

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrotechnologie



**Posouzení kvality vývodů součástek pro technologii pájení**  
**Assessment of component leads quality for soldering technology**

Diplomová práce

Autor: Bc. Tomáš Hančl  
Vedoucí práce: Prof. Ing. Bc. Karel Dušek, Ph.D.  
Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Studijní obor: Technologické systémy

Praha 2024

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hančl Jméno: Tomáš Osobní číslo: 483447  
Fakulta/ústav: Fakulta elektrotechnická  
Zadávající katedra/ústav: Katedra elektrotechnologie  
Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Specializace: Technologické systémy

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Posouzení kvality vývodů součástek pro technologii pájení

Název diplomové práce anglicky:

Assessment of component leads quality for soldering technology

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s materiály a s problémy, které se mohou vyskytnout u vývodů součástek pájených na desku plošného spoje.
- 2) U vybraných součástek posuďte kvalitu vývodů s ohledem na budoucí proces pájení.
- 3) Výsledky analýzy vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [2] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Bc. Karel Dušek, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání diplomové práce: 16.02.2024

Termín odevzdání diplomové práce: 24.05.2024

Platnost zadání diplomové práce: 21.09.2025

prof. Ing. Bc. Karel Dušek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 21. 5. 2024

.....  
podpis autora (jméno a příjmení)

## **Poděkování**

Děkuji panu Prof. Ing. Bc. Karlu Duškovi, Ph.D. za cenné rady, ochotu a celkové vedení mé diplomové práce. Dále děkuji také Ing. Petrovi Veselému, Ph.D. za nápomocnost při zpracovávání praktické části práce. V neposlední řadě patří můj dík i všem ostatním přítomným v laboratoři, kteří mi poskytovali zázemí a případnou pomoc při řešení zadaných úkolů.

## **Abstrakt**

Práce je zaměřena na zkoumání kvality vývodů pro technologii pájení u exspirovaných a neexspirovaných součástek. V teoretické části byl zhotoven přehled běžně používaných materiálů a jejich vlastností v technologii pájení. Dále byl zhotoven přehled povrchových úprav, projevů degradace, a také byly popsány metody ověřování a možnosti skladování elektromateriálů. Praktická část se pak zabývá ověřováním kvality vývodů vybraných součástek. Pro tyto účely bylo připraveno 5 typů součástek s různými daty expirace, které byly dále porovnávány na konfokálním a elektronovém mikroskopu. Dále byl proveden experiment, který odhalil smáčivost zkoumaných součástek v závislosti na aplikovaných tavidlech. K těmto účelům byla využita metoda smáčecích vah. V poslední části byly vybrány součástky, které prošly smáčením s různými tavidly a s nimi byly zhotoveny metalografické výbrusy. Pomocí zmíněných mikroskopů bylo na závěr na výbrusech provedeno měření, které bylo zaměřeno na zkoumání intermetalických vrstev.

## **Klíčová slova**

Exspirované součástky, degradace, kvalita vývodů, metoda smáčecích vah, elektronový mikroskop, intermetalické vrstvy

## **Abstract**

The work is focused on the investigation of expired and non-expired components leads quality for soldering technology. In the theoretical part was carried out the research about commonly used materials and it's properties. Then an overview about surface finishes and degradation was made and the verification methods and storing of electrical materials were also described. The practical part deals with the quality verification of selected components. For these purposes were prepared 5 types of components with different expiration dates. Those components were visually compared on a confocal and electron microscope. Furthermore, an experiment was conducted. It revealed the wettability of components depending on the applied fluxes and the method of wetting balance test was used for these purposes. In the last part, some of the measured components were selected and used for metallographic cuttings. After that those cuttings were measured by mentioned microscopes. The measurement was focused on the examination of intermetallic layers.

## **Key words**

Expired components, degradation, components leads quality, wetting balance test, electron microscope, intermetallic layers

# OBSAH

ÚVOD .....	8
TEORETICKÁ ČÁST .....	9
<b>1 Elektromateriály .....</b>	<b>9</b>
1.1 Pájecí slitiny .....	9
1.2 Pájitelnost elektromateriálů .....	10
1.2.1 Povrchové napětí a povrchová energie .....	10
1.2.2 Smáčení .....	11
1.3 Tavidla .....	12
1.4 Pouzdření a vývody součástek .....	13
<b>2 Povrchové úpravy elektromateriálů .....</b>	<b>17</b>
2.1 HAL/HASL .....	17
2.2 ENIG .....	18
2.3 Chemický cín .....	19
2.4 Imerzní stříbro .....	20
2.5 OSP .....	20
<b>3 Degradace a stárnutí elektromateriálů .....</b>	<b>21</b>
3.1 Oxidace .....	21
3.1.1 Koroze .....	22
3.2 Růst intermetalických vrstev .....	23
3.3 Cínové whiskery .....	24
3.4 Černá pájecí ploška .....	26
<b>4 Skladování elektromateriálů .....</b>	<b>28</b>
4.1 Ochranné prostředky proti vlhkosti .....	28
4.1.1 Inhibitory koroze .....	29
4.1.2 Vysoušedla .....	29
4.1.3 Destimulátory koroze .....	29
4.1.4 Ochranné obaly .....	30
4.2 Způsoby skladování .....	30
<b>5 Metody validace elektromateriálů .....</b>	<b>31</b>
5.1 Měření pájitelnosti .....	31
5.1.1 Metoda smáčecích vah .....	31

