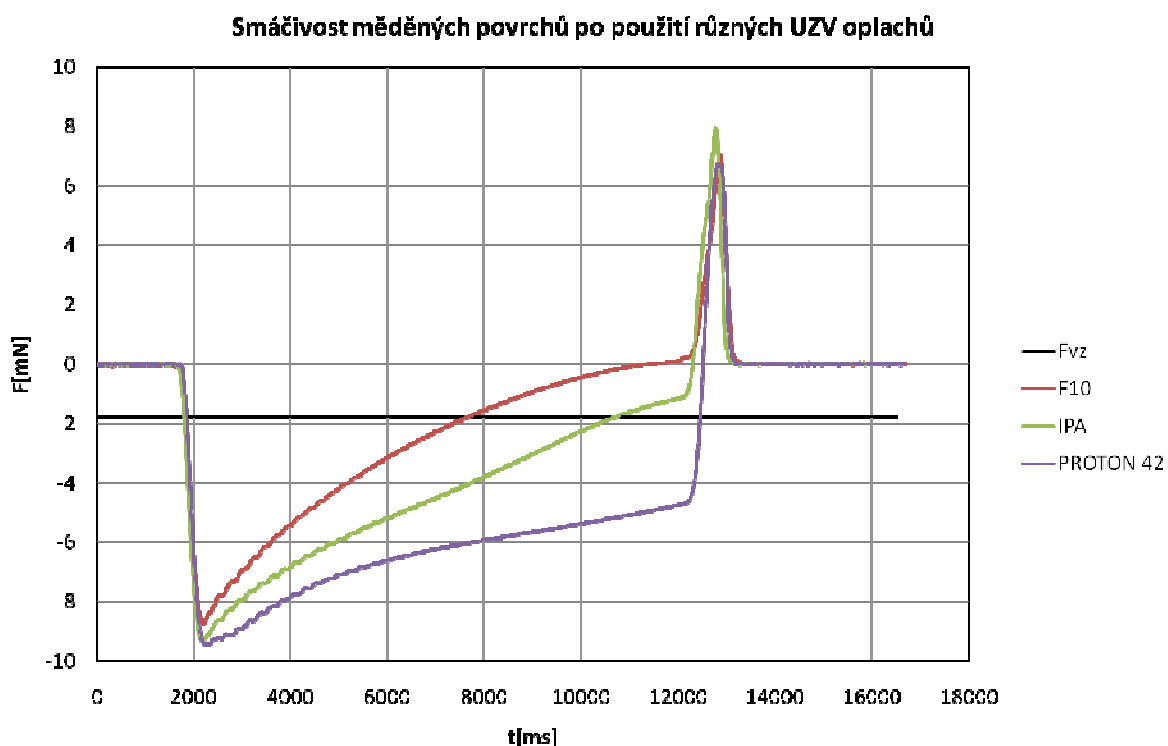
		oplach		
		F 10	Proton 42	IPA
strana 1	vzorek			
	1	5,54	3,98	5,20
	2	6,20	3,68	4,58
	3	5,66	3,24	4,58
	4	5,50	4,42	3,82
	5	5,00	4,28	4,10
	6	5,48	3,44	3,54
	7	5,70	3,66	4,78
strana 2	1	5,50	3,96	5,24
	2	5,96	3,80	4,26
	3	5,94	3,20	4,22
	4	5,64	4,08	3,94
	5	3,90	4,02	4,68
	6	4,98	3,52	4,36
	7	5,92	3,86	4,88
	8	5,40	3,22	4,02
průměr		5,49	3,75	4,42
korekce -3mm		2,49	0,75	1,42
nastavený ponor		3,00	3,00	3,00
nastoupání		2,49	0,75	1,42
zbytek do 8mm		2,51	4,25	3,58



**Obrázek 19** Hodnocení výšky navzlínání pájky

Vzorky byly vyneseny do grafu (obr. 19) a tabulky (tab. 2) se stejnými parametry, jak bylo uvedeno v kapitole 2.1.4. Byly použity vzorky novější šarže než u předchozích měření. Z grafu lze vyčíst, že nejvyšší hodnotu navzlínání dosahujeme použitím oplachu v F10. Oproti

izopropylalkoholu pájka nastoupala o 43% výše a oproti PROTONU42 dokonce o 70%. Pro doplnění a možnost porovnání připojuji průběh smáčecích vah (obr. 20).



**Obrázek 20** Porovnání smáčivosti měděných povrchů při použití různých UZV oplachů v kontextu výšky nastoupání pájky

Usuzuji tedy, že při porovnání s výsledky z předchozí kapitoly, kde si nejlépe vedl IPA, poslouží jako velmi dobrá předoplachová kapalina i F10, která zlepšuje smáčivost u novějších vzorků účinněji než IPA. Z již provedených měření je taky zřejmé, že volba oplachů je velmi závislá na rozptylu parametrů jednotlivých měření, jakými jsou zejména stáří vzorků, jejich předoplachové znečištění a míra degradace kovových povrchů.

### 2.3. Posouzení vlivu VOC a VOC free tavidla na smáčivost

V další části měření se budu zabývat vlivem použití VOC a VOC free tavidel. Jako zástupce obou skupin jsem zvolil tavidlo výrobce Avantec - Ecofrec 202 a tavidlo výrobce Kester – 979T. Obě tavidla jsou navržena dle údajů výrobce pro bezolovnatý pájecí proces.

#### 2.3.1. Příprava vzorků

Vzhledem k redukci rozptylu parametrů, kterou jsem zmiňoval v předchozí kapitole a vzhledem k povaze tohoto měření jsem přistoupil na změnu použitých vzorků. FR4 DPS nahradily obdélníčky mědi o rozměrech: výška 10 mm, šířka 8 mm. Vzorky byly vystříhány z 0,55 mm silného měděného plechu pomocí tabulových a pákových nůžek. Podle výrobce

plechu se jednalo o 99,5% čistou měď. Po vystříhání došlo u některých vzorků k mírnému zprohýbání, proto jsem všechny vzorky vyrovnal pomocí ručního lisu.

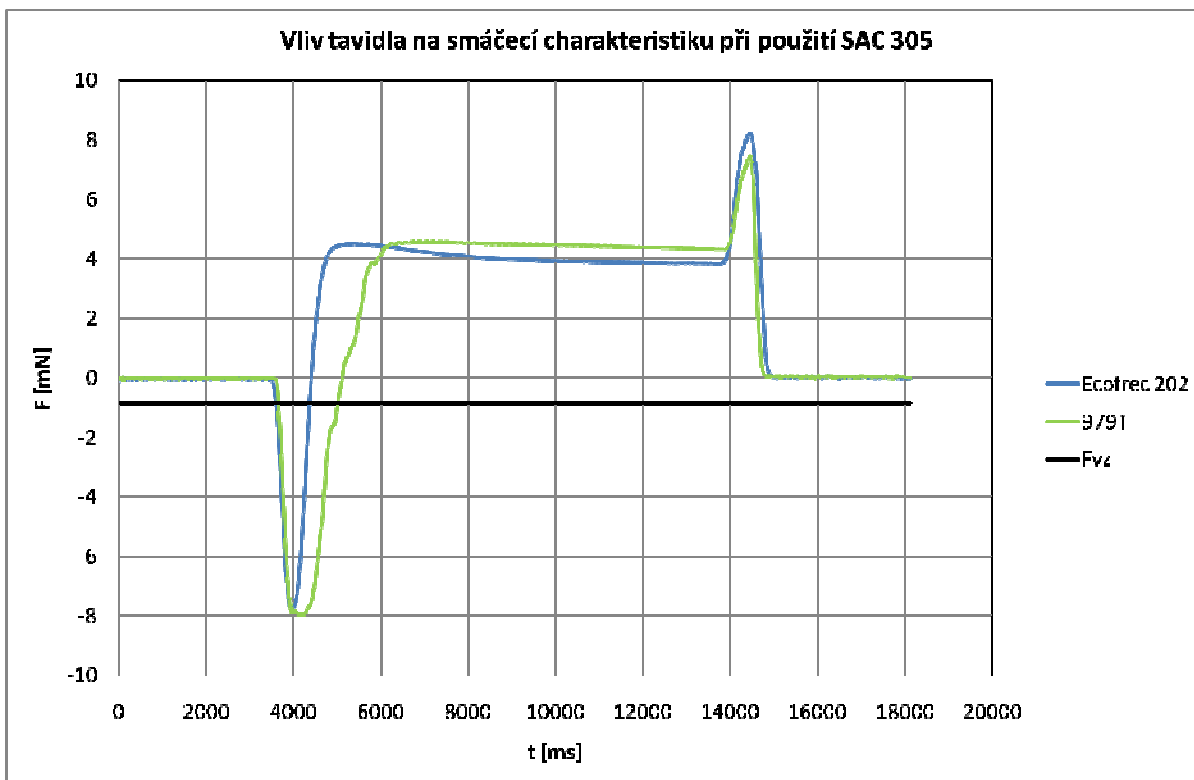


**Obrázek 21** Fotografie celoměděného vzorku

Před samotným testováním pájitelnosti jsem věnoval zvýšenou pozornost dokonalé čistotě měděného povrchu. Pro maximální čistotu byly vzorky nejprve očištěny pomocí izopropylalkoholu kvůli jejich odmaštění. Po odmaštění proběhlo ultrazvukové čištění v Protonu 42, které mělo za úkol zbavit povrch všech nečistot před operací mikroleptu, pro kterou musí být povrch dobře očištěn a zbaven zejména mastnoty. Pro mikrolept jsem použil roztok kyseliny sírové a dusičné rozředěné v izopropylalkoholu v následujícím poměru: 95% hm. IPA, 3% hm.  $\text{HNO}_3$  a 2% hm.  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Tento slabý roztok kyselin odleptá během asi jedné minuty horní vrstvu mědi tloušťky řádově asi  $1\ \mu\text{m}$ . Díky tomu obnažíme čerstvý povrch mědi, který by měl být absolutně čistý. Po vyjmutí vzorků z mikroleptu je třeba nechat vzorky důkladně uschnout. Musíme kvůli oxidaci však pracovat rychle. Proto jsme zvolili roztok kyselin v izopropylalkoholu, který se okamžitě odpařuje a vzorky tak uschnou velmi rychle.

### **2.3.2. Vyhodnocení výsledků měření**

Pro měření smáčecích charakteristik byl opět nastaven meniskograf jako u ostatních měření, tedy doba ponoru 10 s, hloubka 3 mm, rychlost ponoru  $0,02\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , teplota pájky 23 - 25°C nad bodem tání slitiny. Pro první sérii měření jsem použil pájku SAC 305 a tedy pracovní teplotu tedy 242°C. Výsledky jsou vyneseny na obr. 22.



**Obrázek 22** Vliv tavidla na smáčecí charakteristiku při použití pájky SAC 305

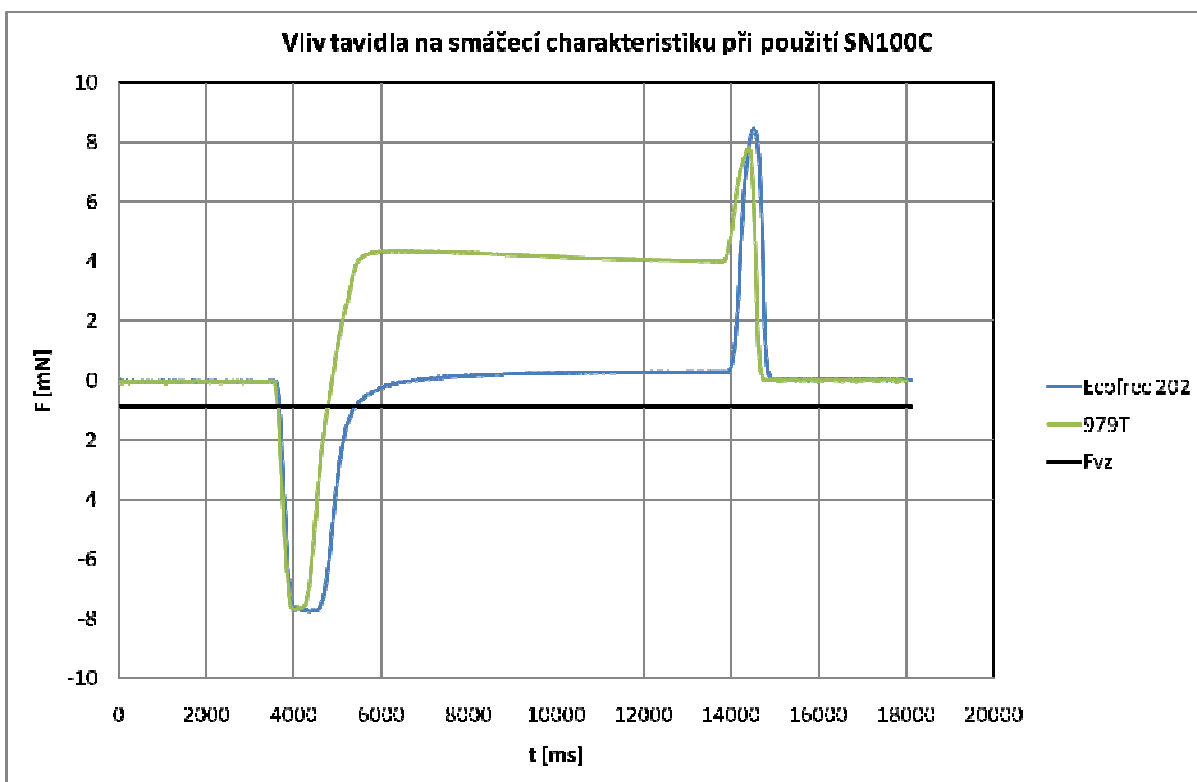
Z průběhu vyčteme, že tavidlo 979T mělo téměř dvakrát pomalejší rychlost aktivace a smáčecí proces nebyl tak strmý jako u tavidla Ecofrec 202, které však vykázalo mírné odsmáčení. S použitým tavidlem 979T se navíc vyskytly nerovnosti v oblasti stoupání pájky, docházelo k mírně nerovnoměrnému smáčení. Celkově hodnotím jako lepší tavidlo Ecofrec 202 pro tuto technologickou kombinaci.