5.1.2	<i>Ponořovací test</i> .....	34
5.1.3	<i>Kuličkový test</i> .....	34
5.2	Mikroskopie.....	35
5.2.1	<i>Optická mikroskopie</i> .....	35
5.2.2	<i>Elektronová mikroskopie</i> .....	37
<b>PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....		<b>40</b>
<b>6</b>	<b>Úvod do experimentu a návrh měření</b> .....	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>Použité materiály</b> .....	<b>40</b>
7.1	Rozdělení vzorků a tavidel .....	40
7.2	Mikroskopie.....	41
7.3	Meniskograf.....	43
7.4	Metalografické výbrusy .....	45
<b>8</b>	<b>Metodika experimentu</b> .....	<b>46</b>
<b>9</b>	<b>Výsledky experimentu</b> .....	<b>46</b>
9.1	Výsledky pájitelnosti vzorků .....	47
9.2	Výsledky mikroskopie .....	55
9.3	Výsledky metalografických výbrusů .....	61
<b>10</b>	<b>Vyhodnocení výsledků</b> .....	<b>64</b>
10.1	Vyhodnocení smáčivosti.....	64
10.2	Vyhodnocení mikroskopie.....	68
10.3	Vyhodnocení metalografických výbrusů.....	69
<b>ZÁVĚR</b> .....		<b>70</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK</b> .....		<b>72</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....		<b>73</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....		<b>74</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ</b> .....		<b>74</b>
<b>POUŽITÉ ZDROJE</b> .....		<b>75</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....		<b>80</b>

---

## ÚVOD

Spojovací materiály a technologie spojování mají klíčový dopad na kvalitu a spolehlivost elektrozařízení. Právě v oblasti spojovacích materiálů však nastal zásadní zlom, kterým bylo omezení olova a dalších ekologicky závadných materiálů směrnici RoHS. Toto omezení způsobilo spoustu změn zejména v elektrotechnickém odvětví, ale zároveň dalo podnět pro výzkum nových pájecích slitin (např. SAC) a jejich materiálových vlastností, jako je pájitelnost, potažmo smáčivost. Bylo zjištěno, že se u těchto nových, ekologicky nezávadných materiálů často objevují neočekávané jevy, které omezují možnosti jejich využití. Spousta těchto jevů se však projevuje až po určité době od aplikace materiálů. I z tohoto důvodu je vhodné zabývat se různými vlivy a mechanismy degradace, včetně stárnutí elektromateriálů. S problematikou úzce souvisí i podmínky skladování a způsoby validace materiálů. Těmito tématy se zabývá teoretická část této práce.

V praktické části budou zkoumány dopady stárnutí součástek, respektive povrchových úprav vývodů součástek, na jejich vlastnosti. Závěry budou podloženy výstupy z elektronového a konfokálního mikroskopu. Relevantní data poskytne také měření pomocí metody smáčecích vah. Budou tak objasněny materiálové pochody vzorků a změny jejich klíčových vlastností.



---

# TEORETICKÁ ČÁST

## 1 Elektromateriály

Elektromateriály jsou velmi širokým všeobecným pojmem. Tato práce je zaměřena primárně na materiály pro výrobu a osazování desek plošných spojů (DPS) a jejich vlastnosti z pohledu dlouhodobého skladování. Jedná se o dvě hlavní skupiny materiálů, a tedy o elektrické součástky a samotné DPS. Spojovací materiály, zejména pájecí slitiny, zde mají také své nezpochybnitelné místo, ale jejich zkoumání není cílem této práce, proto jim bude věnována pozornost pouze okrajově.

Významným předělem pro celou oblast elektromateriálových věd bylo vydání směrnice RoHS. Směrnice Evropského parlamentu (zkráceně RoHS) nabyla platnosti v českém právním řádu k datu 1. 7. 2006. Od tohoto data bylo legislativně vyžádáno omezení ekologicky závadných materiálů v elektrotechnických zařízeních uváděných na trh. V těchto elektrozařízeních je využití nebezpečných látek omezeno na maximálně přípustné množství. Těmito nebezpečnými látkami je konkrétně myšleno olovo, rtuť, kadmium, šestimocný chrom, polybromované bifenyly a polybromované difenylethery. Směrnice se vztahuje na všechna elektrozařízení, která jsou určena pro použití s nízkým napětím. Jsou zde však oblasti, kde využití těchto materiálů regulováno není. Těmito oblastmi jsou například vojenské aplikace, lékařská technika, vesmírný program a další. [1, 2]

### 1.1 Pájecí slitiny

Významnou oblastí dotčenou směrnicí RoHS jsou pájecí slitiny. Do vydání směrnice byla jednou z nejrozšířenějších pájecích slitin v EU eutektická pájka Sn63Pb37 (popřípadě Sn60Pb40), která je tvořena cínem z 63 % a olovem z 37 %, tak jak její název napovídá. V dnešní době se do popředí dostala spíše slitina SAC305. Ta je tvořena cínem z 96,5 %, stříbrem z 3 % a mědí z 0,5 %. Tento krok ke zvýšení ekologičnosti pájecích slitin měl za následek zlepšení některých vlastností, jako je například zvýšení pevnosti ve smyku, či menší prodloužení při mechanickém namáhání. Zároveň ale došlo ke zhoršení některých dalších vlastností, které se negativně podepisují nejen na výsledné kvalitě spoje, ale i na celém procesu pájení. Dále jsou vyjmenovány hlavní nevýhody bezolovnatých pájecích slitin. [3, 4]

- 
- **Vysoký bod tání** – Bod tání pájecí slitiny SAC305 je 217 °C, kdežto bod tání eutektické SnPb pájky je 183 °C. Jedním z negativních projevů vyššího bodu tání je zejména vyšší teplotní namáhání součástky včetně jejího pouzdra. Teplota zároveň ovlivňuje rychlost reakcí, tedy při vyšších teplotách dochází k rychlejší oxidaci.
  - **Vyšší pořizovací náklady** – již ze složení pájky SAC305 je patrné, že obsah stříbra v bezolovnatých pájkách bude zvyšovat jejich cenu.
  - **Horší smáčivost** – pájecí slitina bez olova vykazuje horší smáčivost tj. schopnost vytvářet metalurgickou vazbu na rozhraní pájky a základního materiálu, proto je nutné zařadit do procesu pájení tavidlo s optimální aktivitou. O pájitelnosti, respektive smáčivosti a tavidlech bude více pojednáno v dalších částech práce.
  - **Cínové whiskery** – u bezolovnatých pájecích slitin byla oproti olovnatým pozorována mnohem větší četnost tenkých vodivých struktur dosahujících nezanedbatelných délek, které mohou způsobovat například zkratky mezi sousedními vývody. V dalších částech práce je whiskerům vyhrazena zvláštní kapitola. [3, 4]

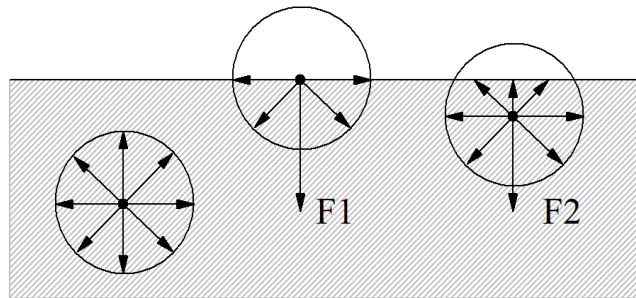
## 1.2 Pájitelnost elektromateriálů

Pájitelnost představuje schopnost materiálu dobře smáčet nanášenou pájku při pájení. Pájitelnost tedy lze vyhodnocovat na základě smáčivosti povrchu. Stupně smáčení se pak dělí na smáčení, nesmáčení a odsmáčení. Podmínka smáčení spočívá ve velikosti povrchové energie. Pokud je povrchová energie kovového povrchu vyšší, než povrchová energie pájky, pak na rozhraní obou materiálů vznikne metalurgická vazba a tím dojde k pevnému spojení. Toto je tedy případ smáčivého povrchu. Naproti tomu u nesmáčivých povrchů nedochází ke vzniku vazby na rozhraní materiálů. Důvodem může být nízká aktivita použitého tavidla či silná vrstva oxidu. Posledním případem je odsmáčení, jehož mechanismus bude popsán na SnPb pájce. Odsmáčení spočívá ve vytahování cínu z pájky, což vede k vytvoření oblastí se slabou pájitelností (oblasti bohaté na olovo). Po poklesu teploty může odtavování cínu vyústit až v ustoupení pájky z oblastí, které byly dříve smáčeny. Důvodem odtavování jsou mezikovové vrstvy, které obsahují množství cínové směsi, které právě toto odtavování způsobují. [5, 6]

### 1.2.1 Povrchové napětí a povrchová energie

Příčinou vzniku povrchového napětí (rozhraní kapalina-plyn, v ostatním případech mluvíme o mezifázovém napětí) jsou přitažlivé síly, kterými na sebe působí molekuly kapaliny. Protože molekuly kapaliny nejsou stejného druhu jako molekuly, které obklopují povrch

kapaliny, dochází ke vtahování povrchových molekul kapaliny dovnitř, na čemž se podílí molekulové síly. Tento jev je znázorněn na obrázku níže. [7, 8]



**Obrázek 1** Rozložení sil molekul kapaliny.

Jak název kapitoly indikuje, existuje vztah mezi povrchovým napětím a povrchovou energií. Jedním ze způsobů popisu takového vztahu je rovnice uvedená níže. Tu lze přeložit tak, že povrchové napětí ( $\gamma$ ) zde popisuje vztah mezi změnou povrchu kapaliny ( $\Delta S$ ) a změnou její povrchové energie ( $\Delta E$ ).

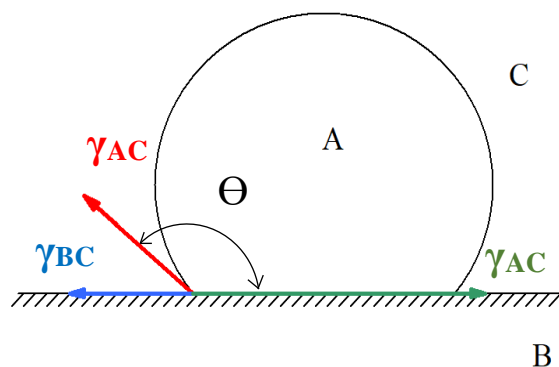
$$\Delta E = \gamma \cdot \Delta S \quad (1)$$

### 1.2.2 Smáčení

Smáčení materiálu je tedy založeno na působení nevykompenzovaných atomárních sil na rozhraní fází, které jsou spjatý právě s povrchovým napětím. Smáčením pájky pak dochází k minimalizaci volné povrchové energie, tedy dochází ke kompenzování atomů s volnými povrchovými vazbami. Tímto způsobem vznikne těsná atomární vazba na rozhraní materiálů, která je příčinou velké adhezní síly, a zároveň malého přechodového odporu. [9]

Pro kapalinu na povrchu pevné látky v plynné atmosféře platí podmínka rovnováhy, která je dána níže uvedenou Youngovou rovnicí. Předpokladem je zanedbání gravitace. Rovnice 2 popisuje situaci na obrázku 2. [7, 10]

$$\gamma_{BC} = \gamma_{AB} + \gamma_{AC} \cdot \cos\theta \quad (2)$$



Obrázek 2 Vyznačení kontaktního úhlu.