Pro další měření jsem použil pájku SN100C. Parametry měření zůstaly zachovány, jen se samozřejmě změnila pracovní teplota a to na 252°C. Výsledky měření jsou vyneseny do grafu (obr. 23).

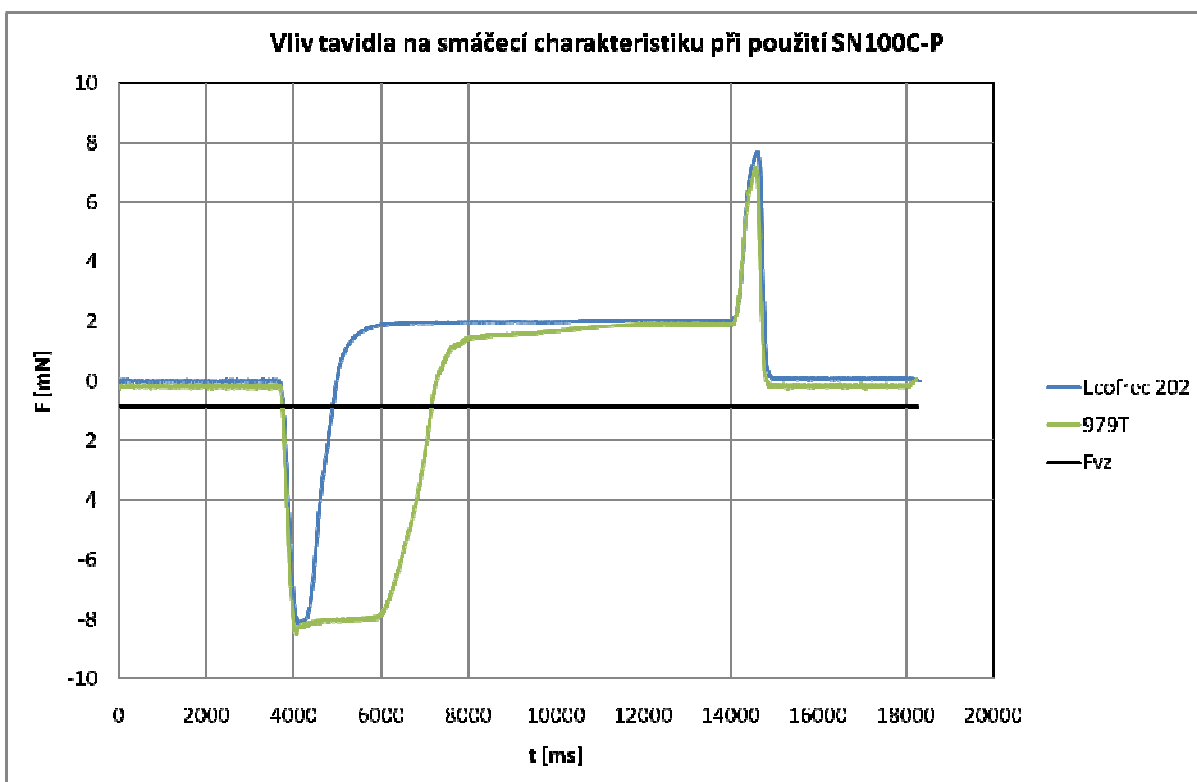
Vidíme, že VOC free tavidlo 979T jasně předčilo Ecofrec 202. Smáčecí síla, které jsem při měření dosáhl s tavidlem 979T, byla dvojnásobná oproti Ecofrecu. Lépe pro 979T vyznívá i doba aktivace tavidla, která je proti Ecofrecu poloviční. Celkově se všechny vzorky při použití tavidla 979T a pájky SN100C smáčely velmi dobře a to i bez předehřevu, který bude tématem následujících měření.

K dispozici jsme měli i novou slitinu SN100C-P, která se od SN100C liší o přidané malé množství fosforu. Pracovní teplota zůstává zachována stejná jako u SN100C. Fosfor má působit jako antioxidační činidlo. Již od prvního měření bylo zřejmé, že hladina roztavené pájky zůstává velmi dlouho kovově lesklá a množství oxidů, které je třeba před každým ponořením vzorku do lázně odstraňovat ve srovnání s SAC305 a SN100C, je opravdu minimální. Průběhy s touto zajímavou slitinou jsou vyneseny na obr. 24.





**Obrázek 23** Vliv tavidla na smáčecí charakteristiku při použití pájky SN100C



**Obrázek 24** Vliv tavidla na smáčecí charakteristiku při použití pájky SN100C-P

Z obrázku 24 je patrné, že i malé procento fosforu obsažené v této slitině dramaticky ovlivňuje dobu aktivace tavidla. Oproti aktivaci Ecofrecu 202, která nastala během 300 ms, trvala aktivace 979T celé 2 s. Dalším bodem, nad kterým bych se pozastavil, je velikost smáčecí síly, která není oproti ostatním slitinám nijak oslnivá. V maximu dosahuje

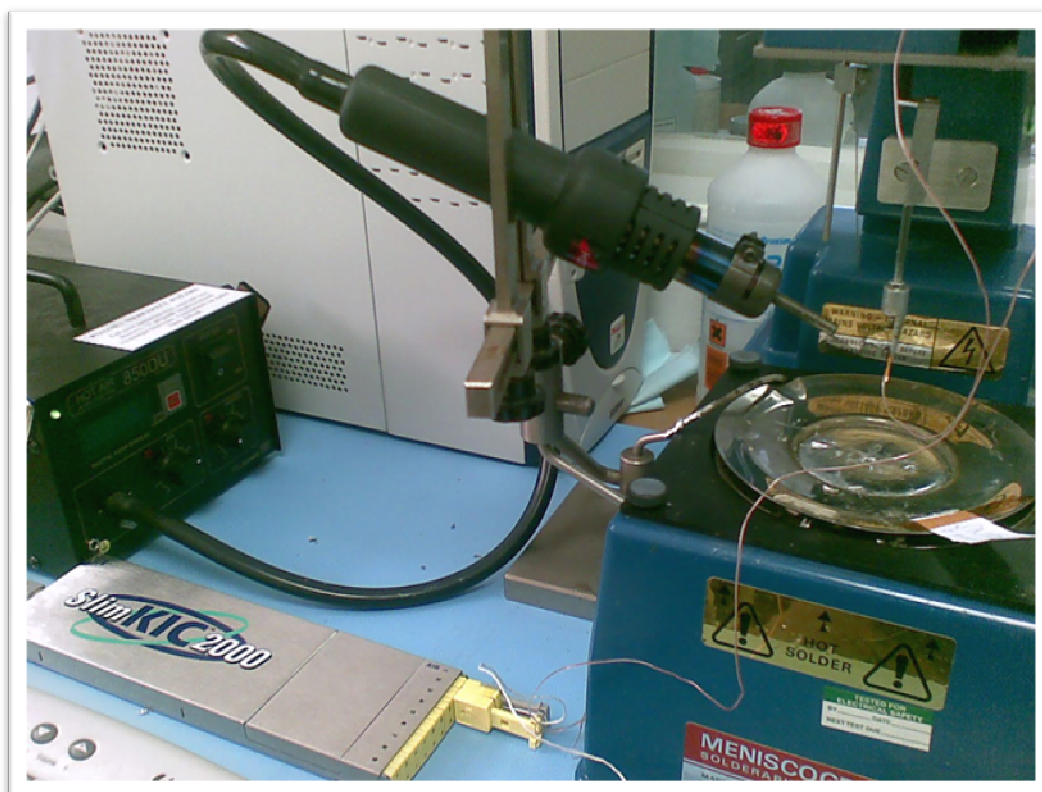
asi 3,7 mN pro obě použitá tavidla. Důležité bude tedy také sledování výšky navzlínání pájky na stěnu vzorku, které je uvedeno v tabulce 2 následující kapitoly.

## 2.4. Sledování vlivu předehřevu na smáčivé charakteristiky

### 2.4.1. Nastavení parametrů měření

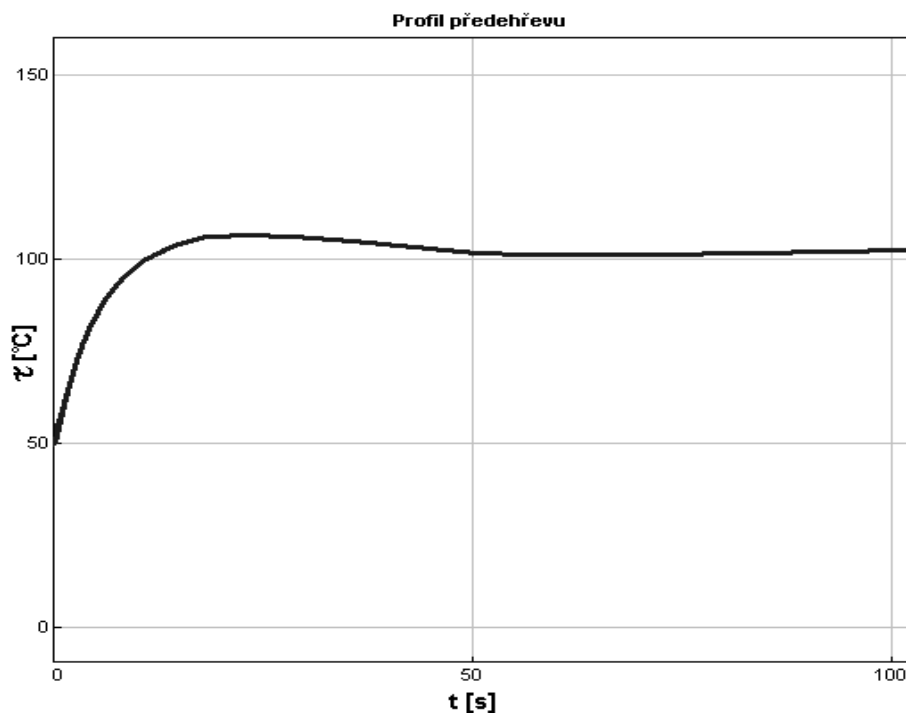
Předehřev vzorků má zásadní dopad na tvar smáčecí charakteristiky. Pokud urychlíme distribuci tepla do vzorku tím, že ho před ponořením do roztavené pájky předehřejeme, tak bychom měli získat kvalitnější výsledky, zejména v rychlosti začátku smáčení a strmosti smáčecí charakteristiky.

K předehřevu jsem využil horkovzdušnou pájecí stanicí HOT-AIR 850DU, která umožňuje jak nastavení teploty vzduchu, tak i intenzitu, s jakou je horký vzduch vyfukován z trysky. Díky konstrukci meniskografu bylo nutné využít posuvný držák a upevnit do něj horkovzdušnou trysku tak, aby bylo možné proměřit všechny potřebné vzorky s reprodukovatelnými výsledky. Při nastavování jsem umístil hrdlo trysky tak, aby dostatečně intenzivně ofukovala vzorek. Je však nutné také dbát na to, aby vzduch, který vzorek ofukuje, příliš nečeřil hladinu roztavené pájky, což by značně snižovalo přesnost měření. Pro ilustraci uvádím fotografii pracoviště s předehřevem na obr. 25.