Úhel  $\Theta$  v obrázku se nazývá kontaktní úhel. Na základě tohoto kontaktního úhlu  $\Theta$ , respektive  $\cos\Theta$  lze rozhodnout o smáčivosti povrchu. Z obrázku je patrné, že nejvíce smáčivé povrchy budou mít nejmenší kontaktní úhel (největší hodnotu  $\cos\Theta$ ). Nyní se však nabízí otázka, čím lze smáčivost povrchu ovlivnit. Z teoretického hlediska vyplývajícího z rovnice 2 lze vypočítat, že pro zlepšení smáčivosti je nutné zvýšit povrchové napětí pevná látka-plyn ( $\gamma_{BC}$ ) nebo snížit povrchové napětí kapalina-plyn ( $\gamma_{AC}$ ) či kapalina-pevná látka ( $\gamma_{AB}$ ). V praxi se smáčivost zlepšuje zejména níže uvedenými způsoby. [7, 10]

- Složení a vlastnosti pájky
- Materiál substrátu či jeho povrchová úprava
- Materiál součástky a jeho povrchová úprava
- Aktivita tavidla a jeho složení
- Pájecí proces a jeho parametry
- Pájecí atmosféra (vzduch, vodík, dusík) [9]

### 1.3 Tavidla

Tavidlo podporuje smáčivost pájených povrchů. Důležitou úlohou, kterou tavidlo při pájení zastává, je mimo jiné i odstranění oxidů a dalších nečistot z pájecích ploch a jejich ochrana před další oxidací. Pájka se při aplikaci tavidla lépe rozteče a vytvoří kvalitnější vodivý spoj. Ideálem je vysoká agresivita při pájení, a zároveň netečnost při pokojových teplotách. [11]

Tavidla lze dělit podle různých hledisek. Nejjednodušší rozdělení je na základě skupenství tavidla či způsobu aplikace. Tavidlo může být součástí pájecího materiálu, jako je tomu např. u trubičkové pájecí slitiny, nebo může být dodáno před pájením aplikací kapalného tavidla na vývody. Dále lze tavidla dělit na základě jejich aktivity. Právě aktivita je klíčový

parametr, který udává míru agresivity vůči zoxidovaným povrchům. Např. u pryskyřicových tavidel se v normě MIL-F-14256 rozlišují tavidla s nízkou aktivitou (typ R), středně aktivované (typ RMA) a aktivované (typ RA). Typ R je vhodný na čištění zlatých povrchů, nikoli však pro měděné či cínové povrchy. Vhodný je zejména pro ošetření povrchu při dlouhodobém skladování. Typ RMA lze využít na běžně užívané materiály povrchů jako je měď nebo cín. Typ RA je vhodný i pro hůře pájitelné povrchy a po pájení by měl být odstraněn, protože může podporovat korozi. Při volbě tavidla tedy musí být brán zřetel nejen na aktivitu či způsob nanášení, ale také na zdravotní rizika, korozivzdornost či náročnost odstraňování zbytků tavidla. Klasifikace tavidel pro měkké pájení (tedy pájení s teplotou tání pájky nižší než 450 °C) je uvedeno v normě ČSN EN ISO 9454-1 a dále je uvedena tabulka s rozdělením tavidel z této normy. [11, 12, 13]

*Tabulka 1 Klasifikace tavidel pro měkké pájení podle hlavních složek [11].*




Typ tavidla	Základní složka tavidla	Aktivace tavidla	Obsah halogenidů (% hmot.)
1 pryskyřicové	1 kalafuna (nemodifikovaná kalafuna) 2 pryskyřice (modifikovaná kalafuna, nebo syntetická)	1 nepřidán žádný aktivátor	
2 organické (tavidlo bez nebo s nízkým obsahem pryskyřice)	1 vodorozpustné 2 nerozpustné ve vodě	2 aktivováno halogenidy 3 aktivováno bez halogenidů	1 < 0,01 2 < 0,15 3 0,15 až 0,20
3 anorganické	1 soli ve vodím roztoku 2 soli v organické směsi	1 s chloridem amonným 2 bez chloridu amonného	4 > 2,0
	3 kyseliny	1 s kyselinou fosforečnou 2 bez kyseliny fosforečné	
	4 alkálie	1 aminy a/nebo amonné uhličitany	





#### 1.4 Pouzdření a vývody součástek

Nejen tavidla a pájecí slitiny mají dopad na smáčení elektromateriálů. Významnou roli hrají také tvary a materiály vývodů, respektive materiály jejich povrchových úprav. Existuje velké množství typů vývodů, které jsou používány pro různá pouzdra součástek. V této kapitole bude uveden krátký přehled používaných pouzder a jim příslušných vývodů a to pouze pro technologii SMT (z anglického *Surface Mount Technology*), která byla předmětem zkoumání v praktické části. Součástky lze na základě vývodů rozdělit do skupin na součástky

s páskovými vývody (a – d), bezvývodové součástky (e – g) a integrované obvody se speciálními vývody (h – j). Pro zlepšení vlastností vývodů součástek a pájecích plošek se v praxi přistupuje k povrchovým úpravám, které jsou více přiblíženy v kapitole 2 Povrchové úpravy elektromateriálů.

*Tabulka 2* Přehled pouzder a vývodů.

<b>a) Vývod typu „L“ či „rací křídlo“</b>	
<p>Využití nachází primárně u pouzder rodiny SOIC (z anglického <i>Small Outline Integrated Circuit</i>) či QFP (z anglického <i>Quad Flat Package</i>). Jedná se o speciálně tvarovaný Cu pásek či pásek z FeNi slitiny. Rozteče mezi vývody bývají do 1,27 mm. Výhodou těchto vývodů je dobrý odvod tepla (Cu pásek) popřípadě vyšší houževnatost (FeNi pásek). Nevýhodou je citlivost na manipulaci s vývody a s tím spojené snadné poškození vývodů. [14, 15]</p>	 <p><b>Obrázek 3</b> Vývod typu „L“.</p>
<b>b) Vývod typu „J“</b>	
<p>Tento typ se používá zejména pro pouzdra typu SOJ (z anglického <i>Small Outline „J“ leads</i>), ale také pro pouzdra integrovaných obvodů typu PLCC (z anglického <i>Plastic Leaded Chip Carriers</i>). Vývod je opět tvořen speciálně tvarovaným páskem, ale v tomto případě pásek sahá až pod součástku. Výhodou je snadné umístění do patice, nevýhodou je pak komplikované pájení vlnou z důvodu větší výšky součástky. [14, 15]</p>	 <p><b>Obrázek 4</b> Vývod typu „J“.</p>
<b>c) Přímý „I“ vývod</b>	
<p>Tyto typy vývodů jsou vhodné pro povrchovou montáž pouzdra DIP (z anglického <i>Dual In-Line Package</i>), ale v praxi se tyto vývody vyskytují jen velmi málo. Prakticky se jedná o pouzdro DIP s odstraněnou spodní částí vývodů. [14, 15]</p>	 <p><b>Obrázek 5</b> Vývod typu „I“.</p>

<p><b>d) Vývod páskem zahnutým pod součástku</b></p>	
<p>Užívají se typicky pro tantalové kondenzátory nebo diody SOD (z anglického <i>Small Outline Diode</i>). Jedná se o vyvedení pásku z boku součástky, přičemž pásek sahá až pod pouzdro. [14]</p>	 <p><b>Obrázek 6</b> Vývod páskem zahnutým pod součástku.</p>
<p><b>e) Bezvývodové součástky</b></p>	
<p>Jsou vyráběny ve tvaru válce či kvádrů (typicky kondenzátory, rezistory, popřípadě indukory). Prakticky se jedná o pokovenou plošku nanesenou napařováním či napařováním na keramický základ. Tato ploška je tvořena vrstvou stříbra, na které je vrstva niklu s úkolem chránit stříbrnou vrstvu před rozpuštěním při procesu pájení. Tyto vývody je doporučeno pájet pájecí slitinou s příměsí stříbra. [14, 15]</p>	 <p><b>Obrázek 7</b> Bezvývodové součástky.</p>
<p><b>f) Válcová čepička</b></p>	
<p>Válcová čepička se využívá zejména u rezistorů s pouzdry typu MELF (z anglického <i>Metal Electrode Leadless Face</i>). Pouzdra s válcovou čepičkou jsou totožná jako u vývodových rezistorů, pouze vývody jsou tvořeny kovovou čepičkou namísto drátků. [14, 15]</p>	 <p><b>Obrázek 8</b> Válcová čepička.</p>
<p><b>g) Válcový terčik</b></p>	
<p>Využití válcových terčiků je typické mimo jiné pro vývody skleněných pouzder SOD80 nebo plastových pouzder SOD87. Tvar vývodu odpovídá metalickému terčiku s výstupkem. Mezi výstupky je pak umístěn kontaktovaný čip. [14, 15]</p>	 <p><b>Obrázek 9</b> Válcový terčik.</p>

### h) Kulové vývody

Kulové vývody nacházejí své využití u pouzder typu BGA (z anglického *Ball Grid Array*), které jsou nástupci pouzder QFP. Jak z názvu vyplývá, vývody jsou tvořeny maticí kuliček pájky na spodní části pouzdra součástky. Lze se setkat také s kulovými vývody „dimpled“. Tyto vývody jsou zapuštěny do podložky a v případě, že podložka a pouzdro součástky mají rozdílnou teplotní roztažnost, používají se pružnější válcové vývody, které se při pájení nepřetavují. Výhodou těchto „dimpled“ vývodů je vyšší spolehlivost a lepší elektrické vlastnosti, než mají vývody pouzder QFP, ale i menší plocha potřebná k připojení. Nevýhodou kulových vývodů všeobecně je pak obtížná inspekce připojených pouzder či náročná oprava špatných spojů. [14, 15]



Obrázek 10 Kulové vývody.

### i) Ploché vývody

Ploché vývody jsou velmi rozšířené a s oblibou se používají na pouzdra typu QFN (z anglického *Quad Flat No-lead Package*). Vývody jsou ve formě kovových plošek umístěných na spodní části pouzdra a pro jejich pájení je nutné dodat pájecí pastu externě. Pájení je prováděno nejčastěji horkým vzduchem (stejně jako BGA). U pouzder s plochými vývody je výhodou zejména lepší odvod tepla. [14, 15]



Obrázek 11 Ploché vývody.

### j) Vývody typu „bump“

Tento typ vývodu je hojně využíván pro technologii Flip-chip, popřípadě pouzdra CSP (z anglického *Chip Scale Package*), které jsou prakticky zmenšenou variantou pouzdra BGA, proto se lze setkat i s označením  $\mu$ BGA. Takovéto pouzdro je typické tím, že jeho velikost nepřesahuje 1,2 násobek velikosti čipu. Vývody bývají ze zlata, niklu či pájky a kontaktování může být prováděno termokompresí. Oproti kuličkovým vývodům je zde rozdíl mimo jiné ve tvaru. V tomto případě jsou totiž vývody tvořeny pouhými výstupky, namísto kuliček. [14, 15]



Obrázek 12 Vývody typu „bump“.