**Obrázek 25** Fotografie měřícího pracoviště předehřevu

Pro nastavení teplotního profilu jsem využil teplotní profiloměr SlimKIC2000. Na měděný vzorek jsem pomocí kaptonové lepicí pásky, která je určena pro práci při vysokých teplotách, umístil vývod termoelektrického členu. Těsně před vzorek jsem umístil referenční vývod, který spouští samotné měření při zvýšení okolní teploty. Vzorek s takto nastavenými senzory jsem umístil do držáku meniskografu a nechal jej nad kalichem s roztavenou pájkou, která také teplotně ovlivňuje výsledný profil. Nastavováním stojanu a parametrů horkovzdušné pistole jsem dosáhl optimálního průběhu profilu předehřevu, který jsem uvedl na obrázku 26.



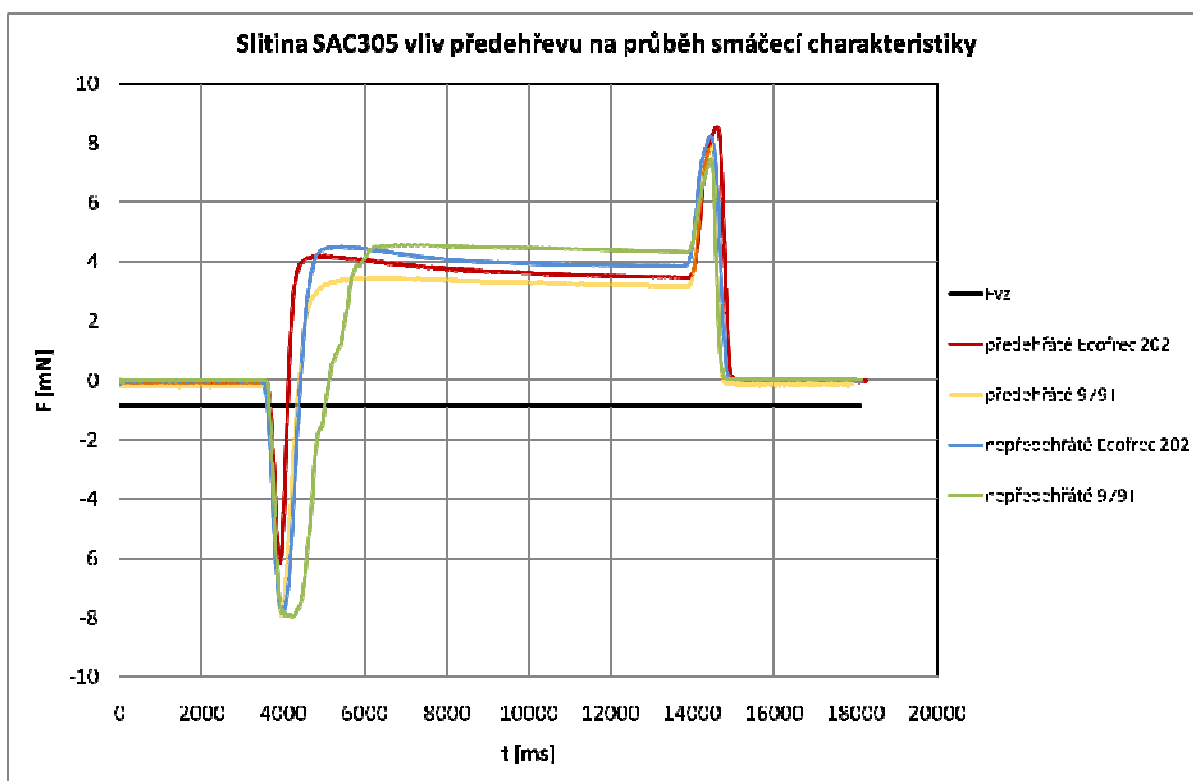
**Obrázek 26** Nastavení teplotního profilu pro předehřev pomocí SlimKIC2000

Bylo velmi důležité, aby všechny vzorky, které budou podrobeny měření, byly předehřáté na stejnou teplotu. Podle údajů technologických listů výrobců pájek se ideální teplota při předehřevu pohybuje v intervalu (100 – 105)°C. Proto jsem profil nastavil tak, aby byla teplota po jedné minutě předehřevu těsně nad hranicí 100°C a dále již nestoupala. Znamenalo to ofukovat vzorek asi ze vzdálenosti 4 cm, vzduchem o teplotě 225°C s nastavením intenzity ofuku air = 6. Každý vzorek, který byl poté ihned měřen, jsem nechal ofukovat přesně 60 s, což by mělo zajistit dostatečné prohřátí.

### **2.4.2. Vyhodnocení výsledků měření**

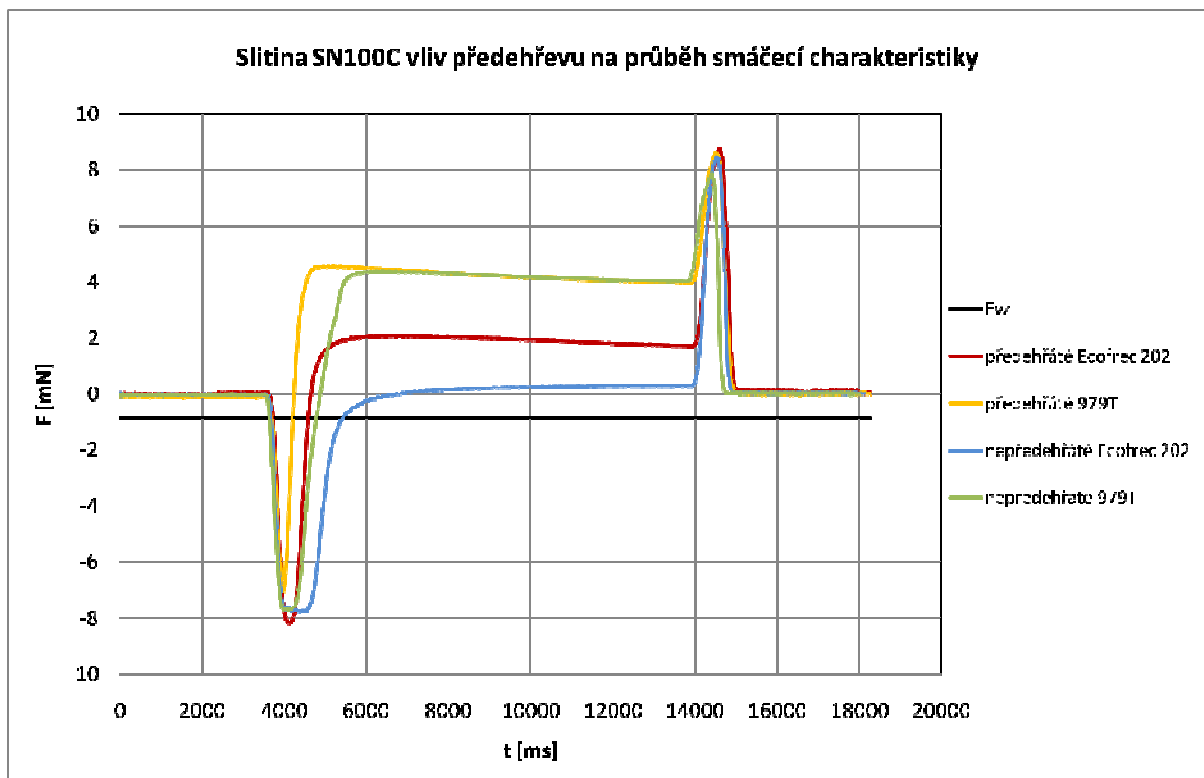
Pro měření smáčecích profilů jsem využil hned tři pájecí slitiny a sice SAC305, SN100C a SN100C-P. Použil jsem i dvě tavidla zástupce VOC (Ecofrec 202) a VOC free (979T). Už při průběhu měření bylo patrné, že předehřev jasně ovlivňuje smáčení. Aktivovaná tavidla urychlovala proces smáčení, který měl mnohem prudší nástup než při dosavadních měřeních. Na prvním grafu (obr. 27) jsou výsledky dosažené se slitinou SAC 305. Na druhém grafu (obr.

28) jsou výsledky se slitinou SN100C a na třetím grafu (obr. 27) jsou výsledky při použití SN100C-P.



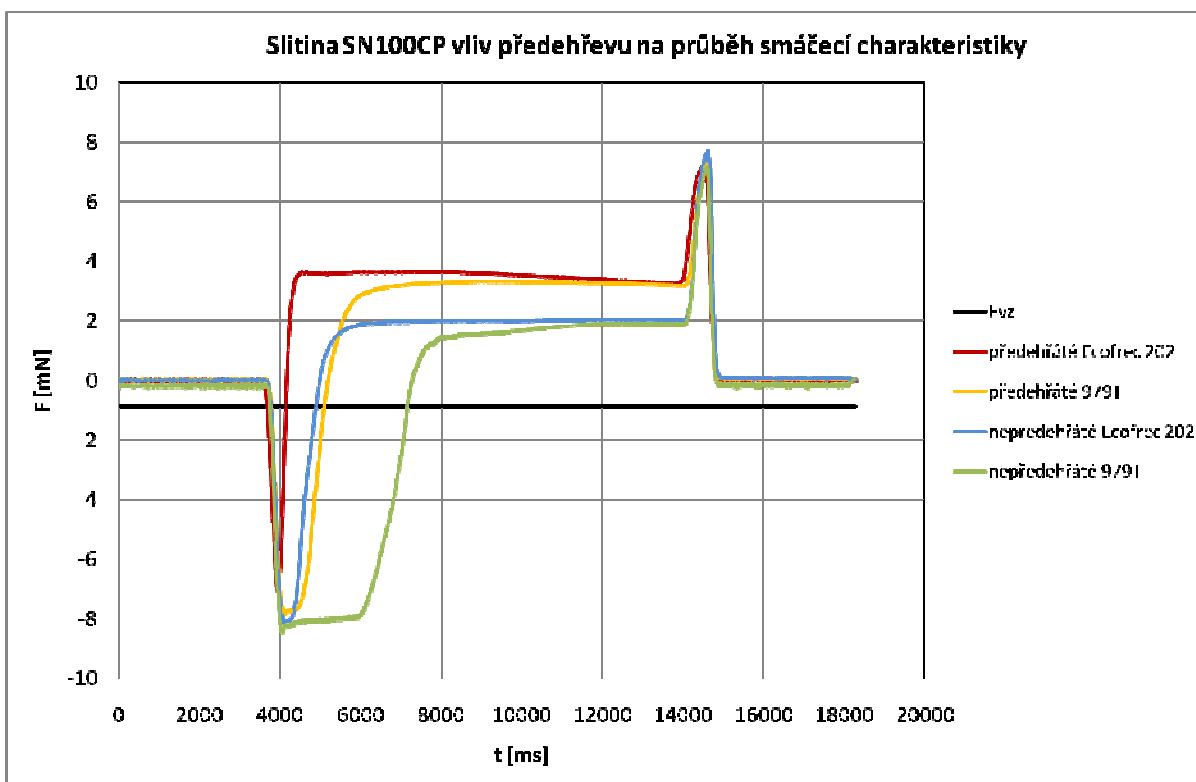
**Obrázek 27** Vliv předehřevu na smáčecí charakteristiku slitiny SAC305

Při použití předehřevu pro slitinu SAC305 je patrné, že je ovlivněna zejména rychlost smáčení. Pro obě tavidla znamenal předehřev nepatrně rychlejší nástup smáčení. Zejména patrné je to pro tavidlo 979T, kde byla bez předehřevu prodleva asi 0,8 sekundy. Oba průběhy s předehřevem zaznamenaly nepatrně menší smáčivou sílu oproti výsledkům bez předehřevu. Pro pájení se slitinou SAC305 bych na základě těchto výsledků doporučoval jednoznačně použití VOC tavidla Ecofrec 202, které má při předehřevu velmi rychlý nástup. Vykazuje sice mírné odsmaččení, ale i tak mírně překonává tavidlo 979T, které ztrácí zejména v rychlosti nástupu smáčecího procesu.