---

## 2 Povrchové úpravy elektromateriálů

Součástky a DPS musí vyhovovat technickým požadavkům, které jsou na ně kladeny. Mezi ty hlavní se řadí ochrana základního vodivého materiálu (mědi), ale hlavně dobrá smáčivost pájecích ploch. I z těchto důvodů jsou na materiály aplikovány povrchové úpravy. Povrchové úpravy velmi úzce souvisí s časem a způsoby skladování, které jsou blíže popsány v kapitole 4 Skladování elektromateriálů. Určité typy součástek mají vývody opatřeny podobnými povrchovými úpravami jako DPS, a proto je níže uveden přehled těch nejčastěji používaných. Nejvýznamnějšími povrchovými úpravami jsou:

- HAL/HASL – z anglického *Hot Air Levelling/ Hot Air Solder Levelling*
- ENIG – z anglického *Electroless Nickel Immersion Gold*
- Chemický cín
- Imerzní stříbro
- OSP – z anglického *Organic Solder Preservatives*

Povrchové úpravy součástek se dělí do kategorií e1 – e7, které popisuje norma IPC-1066. Příslušná kategorie bývá uvedena na obalu součástky. Níže je uvedena tabulka kategorií. [16]

*Tabulka 3 Kategorie povrchových úprav součástek [16].*

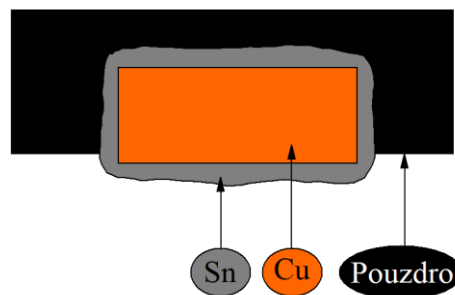
Kategorie	Materiál povrchové úpravy
e1	SnAgCu
e2	Další slitiny SnX (ne Bi)
e3	Sn
e4	Ag, Au, NiPd, NiPdAu
e5	SnZn, SnZnX (ne Bi)
e6	Slitiny Bi
e7	Slitiny s bodem tavením <150°C obsahující In (ne Bi)

### 2.1 HAL/HASL

Jedná se o velmi často používaný typ úpravy, přičemž je odhadováno, že až 90 % povrchově upravených DPS využívá právě HAL. Základem této povrchové úpravy je ve většině případů bezolovnatá pájka splňující směrnici RoHS. Tloušťka ochranné vrstvy bývá mezi 2 až 40  $\mu\text{m}$ , přičemž velmi závisí na povrchovém napětí pájky. [17, 18]

---

Práce se soustředí primárně na součástky, ale technologie bude v tomto případě popsána na úpravě DPS. V tom případě technologie spočívá v ponoru DPS do roztavené pájky, přičemž po vytažení dojde k ofuku vzduchovými noži. Tím dojde k odstranění přebytečné pájky. Úskalí této technologie tkví právě v ponoru desky. Ponorem vznikají závady jako například rozpuštění mědi do pájky, popřípadě kroucení a ohýbání DPS, či jiné deformace vyvolané teplotním šokem. Doporučená doba skladování DPS s touto úpravou bývá 12 měsíců. HAL je vhodný pro širokou škálu aplikací a typickým rysem je dobrá smáčivost. Úpravy vzniklé technologií HAL nemají příliš rovný povrch ve srovnání s jinými technologiemi. Další negativní vlastností je pak častější vznik zkratů a to v případě součástek, jejichž rozteč je menší, než 0,5 mm. [17, 19]



*Obrázek 13 Povrchová úprava HAL/HASL, příčný řez vývodem.*

## 2.2 ENIG

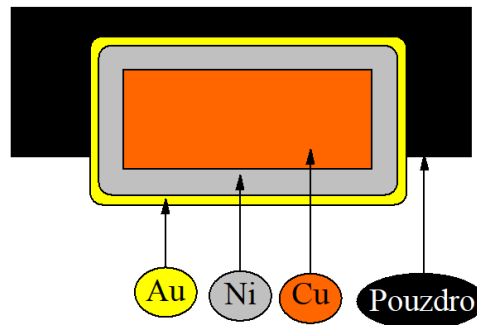
Z názvu vyplývá, že se jedná o povrchovou úpravu sestávající z niklu a zlata, přičemž se imerzní kovový povrch vytváří chemickou cestou. Tloušťky obou nanesených materiálů jsou velmi rozdílné. Vrstva niklu bývá v rozmezí 3 – 6  $\mu\text{m}$  a tloušťka zlata v mezích 0,05 – 0,09  $\mu\text{m}$ . Zde se promítá zejména vysoká cena zlata, která je důvodem takto malé tloušťky vrstvy. Nedodržení doporučených tlouštěk vrstev může vést v případě zlata ke zhoršení smáčivosti a v případě niklu ke korozi či nedostatečnému přilnutí zlata a niklu. [16, 17]

Technologie pájení na povrchovou úpravu ENIG spočívá v rozpuštění zlata v pájce a samotný spoj následně vzniká mezi pájkou a vrstvou niklu, který se nachází ve spodní vrstvě povrchové úpravy. S tím se nese i jedna z mála negativních vlastností této povrchové úpravy. Tou je právě rozpuštění zlata a jeho difuze do pájky, což může vést ke křehnutí vzniklého spoje. [17]

Z pohledu elektrotechniky je však zlato jedinečným materiálem s unikátními vlastnostmi. Zlato totiž neoxiduje a podmínky skladování mají výrazně nižší vliv na životnost, která je díky tomu vyšší, než u jiných typů povrchových úprav. ENIG také zprostředkovává

---

vysokou rovinnost povrchu a dobrou smáčivost, která je vhodná i pro více teplotních cyklů pájení. Z těchto důvodů je ENIG vhodný pro součástky s malou roztečí vývodů. I když má tato povrchová úprava všechny zmíněné jedinečné vlastnosti, jeho cena je velmi vysoká, proto se různé zdroje [20] zabývají novými levnějšími alternativami této povrchové úpravy jako je např. ENImAg (z anglického *Electroless Nickel Immersion Silver*). [16, 17, 19]

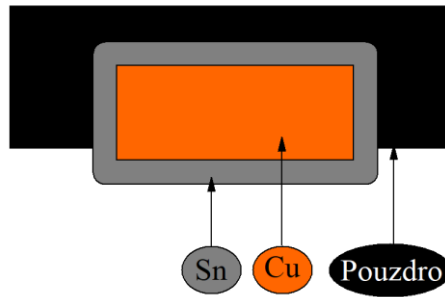


*Obrázek 14 Povrchová úprava ENIG, příčný řez vývodem.*

### 2.3 Chemický cín

Jedná se o povrchovou úpravu cínem vylučovaným chemickou cestou. Tloušťka úpravy se pohybuje v rozmezí 0,9 – 1,1  $\mu\text{m}$ . Pokud bude tloušťka vrstvy nižší než doporučená, může dojít ke špatnému smáčení po prvním průchodu v reflow peci. Důležitou částí výroby této úpravy je zejména kyselá bezproudá cínovací lázeň s příměsemi, které brání vzniku whiskerů (whiskery jsou podrobněji rozebrány v kapitole 3.3). [16, 17]

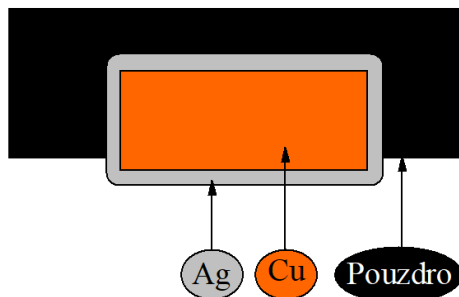
Negativní stránkou povrchu z chemického cínu je jeho vysoká citlivost na okolní podmínky. Proto je doporučena kratší doba skladování (maximálně 12 měsíců). Při skladování je zároveň nutné přísné dodržování podmínek skladování, které jsou stanoveny pomocí teploty, která nemá přesáhnout 25 °C a relativní vlhkosti nepřesahující 50 %. Z těchto důvodů je doporučováno co nejrychlejší zpracování materiálů upravených chemickým cínem. Dalším úskalím je vysoušení materiálů. Velmi nevhodné je krátkodobé vysokoteplotní vysoušení. Ideálem je teplota 70 °C. Při krátkodobém vysokoteplotním vysoušení totiž dochází k oxidaci, která má za následek špatnou pájitelnost. Projevem špatného zacházení či nedodržení podmínek může být zejména špatná smáčivost. Hlavními přednostmi této povrchové úpravy je standardně vysoká pájitelnost povrchu, ochrana mědi před oxidací a dobrá rovinnost. Proto je chemický cín, stejně jako ENIG, vhodný pro pájení součástek s malou roztečí vývodů, popřípadě součástek určených pro povrchovou montáž (SMT). [16, 17, 21]



*Obrázek 15 Povrchová úprava chemickým cínem, příčný řez vývodem.*

## 2.4 Imerzní stříbro

Tento typ povrchové úpravy sebou přináší velké množství výhod. Stříbro má primárně lepší vlastnosti z hlediska vodivosti, oproti zlatu či mědi. S malou tloušťkou (0,1  $\mu\text{m}$ ) se nese jeho snadná pájitelnost a vysoká rovinnost, díky čemuž je imerzní stříbro vhodné pro vyšší konstrukční třídy. Nejvhodnější oblastí pro využití této povrchové úpravy jsou zejména vysokofrekvenční aplikace. Důvodem je mimo jiné i absence niklu. Jedná o velmi perspektivní povrchovou úpravu, která bude výhledově hojně využívána zejména pro 5G aplikace. Doba skladování je v tomto případě opět zkrácena na 6 měsíců. [17, 21]



*Obrázek 16 Povrchová úprava imerzním stříbrem, příčný řez vývodem.*

## 2.5 OSP

Hlavním rozdílem tohoto typu úpravy oproti výše popsaným typům je fakt, že se jedná o organicky pájitelný povlak (pasivace mědi). Tloušťka vrstvy bývá v rozmezí 0,2 – 0,65  $\mu\text{m}$ . Nevýhodou tohoto typu úpravy je opět citlivost na zacházení a skladovací podmínky. Proto je doporučená doba skladování zkrácena na maximálně 6 měsíců. Důsledkem nedodržení podmínek je opět špatná smáčivost, stejně jako v případě chemického cínu. Ve všech případech ale vede nevhodná povrchová úprava či její poškození ke zhoršení smáčivosti materiálu a k jeho rychlejšímu stárnutí, respektive k rychlejší degradaci. [16]

---

### 3 Degradace a stárnutí elektromateriálů

Při dlouhodobém působení vnějších vlivů na elektromateriál dochází k nežádoucím účinkům, které vedou k degradaci. Degradální mechanismy jsou často spojovány se změnami teplot a působením vlhkosti. Právě vliv vlhkosti hraje významnou roli zejména v současné době, kdy dochází k miniaturizaci součástek. Ta se mimo jiné projevuje ztenčováním stěn pouzder, což vede k rychlejšímu pohlcování vlhkosti. Při menších rozměrech součástek zároveň stačí menší množství vlhkosti k rozvinutí degradačních pochodů. Kromě spuštění degradačních mechanismů se vady způsobené vlhkostí mohou projevovat v podobě delaminace plastu z montážního rámečku součástky, poškození čipu, poškození vodiče či ve tvorbě vnitřních trhlin. Tato nebezpečí pro součástku spočívají v rozpínání, odpařování a uvolňování vlhkosti při pájení. [22]

Vystavení nežádoucím vlivům tedy vede k degradaci a stárnutí materiálu. Může se jednat například o elektrochemickou korozi potažmo oxidaci, růst intermetalických vrstev či růst whiskerů. Zmíněné mechanismy jsou popsány v následujících podkapitolách.