**Obrázek 28** Vliv předehřevu na smáčecí charakteristiku slitiny SN100C

Při hodnocení průběhů se slitinou SN100C je z grafu (obr. 28) patrný velký rozptyl křivek. Tavidlo Ecofrec 202 není vhodným tavidlem pro aplikace s použitím této slitiny. Předehřev vzorků sice znamenal zlepšení jak rychlosti smáčení, tak i velikosti smáčecí síly, avšak zdaleka nedosahuje takových výsledků jako tavidlo 979T. Pro 979T znamenal předehřev urychlení nástupu smáčení o 0,4 s. Výsledná smáčecí síla zůstala stejná a to na hodnotě asi 4,8 mN. Pokud bych tedy volil nejlepší kombinaci, byl by to předehřev s VOC free tavidlem 979T, jehož charakteristika byla téměř ideální až na mírné odsmačení. Zklamáním je výsledek kombinace VOC tavidla a této pájky. Zřejmě není toto tavidlo dost aktivní, i když v kombinaci se slitinou SAC305 jsem ho hodnotil jako lepší.



**Obrázek 29** Vliv předehřevu na smáčecí charakteristiku slitiny SN100C-P

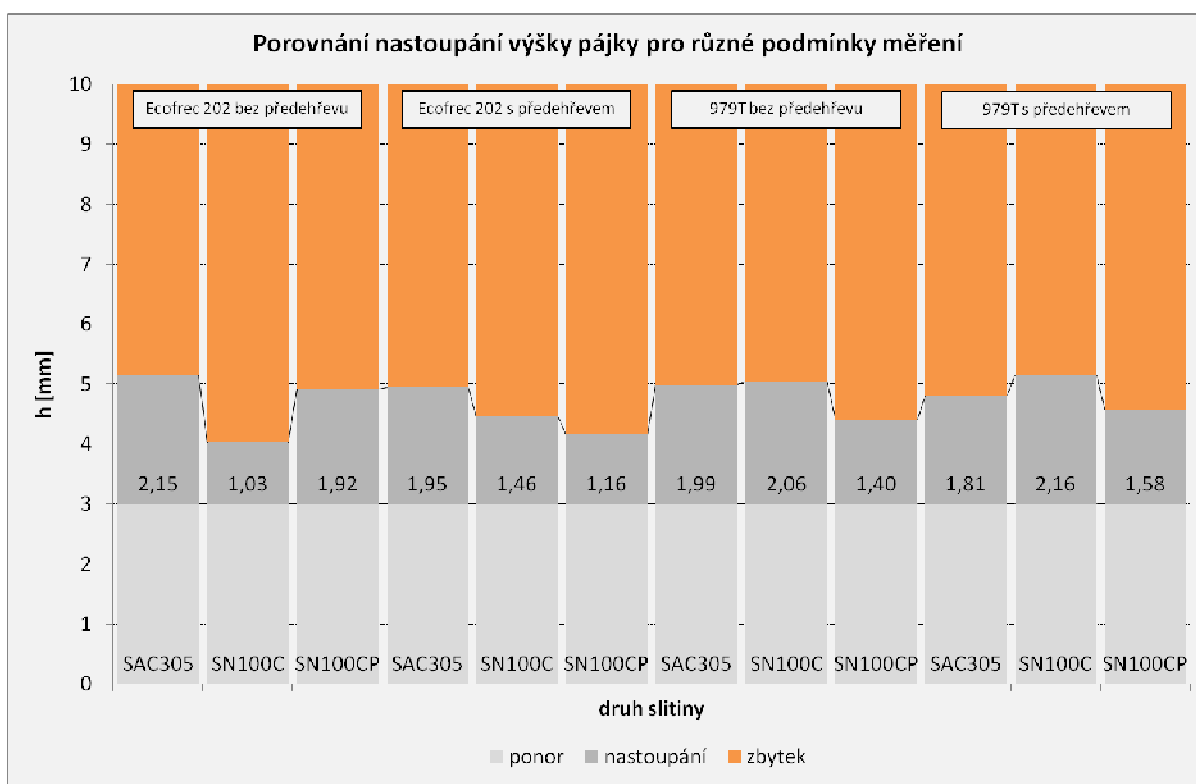
U slitiny s přísadkou fosforu (obr. 29) se ukázal předehřev jako zásadní faktor zlepšující charakteristiky smáčecích vah. Obě tavidla při předehřevu dosáhla lepších výsledků smáčecí síly. Křivky se ustálily na hodnotě 4,1 mN. Bez použití předehřevu to bylo pouze 2,8 mN. Nejlepšího průběhu bylo dosaženo při použití tavidla Ecofrec 202. Smáčení proběhlo nejrychleji a velikost smáčecí síly byla i přes mírné odsmačení dobrá. Nezvykle dlouhou prodlevu začátku smáčení zaznamenalo tavidlo 979T bez i s předehřevem. Bez ohřátí vzorků to byly v průměru celé 2 s. Použití tohoto tavidla bez předehřevu tedy hodnotím při této konfiguraci jako nevhodné.

### **2.4.3. Zhodnocení výšky nastoupání pájky**

Jako i u ostatních měření jsem vyhodnotil výšku nastoupání pájky na stěnu vzorku. Díky většímu množství výsledků uvádím vše v jednom grafu na obr. 30, výsledky měření výšek jsou uvedeny v tabulce 4. Pro celkový přehled uvádím všechny kombinace, tedy výsledky pro VOC i VOC free tavidlo, vždy se třemi slitinami a pro úplnost i výsledky s a bez předehřevu.

**Tabulka 4** Hodnocení výšky nastoupání pájky [mm]

vzorek	pájka bez přehřevu Ecofrec 202			pájka s přehřevem Ecofrec 202			pájka bez přehřevu 979T			pájka s přehřevem 979T			
	SAC305	SN100C	SN100C-P	SAC305	SN100C	SN100C-P	SAC305	SN100C	SN100C-P	SAC305	SN100C	SN100C-P	
strana 1	1	5,10	2,88	5,00	5,02	4,62	4,46	5,30	5,10	4,36	4,74	4,74	4,32
	2	5,06	3,34	5,00	5,38	4,62	3,92	5,10	5,18	5,22	4,80	5,12	3,72
	3	5,20	4,98	4,72	4,52	4,16	4,52	5,16	4,88	4,36	4,68	5,54	4,06
	4	5,22	4,56	4,16	5,62	4,88	4,36	4,84	5,36	4,92	4,94	5,08	5,26
	5	5,00	4,52	5,02	5,30	4,22	4,88	4,90	4,56	4,82	5,12	5,30	4,96
	6	5,40	4,74	4,82	4,64	5,24	4,56	4,86	5,28	3,46	5,64	5,52	4,42
	7	5,52	3,82	5,04	5,14	4,50	4,28	5,20	5,44	5,00	5,40	4,84	5,40
	8	5,42	3,88	5,02	5,08	3,72	3,60	5,10	5,24	2,86	4,14	4,84	3,68
strana 2	1	4,64	3,08	5,00	5,58	4,10	3,94	4,00	4,96	3,76	4,38	5,64	5,10
	2	5,06	4,12	5,12	4,76	4,22	3,62	4,92	4,80	3,66	4,72	4,82	5,22
	3	5,22	1,64	4,68	4,98	4,54	4,00	5,18	4,72	4,38	4,74	5,06	5,00
	4	5,18	4,92	5,02	4,56	4,24	4,50	5,32	5,22	3,82	4,86	5,22	3,74
	5	5,14	4,82	5,08	4,98	4,94	3,82	5,20	5,12	5,30	3,74	4,86	4,38
	6	5,00	5,14	5,32	4,40	4,46	3,64	4,82	5,04	4,32	4,60	5,00	5,30
	7	5,06	4,02	4,78	4,74	4,14	3,84	4,92	5,08	4,94	5,02	5,46	3,94
	8	5,10	4,02	4,86	4,44	4,78	4,60	4,98	4,92	5,20	5,42	5,44	4,84
průměr	5,15	4,03	4,92	4,95	4,46	4,16	4,99	5,06	4,40	4,81	5,16	4,58	
korekce -3mm	2,15	1,03	1,92	1,95	1,46	1,16	1,99	2,06	1,40	1,81	2,16	1,58	
ponor	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	
nastoupání do 10mm	2,15	1,03	1,92	1,95	1,46	1,16	1,99	2,06	1,40	1,81	2,16	1,58	
	4,86	5,97	5,09	5,05	5,54	5,84	5,01	4,94	5,60	5,19	4,85	5,42	



**Obrázek 30** Porovnání nastoupání výšky pájky pro různé parametry měření

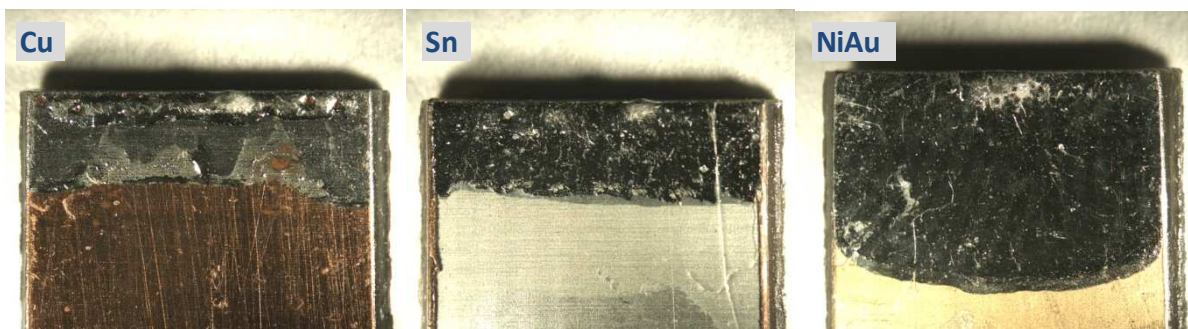
Ze všech výsledků nejlépe nastoupala pájka SN100C na vzorky při kombinaci 979T s přehřevem, a sice na 2,16 mm nad hodnotu ponoru. Nejhůře potom dopadly vzorky s tavidlem Ecofrec 202 bez přehřevu nořené do slitiny SN100C. Tyto výsledky zcela korespondují s průběhy smáčecích vah, tak jak je můžeme vidět výše (obr. 28).

## 2.5. Diskuze kontextu spolehlivosti pájeného spoje

Díky povaze vzorků a měření na meniskografu, je možné provést diskuzi spolehlivosti pájeného spoje pouze na základě hodnocení vzhledu povrchu pájky, která zůstane po testu smáčivosti na vzorcích. Pro detailní náhled na strukturu jsem vyfotil zástupce vzorků každé měřené skupiny na optickém mikroskopu Olympus s instalovanou USB CCD kamerou. Z pořízených fotek lze dobře pozorovat nedostatky, které vznikají při pájecím procesu.

### 2.5.1. Hodnocení spolehlivosti rozdílných povrchových úprav

Při hodnocení povrchu zatuhlé pájky na DPS tří různých povrchových úprav se potvrzuje očekávání předchozích měření, a sice že nejlépe obstála povrchová úprava NiAu. Ostatní vzorky měli podstatně horší smáčecí charakteristiky a toto se projevuje i na vzhledu pájky.



**Obrázek 31** Povrch pájky na třech různých povrchových úpravách DPS

Cu povrch, který měl nejhorší smáčecí sílu a nejnižší nastoupání pájky na povrch vzorku, navíc vykazoval nerovnoměrné rozlití slitiny. Na vzorcích byly oblasti, kde vůbec pájka nepřilnula k povrchu a po vynoření zůstala tato místa bez pokrytí, jak vidíme na obrázku 31. Při bližším zkoumání vykazoval velmi drobné nepokryté oblasti ve tvaru bublinek i vzorek s chemicky naneseným cínem. Povrch pájky na vzorku s NiAu úpravou je celistvý a celkově více jednotný, proto ho hodnotím jako nejspolehlivěji zapájený.

### 2.5.2. Hodnocení vlivu předmontážního čistidla na spolehlivost

V této části diskuze spolehlivosti pájeného spoje jsem jako nejprůkaznější vybral vzorky, které byly nejvíce postiženy vlivy stárnutí a jejich charakteristiky byly nejhorší. Byl to vzorky s Cu povrchem a vlivem předmontážního oplachu došlo ke změnám rovnoměrnosti rozlití pájky na povrchu vzorků. Povrch omytý pomocí PROTONu 42 jevil značně nerovnoměrnou strukturu pájky, povrch omytý v izopropylalkoholu byl zasažen poruchami ve formě nesmočených bublinek a trhlinek, navíc můžeme u některých vzorků spatřit malý trn vzniklý při vynořování vzorku z lázně. Konečně povrch omytý v F10 vykazoval poměrně rovnoměrnou plochu, avšak také s malým přebytkem pájky vzniklým při vynoření a zatuhnutí



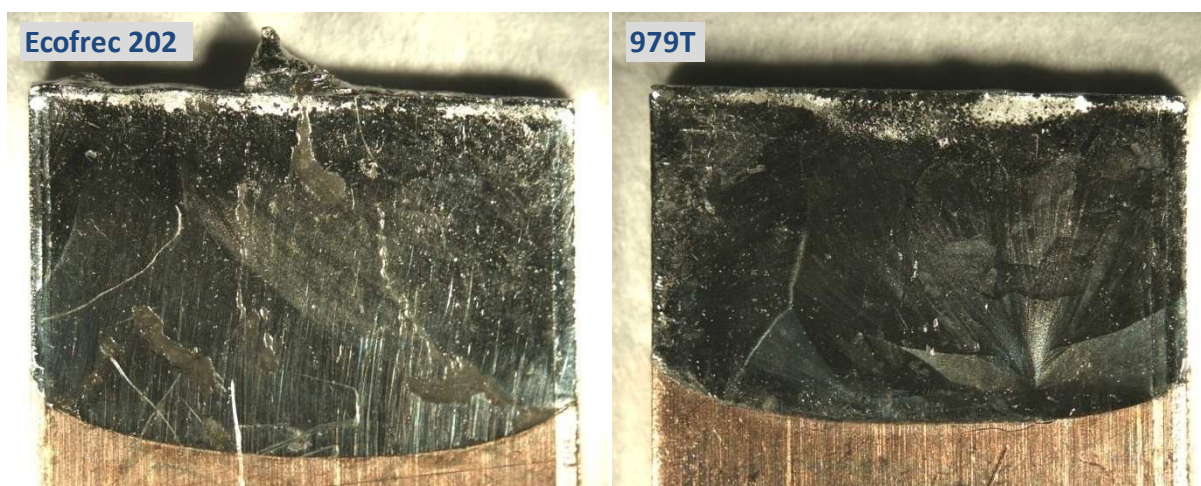
pájky. U všech tří vzorků je patné, že se rozhodně nejedná o ideální vzhled pájeného spoje a všechny povrchy jsou poruchové. Za nejpříznivější však hodnotím oplach v F10, který jako jediný nevykazoval poruchy ve formě nezapájených ostrůvků.



Obrázek 32 Povrch pájky na Cu vzorku po UZV čištění

### 2.5.3. *Hodnocení vlivu tavidla na spolehlivost spoje*

Pro toto hodnocení jsem vybral zástupce nejrozšířenější pájecí slitiny SAC305. Na obrázku 33 pozorujeme vliv VOC tavidla Ecofrec 202 a VOC free tavidla 979T. Jednoznačně lepší parametry vykazují vzorky zapájené s použitím VOC free tavidla 979T. Povrch je velmi lesklý, rovnoměrný bez trhlin, rýh a nesmočených oblastí. Vzorky zapájené s použitím Ecofrecu 202 jsou postiženy četnými oblastmi, kde pájka zůstala ve velmi malých vrstvách. Po zapájení zatuhnul na všech vzorcích na hraně velký trn pájky. Z pohledu vzhledu povrchu pájky lze tedy doporučit pro tuto aplikaci tavidlo 979T.

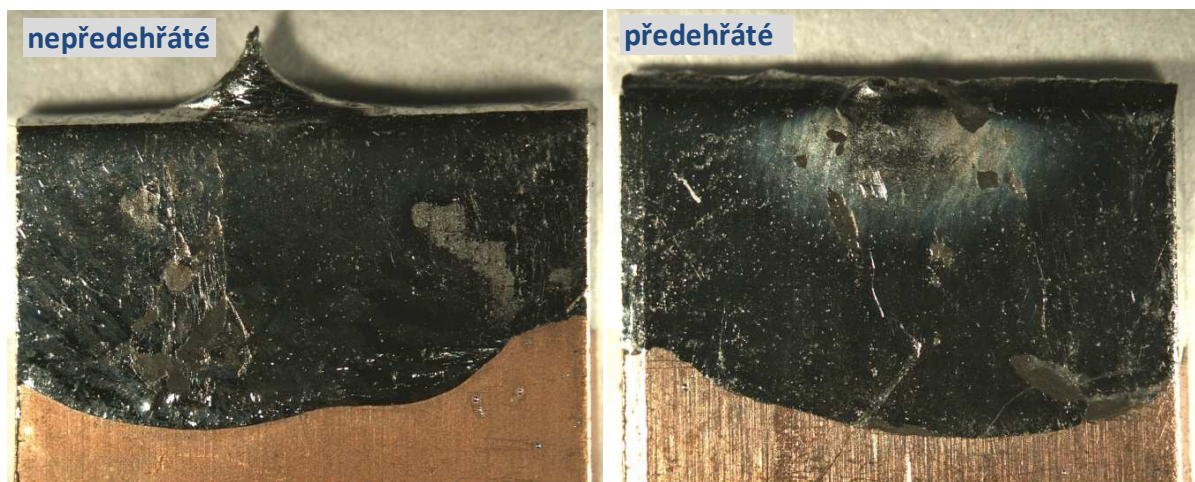


Obrázek 33 Povrch SAC305 po použití různých tavidel

### 2.5.4. *Hodnocení vlivu předehřevu na spolehlivost spoje*

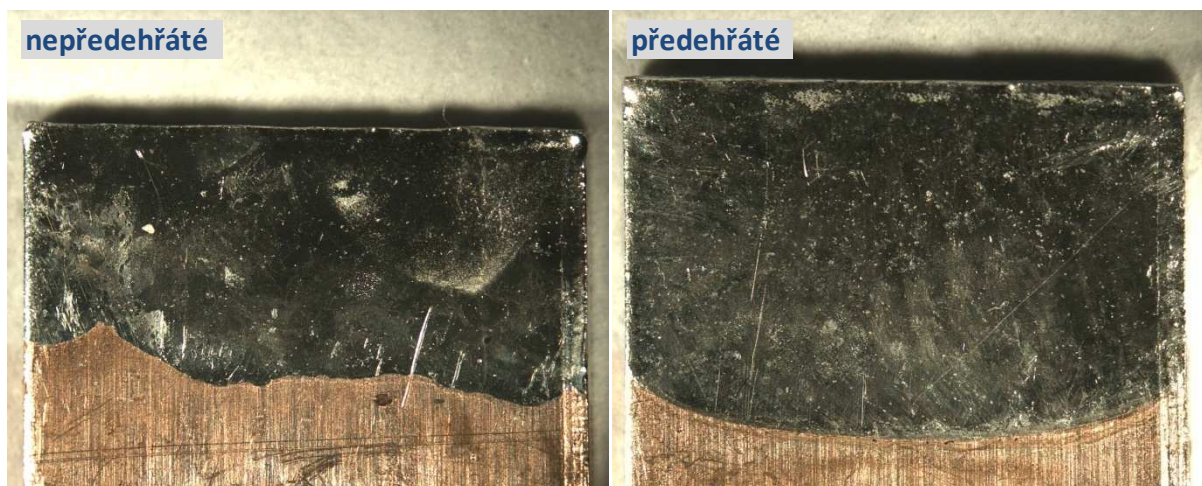
Předehřev výrazně ovlivňoval rychlost smáčecího procesu a nepatrně i velikost výsledné síly. Dopad na spolehlivost spoje je také patrný. Na prvním srovnání (obr. 34) vidíme vliv předehřevu při použití pájky SN100C a tavidla Ecofrec 202. Vlevo je fotografie bez použití předehřevu, povrch pájky je zvlněný, s řadou oblastí, kde je tloušťka pájky minimální. Mezi těmito oblastmi jsou patrné četné zvrásnění a trhliny. Při vynoření z roztavené slitiny

vznikal na hraně vzorků krápník až 2 mm vysoký. Při použití předehřevu je oblastí s nedostatečným pokrytím pájkou o poznání méně a odpadá i vznik krápníků z tuhnoucí pájky.



**Obrázek 34** Povrch SN100C pájky s použitím tavidla Ecofrec 202

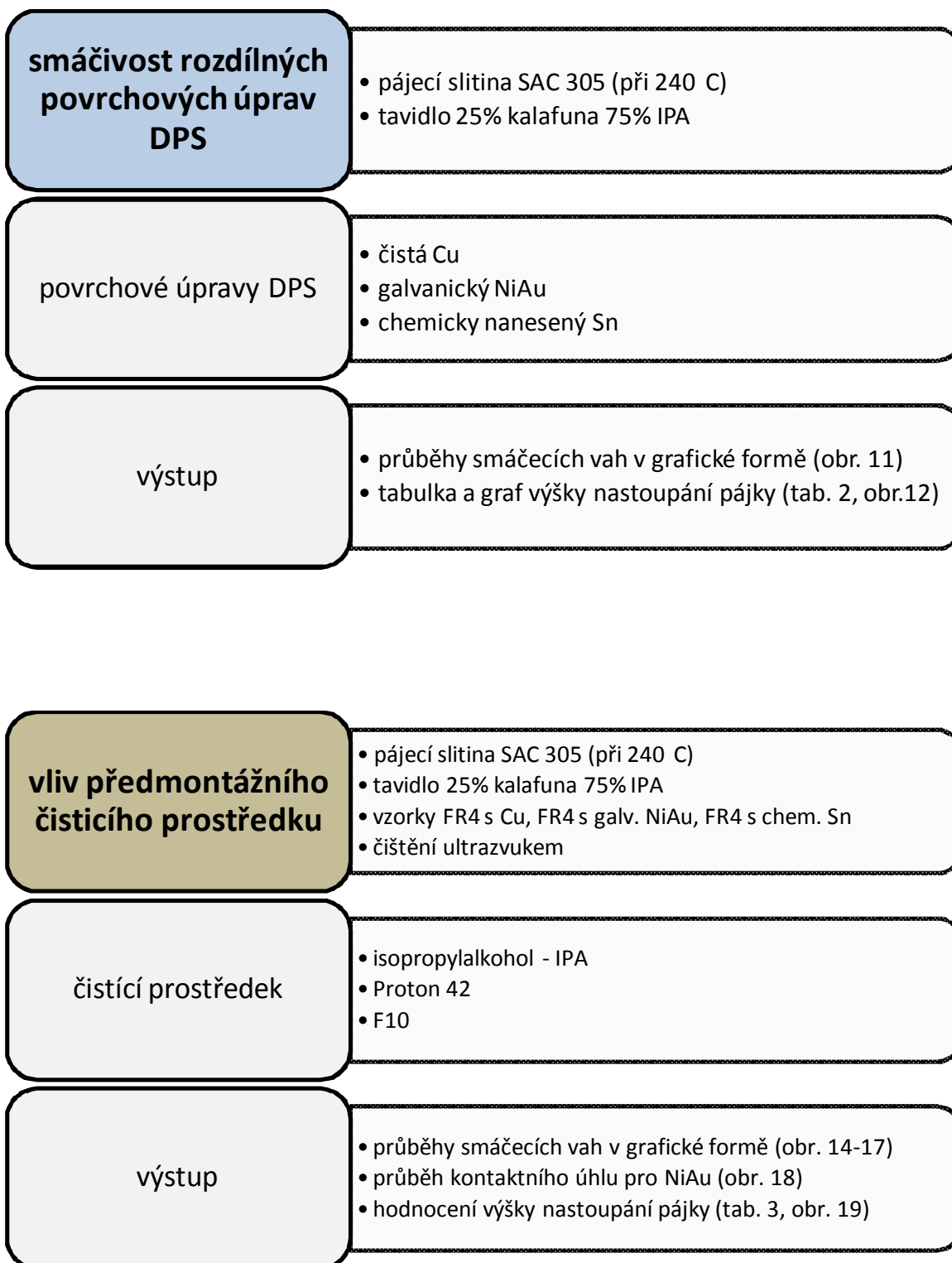
V druhém srovnání přikládám fotografie při použití pájky SN100C s fosforem a tavidla 979T. U této kombinace je vidět vliv zejména na rovnoměrnost a výšku nastoupaní pájky. S použitím předehřevu mohu hodnotit kvalitu povrchu pájky jako nejlepší ze všech sledovaných vzorků. Díky tomu, že pájka obsahovala fosfor jako antioxidační činidlo, je povrch bez defektů velmi lesklý, jednotný, bez přebytků pájky.



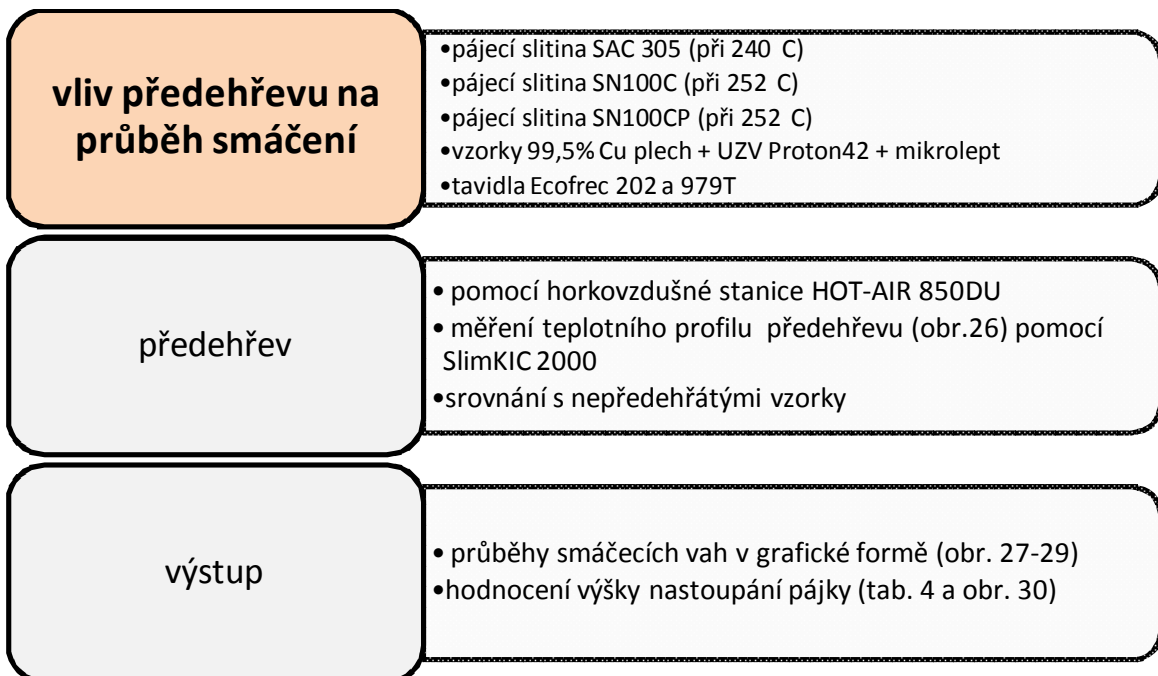
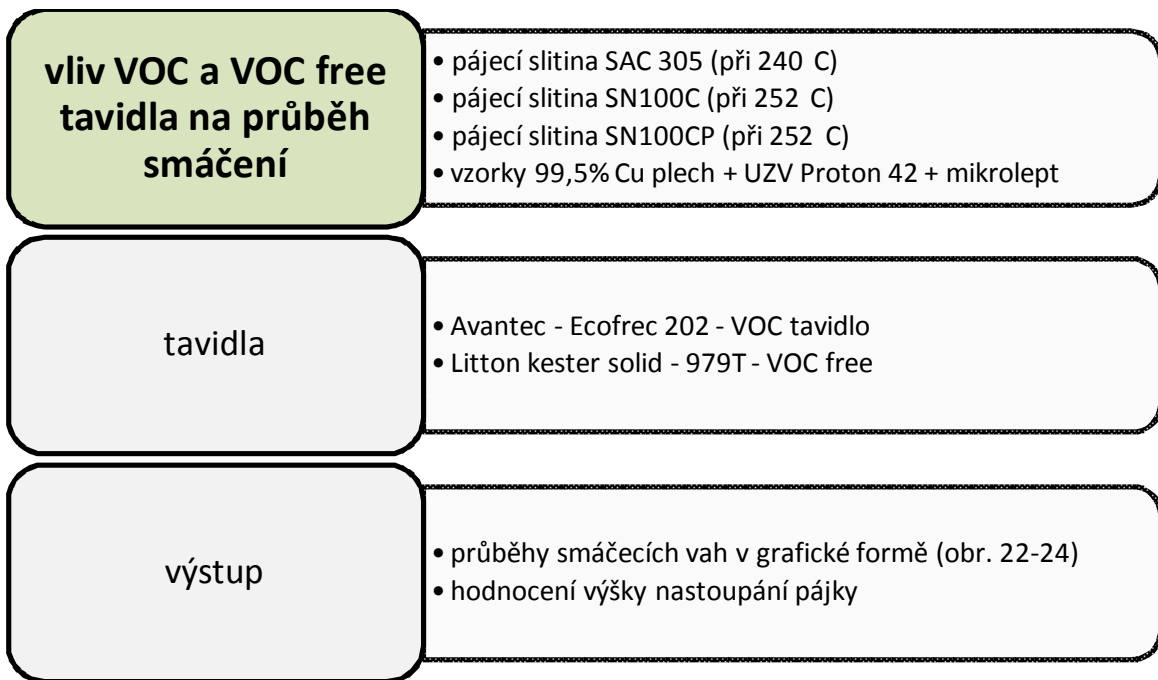
**Obrázek 35** Povrch SN100CP pájky s použitím tavidla 979T

### 3. Přehled struktury bodů měření a metodika měření

#### 3.1. Přehled provedených měření







### 3.2. Metodika měření

Pro dosažení reprodukovatelných výsledků s maximální vypovídací hodnotou je nutné nastavit pro všechna měření stejná pravidla. Pro měření na meniskografu byl striktně dodržován následující postup.

- Největší důraz klademe na čistotu. Veškerá manipulace se vzorky se realizuje v rukavicích a pomocí čistých pinzet, vzorky jsou uchovávány v sadách v popsaných PE obalech s uzávěrem. Použité chemikálie nevracíme do původního obsahu kvůli možné kontaminaci nečistotami.
- Mytí a mikrolept všech vzorků probíhá vždy stejnou dobu za pomoci čistých chemikálií.
- Sušení vzorků po omytí probíhá na bezvláknové utěrce do dokonalého vysušení, vzorky je nutné otáčet a přemisťovat na suchá místa.
- Vzorek upevňujeme do stále stejného držáku, abychom neovlivňovali teplotní kapacitu systému. Vzorek v držáku upevníme a vyrovnáme tak, aby byl srovnán s hladinou pájky pod pravým úhlem (předejdeme nerovnoměrnému smáčení).
- Tavidlo se na vzorek upevněný v držáku aplikuje ponořením a následným vysušením přebytku tavidla - kapka tavidla na spodní hraně vzorku je odsáta bezvláknovou utěrkou.
- Vzorek s tavidlem opatrně zavěsíme do meniskografu a provedeme opatrně odstranění vrstvy oxidů z hladiny roztavené pájecí slitiny.
- Pokud aplikujeme předeřev, je nutné měřit nastavenou dobu. S držákem předeřevové pistole není dobré manipulovat, každá změna polohy ovlivňuje tvar profilu předeřevu.
- Po ustálení hladiny pájky překontrolujeme nastavení parametrů ponoru a zejména teploty pájky a spustíme test. Během testu je třeba nedotýkat se stolu – vibrace způsobují nežádoucí zvlnění průběhů.
- Po kompletním testu necháme vychladnout vzorek, vyjmeme ho z držáku a zařadíme. Po celou dobu práce s meniskografem je nutné dbát zvýšené opatrnosti kvůli nebezpečí popálení.

## Závěr

V prvních bodech měření bylo nutné zvážit zejména nastavení parametrů měřících přístrojů. Vzhledem k použití více pájecích slitin (SN100C, SAC 305 a SN100C-P) byla určena pracovní teplota pájek na 25°C nad body tání těchto slitin. Díky konstrukci meniskografu a kvůli potřebě provádět měření pro různé typy chemikálií a oplachů, jsem jako základní vzorek zvolil DPS tvaru kvádrů o hranách 8, 16 a 1 mm. Jedná se o vzorek na substrátu FR4. V měření bylo prozatím použito tří povrchových úprav. Jednalo se o čistou měď, chemicky nanesený cín a chemicky nanesenou kombinaci nikl zlato. Pro další měření, kde již nebylo třeba sledovat vlivy na DPS, jsem použil vzorky z čisté mědi o hranách 8, 10 a 0,55mm. Měření bylo do jisté míry ovlivňováno stářím vzorků. Kvůli co největší eliminaci tohoto faktu jsem všechny vzorky podrobil ultrazvukovému čištění, u vzorků z čisté mědi jsem navíc použil mikrolept povrchu.

Stanovení přesných hodnot výsledků smáčení není jednoduchou záležitostí, proto nejlépe pro vyhodnocení poslouží grafy smáčecích charakteristik, ze kterých lze vyčíst základní parametry smáčení. Patrná je z nich rychlost, s jakou je vzorek smáčen a také maximální smáčecí síla, které během ponoření dosahujeme. Důležitý je také celkový tvar, podle kterého určíme případné nedostatky smáčecího procesu, jakými může být například přítomnost odsmačení nebo nerovnoměrného smáčení.

Jako první krok měření jsem porovnával smáčivost tří různých povrchových úprav základového materiálu. Vzorky byly mírně stárnuté, všechny však stejně dlouho, což umožňuje vyhodnocení srovnávací metodou. Dobrým zjištěním byla odolnost povrchové úpravy Ni Au na stárnutí vzorku. Jako jediná se ukázala být po delší době skladování dobře smáčivá, zejména v kombinaci s ultrazvukovým oplachem v izopropylalkoholu. U zbylých povrchových úprav nepřesáhly smáčecí síly ani sílu vztakovou, a tak je můžeme označit jako nesmachivé. Tento výsledek připisuji zejména stárnutí povrchu a jeho oxidaci. Pokud bychom takovéto povrchy chtěli pájet, bylo by nutné značně prodloužit dobu ponoru v pájce a nejlépe je před pájením mechanicky očistit. Měření jsem doplnil o hodnocení nastoupání výšky pájky na povrch vzorku. Potvrdil se výsledek měření smáčecích vah a jako nejlepší hodnotím úpravu NiAu, která ostatní jasně předčila.

V druhém měření se stejnou šarží vzorků jsem sledoval vliv čisticích prostředků. Vzhledem k použití stárnutých vzorků jsou nejlépe průkazné výsledky kombinace Ni Au, která nejlépe odolává stárnutí. Byl zde patrný rozdíl všech typů chemikálií. Pro srovnání byla část vzorků ponechána zcela bez čištění. Ultrazvukový oplach byl nejúčinnější v izopropylalkoholu. Dále následovala čistidla F10 a PROTON42. Nejhůře dle předpokladu dopadly vzorky zcela neomyté. Jako dobře smáčivé označuji pouze vzorky omyté izopropylalkoholem. Další charakteristiky odpovídají již pomalému nebo nerovnoměrnému smáčení.

Pro doplnění měření vlivu čisticích prostředků byla na nové šarži vzorku s povrchovou úpravou čisté mědi provedena měření výšky nastoupání pájky po zapájení. Vzorky byly opět podrobeny ultrazvukovému oplachu ve třech chemikáliích. Jako nejlepší a tedy nejvyšší nastoupání hodnotím použití oplachu v F10. Oproti izopropylalkoholu pájka nastoupila o 43% výše a oproti PROTNU42 dokonce o 70%.

V dalším bodě měření jsem prověřoval vliv VOC a VOC free tavidla na smáčecí charakteristiky. Jako zástupce obou tavidel jsem vybral Ecofrec 202 (VOC) firmy Avantec a 979T (VOC free) od firmy Litton kester. V této fázi jsem začal používat vzorky z čisté mědi, které vykazují lepší výsledky díky tomu, že čistá měď oproti FR-4 lépe distribuuje teplo. Odpadá také vliv nesmáčivých ploch vzniklých frézováním, které byly u předchozích vzorků tvořeny obnaženým základovým substrátem FR-4. Výsledky těchto měření prokázaly, že při výběru tavidla se musíme řídit dle použité slitiny, kterou budeme pájet. U SAC305 byl menší rozdíl pouze v časové charakteristice, kde bylo tavidlo 979T pomalejší v rychlosti začátku smáčení oproti Ecofrecu 202. U SN100C mohu jednoznačně označit tavidlo Ecofrec 202 za nevhodné, protože není dostatečně aktivní a velikost smáčecí síly zdaleka nedosahuje hodnot s použitím 979T. U poslední slitiny SN100C-P jsou smáčecí síly pro obě tavidla vyrovnané. 979T však vykazuje 2 sekundovou prodlevu v zahájení smáčení, což je příliš dlouhý čas.

Následně jsem sledoval průběhy při použití horkovzdušného předehřevu. Pro tento účel jsem využil horkovzdušnou pájecí stanici HOT-AIR 850DU. Nastavení teplotního profilu jsem provedl dle rad výrobců slitin a tavidel. Jeho měření jsem realizoval pomocí teplotního profiloměru SlimKIC2000. Měření prokázala zásadní vliv předehřevu zejména na rychlost, s jakou začíná smáčení. Předehřev tedy zkracuje dobu, po kterou je realizován ohřev vzorku při ponoření do lázně s pájkou, což pozitivně ovlivňuje průběh smáčení. Výrazně také ovlivnil velikost smáčecí síly u slitin SN100C a SN100C-P, u kterých bych předehřev na základě těchto poznatků při strojním pájení doporučoval.

V diskuzi spolehlivosti vzniklých spojů jsem hodnotil vzhled povrchu zatuhlé pájky na vzorcích. Pro tento účel jsem vyfotil vzorky ze všech měření na mikroskopu Olympus s instalovanou CCD kamerou a porovnal jsem zajímavé výsledky. Při sledování vlivu různých povrchových úprav DPS se potvrdila očekávání z předchozích měření a výsledky korespondovaly s dosaženými hodnotami z měření smáčecích vah. Špatné průběhy charakteristik odpovídaly nekvalitnímu vzhledu spoje. V další fázi jsem zhodnotil vliv UZV oplachu. Pro srovnání jsem použil nejzajímavější vzorky s Cu povrchem, kde nejlépe obstál oplach v F10. Povrch pájky vykazoval oproti ostatním menší množství defektů. V relaci s použitím tavidla jsem pokračoval v hodnocení slitiny SAC305. Dobrého spoje bychom dosáhli použitím tavidla 979T, které vykazuje vzhledově mnohem kompaktnější povrch s minimem defektů. U vlivu předehřevu jsem zmínil zbylé dvě použité slitiny a sice SN100C

s použitím tavidla Ecofrec 202 a SN100CP s použitím tavidla 979T. U poslední jmenované kombinace vznikl s použitím přehřevu vzhledově vůbec nejlepší pájený povrch ze všech změřených kombinací použití tavidel, pájek, oplachů a povrchových úprav.

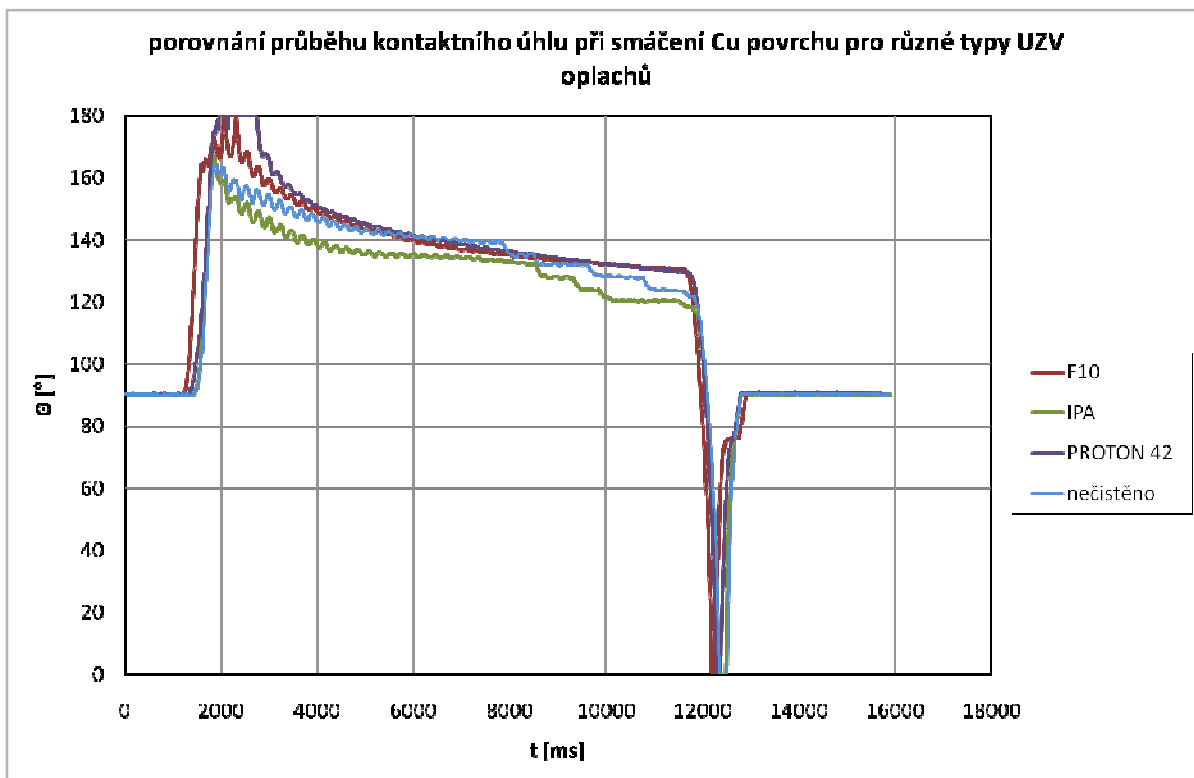


## Použité zdroje

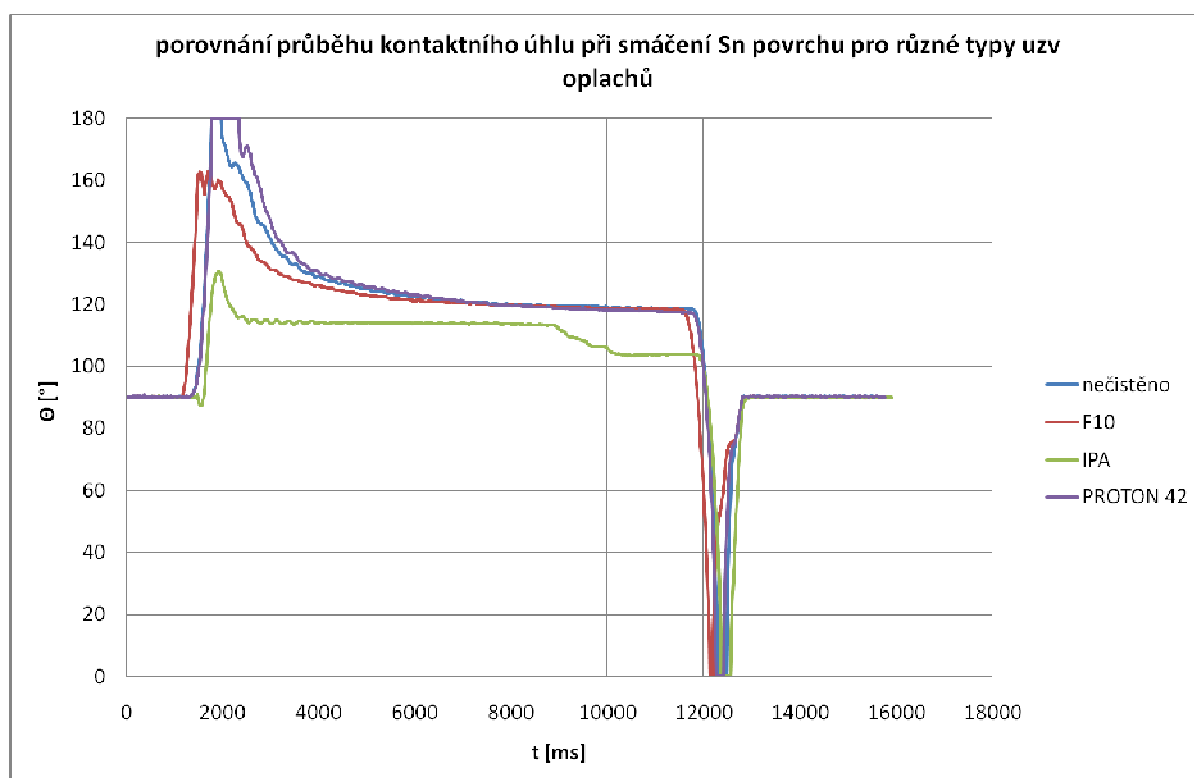
- [1] STARÝ, Jiří. Laboratorní úloha č. 3 : Metoda smáčecích vah. In *MMOT*. [2006]. s. 17.
- [2] KLABAČKA, Edvard. *Zjišťování pájitelnosti povrchů meniskografem* [online]. 1994- , 24.10.2009 [cit. 2008-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/VEZ/meniskograf.pdf>>.
- [3] DCT s.r.o.. *DCT : brings new ideas to long standards* [online]. 2007 [cit. 2009-05-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.dctchemicals.com/elektrotechnicky-prumysl---oblast-cistení/decotron---a-proton---produkty/>>.
- [4] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2006. 376 s. ISBN 80-214-3292-6.
- [5] STARÝ, Jiří, KAHLE, Petr. *Plošné spoje a povrchová montáž*. [s.l.] : [s.n.], 2003. 208 s. Dostupný z WWW: <[https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/uet/Plosne\\_spoje\\_a\\_povrchova\\_montaz\\_S\\_P.pdf](https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/uet/Plosne_spoje_a_povrchova_montaz_S_P.pdf)>.
- [6] STEINER, František, HARANT, Petr. *Aplikace horkovzdušného předehřevu při testování pájitelnosti* [online]. FEL ZČU Plzeň, [2007] [cit. 2009-05-01]. Sborník. Dostupný z WWW: <<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce1/34.pdf>>.
- [7] KIC. *Slim KIC 2009 : Profiling so easy, anyone can do it!* [online]. 2008, 0608 [cit. 2009-05-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.kicthermal.com/products/SlimKIC-2000-en.pdf>>.
- [8] DUŠEK, Karel, DRÁPALA, Jaromír, URBÁNEK, Jan. Měření pájitelnosti mědi, niklu a mosazi pro různé druhy pájek a tavidel. *Sborník konference* [online]. [cit. 2009-04-14]. Dostupný z WWW: <<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce3/50.pdf>>.
- [9] Ross, W.M., *A Comprehensive Guide to the Design and Manufacture of Printed Board Assemblies, Volume 2*, Electrochemical Publications Limited, 1999, ISBN 0 901150 32 0
- [10] BIOCHEM CLINTECH s.r.o. *Bio chem* [online]. 2009 [cit. 2009-04-10]. Bio prostředí. Dostupný z WWW: <<http://www.bio-chem.cz/cs/bio-prostredi/voc>>.
- [11] ROT-HSware spol. s r.o. *RoHS* [online]. 2003-2006 [cit. 2008-04-20]. Úvod do požadavků směrnice RoHS. Dostupný z WWW: <<http://www.rohs.cz/more.info.html>>.
- [12] Kester - connecting innovation. *979T : VOC-free no-clean low solid flux* [online]. 2008 , 30.8. 2008 [cit. 2009-05-10]. Dostupný z WWW:<[http://www.peromatic.ch/d/produktelinien/Kester/979T%20\(30Apr08\).pdf](http://www.peromatic.ch/d/produktelinien/Kester/979T%20(30Apr08).pdf)>.
- [13] *Bezpečnostní list : Isopropylalkohol* [online]. 12.7.2002. 2002 , 12.12.2002 [cit. 2009-05-06]. Dostupný z WWW: <[www.trigacolor.cz/eos/dokumentace/BL%20před%201.5.2004/Zachemo/Isopropylalkohol.xls](http://www.trigacolor.cz/eos/dokumentace/BL%20před%201.5.2004/Zachemo/Isopropylalkohol.xls)>.

- [14] Custom components. *Lead free Alloy SAC (SAC305)* [online]. [2006] [cit. 2009-04-28]. Product data sheet. Dostupný z WWW: <<http://www.hottindip.com/pdf/lead-free-alloy.pdf>>.
- [15] Optimus s.r.o. *Cojeco : Vaše encyklopedie* [online]. c1999-2009 , 10.10.2005 [cit. 2009-04-28]. Dostupný z WWW: <[http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&s\\_lang=2&id\\_desc=39596&title=isopropylalkohol](http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&s_lang=2&id_desc=39596&title=isopropylalkohol)>.
- [16] *POVRCHOVÁ MONTÁŽ SOUČÁSTEK: montážní a propojovací struktura* [online]. [2006] [cit. 2008-04-22]. POVRCHOVÁ MONTÁŽ SOUČÁSTEK. Dostupný z WWW: <<http://147.229.68.79/SMT/eltext/PSPM/1.pdf>>.
- [17] Nihon superior. *SN100C : effect of the adition of Ni and Ge* [online]. Japan : SOYINK, c2006 [cit. 2009-04-25]. Dostupný z WWW: <[http://www.nihonsuperior.co.jp/english/products/pdf/SN100C\(E\).pdf](http://www.nihonsuperior.co.jp/english/products/pdf/SN100C(E).pdf)>.
- [18] AIM solder. *SN100C : lead-free wave soldering alloy* [online]. 2005 [cit. 2009-04-30]. Technical data sheet. Dostupný z WWW: <<http://www.aimsolder.com/tds/SN100C%20Alloy%20TDS.pdf>>.
- [19] Brož J., Voskovec V., Valouch M. Fyzikální a matematické tabulky, SNTL. Praha 1980

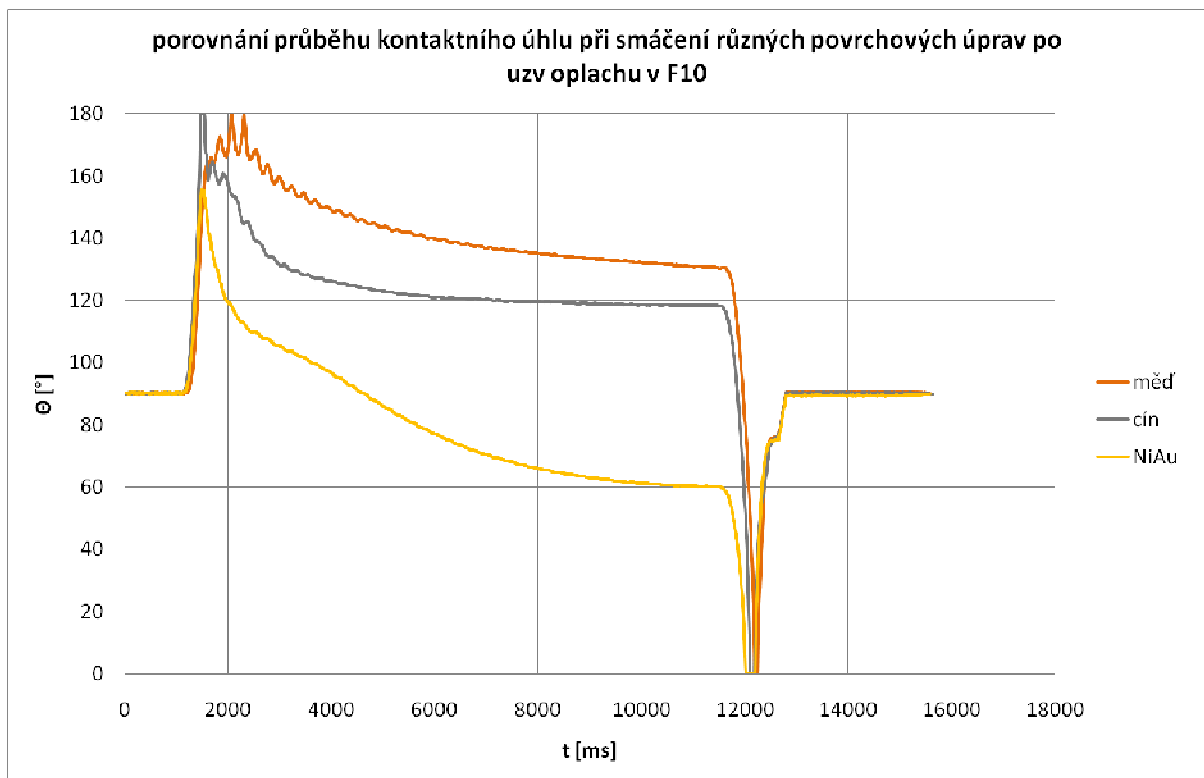
## Příloha



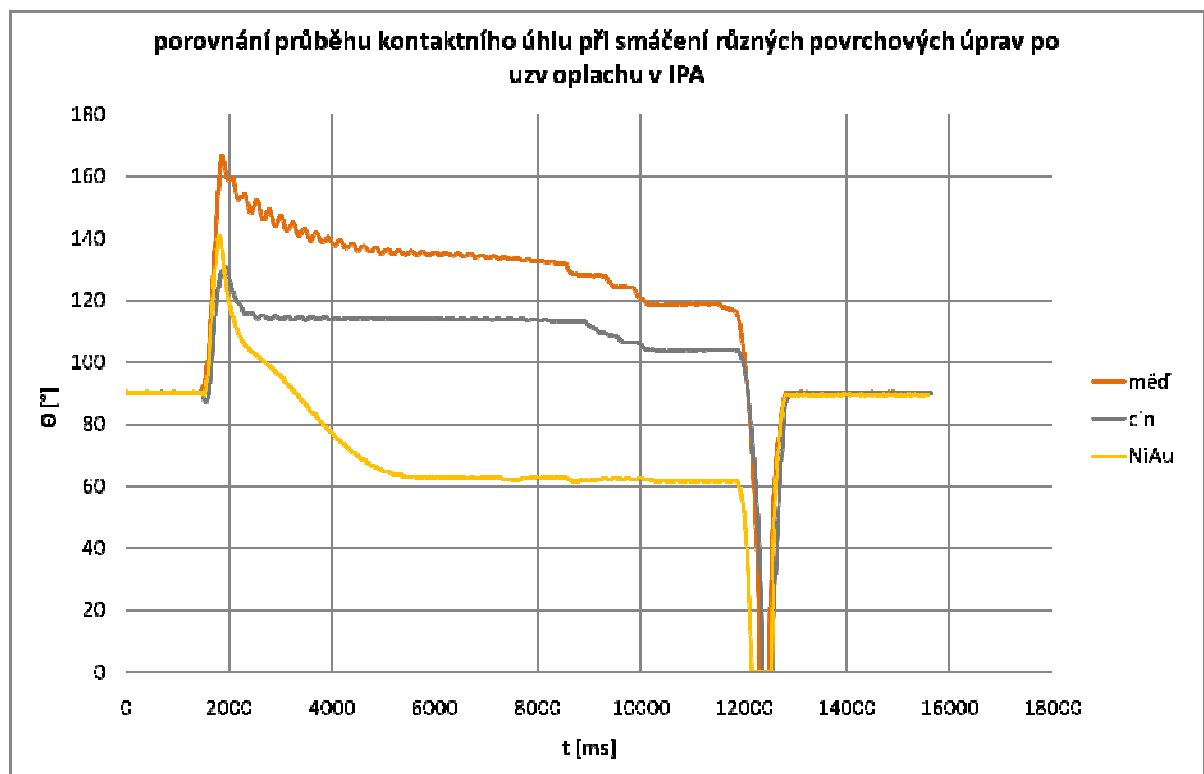
Obrázek 36 Porovnání průběhů kontaktního úhlu při smáčení povrchové úpravy DPS Cu



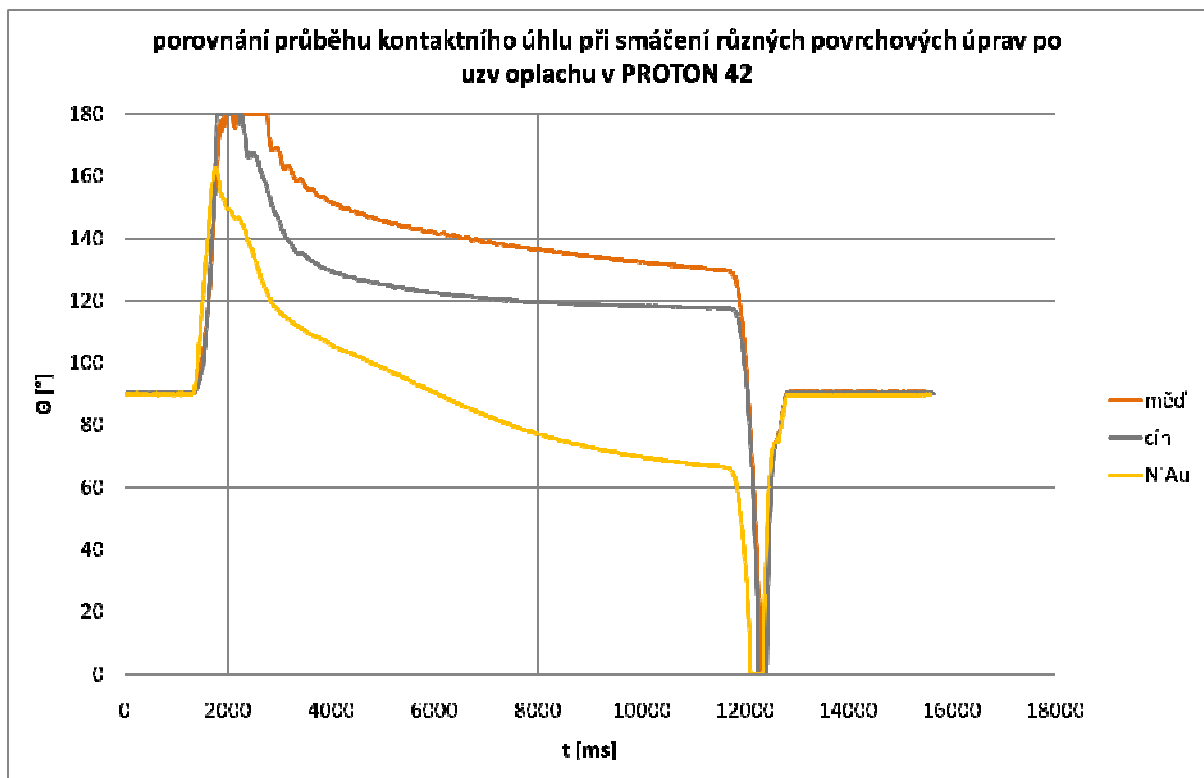
Obrázek 37 Porovnání průběhů kontaktního úhlu při smáčení povrchové úpravy DPS Sn



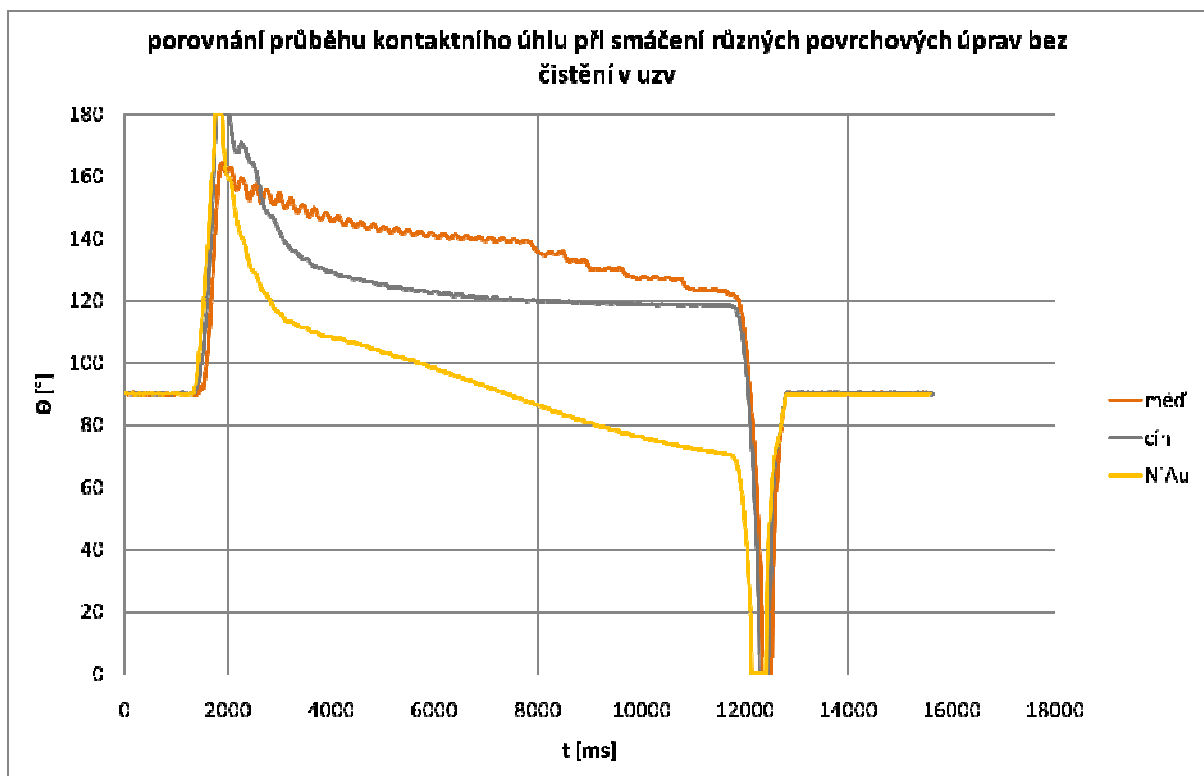
**Obrázek 38** Porovnání průběhů kontaktního úhlu při smáčení různých povrchových úprav po oplachu v F10



**Obrázek 39** Porovnání průběhů kontaktního úhlu při smáčení různých povrchových úprav po oplachu v IPA



**Obrázek 40** Porovnání průběhů kontaktního úhlu při smáčení různých povrchových úprav po oplachu v PROTON 42



**Obrázek 41** Porovnání průběhů kontaktního úhlu při smáčení různých povrchových úprav bez čištění v UZV.