#### 3.1 Oxidace

Oxidace je spolu s redukcí základním typem redox reakce. V případě oxidace dochází ke ztrátě jednoho či více elektronů, což je zaznamenáváno nárůstem oxidačního čísla zoxidovaného atomu či iontu. Redukce je pak opačný jev k oxidaci. Oxidace lze popsat jako rozklad způsobený reakcí kyslíku s kovy a nekovy. Oxidace probíhá ve vlhké atmosféře. Kritická hodnota relativní vlhkosti vzduchu, při které dochází k oxidaci materiálu s kyslíkem, je udávána v rozmezí 40 % až 70 %. Konkrétní hodnota je závislá na konkrétním typu materiálu. V případě, že je relativní vlhkost velmi malá, k oxidaci, potažmo korozi, nedochází. [23, 24]

Oxidace při pájení způsobuje nežádoucí dopady zejména z hlediska smáčivosti povrchu. Pro odstranění těchto dopadů bývá při procesu pájení aplikováno tavidlo, jehož úkolem je narušit a rozptýlit oxidy. V jistých případech, kdy je vrstva oxidu nebývale silná či aktivita tavidla nízká, nemusí být tato nežádoucí vrstva oxidů odstraněna, čímž se výrazně zhoršuje smáčivost povrchu. Blíže je význam tavidla popsán v kapitole 1.3 Tavidla. [6, 25]

---

### 3.1.1 Koroze

Mechanismus koroze lze popsat jako schopnost kovového povrchu vstupovat do reakcí se složkami prostředí, kdy je výsledkem rozklad do chemicky stabilnější formy. V případě že dochází k přímé reakci, hovoříme o chemické korozi. Tato chemická koroze probíhá v elektricky nevodivých prostředích. V případě že na povrchu kovu dochází ke vzniku systému galvanických (korozních) článků, hovoříme o elektrochemické korozi. Ta probíhá v elektricky vodivém prostředí. Samotný děj elektrochemické koroze lze popsat jako proces oxidace materiálu a redukce složek roztoku. Výsledkem tohoto typu reakce na povrchu kovových materiálů je ztráta kohezní pevnosti materiálu či změna vzhledu. Existují 3 základní typy korozních článků. [26, 27]

- a) Kontakt strukturálních složek jednoho materiálu (mikročlánek)
- b) Kontakt dvou různých kovů (makročlánek)
  - Např.: Cu-Al
- c) Koroze povlakových systémů
  - K tomuto typu koroze dochází v případě, že anoda je tvořena méně ušlechtilým kovem a je relativně malá vůči katodě, která je tvořena ušlechtlejším kovem.

Korozi lze dělit do mnoha podskupin na základě jejich povahy. Základním typem je atmosférická koroze, která je způsobena vystavením kovu okolnímu vzduchu. Tento typ koroze způsobuje tvorbu oxidu mědi a nejvíce ovlivňuje elektrickou vodivost materiálu. Druhým typem je lokalizovaná koroze. Už z názvu je patrné, že se vyskytuje na omezeném prostoru a je důsledkem vad na DPS. Tato lokalizovaná koroze se dělí na 3 typy. [28]



*Obrázek 17 Ilustrativní obrázek koroze na DPS [28].*

---

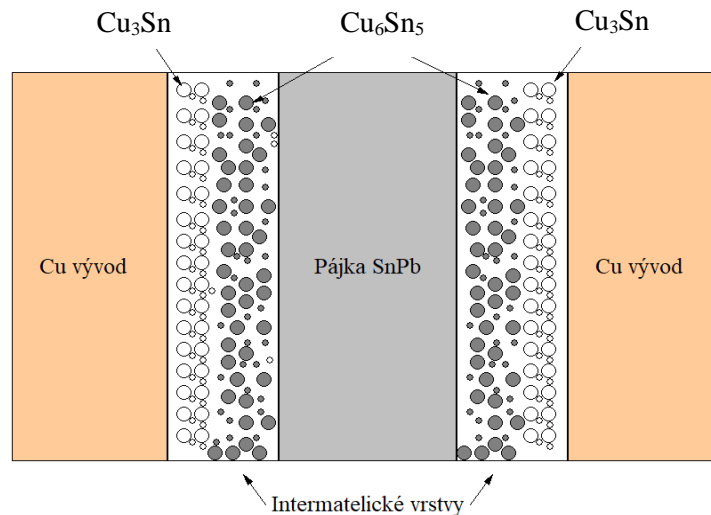
Prvním typem je nitková koroze. Ta se projevuje oxidací pod povrchovou úpravou a je způsobena vlhkostí. Má schopnost se šířit po DPS a způsobovat další škody. Druhým typem je štěrbinová koroze. Ta je způsobena nečistotami, jako jsou zbytky tavidel apod. Na DPS se nejčastěji vyskytuje pod osazenými součástkami. Posledním typem je důlková koroze, která se projevuje formou dutinek či děr typicky v mědi. Reakce způsobují zvětšování a prohlubování dutinek, což postupně vede až k selhání DPS. Pro úplnost je dále uvedeno rozdělení kovů do skupin na základě kinetiky atmosférické koroze. [28]

- 1) Kovy, které plně a opakovaně reagují na stimulator koroze
  - Fe, ocel, litina
- 2) Kovy, které vytvářejí stabilní soli se stimulatory koroze
  - Zn, Cu, Pb, Cd
- 3) Kovy, které vykazují pasivitu v atmosférických podmínkách
  - Al, nerezové oceli
- 4) Kovy, které jsou imunní v atmosférických podmínkách
  - Au, Pt, Rh, Pd

### 3.2 Růst intermetalických vrstev

Intermetalické vrstvy (zkráceně IML z anglického *Intermetallic Layers*) zásadním způsobem ovlivňují stárnutí spojů. Základní mechanika růstu intermetalických sloučenin (zkráceně IMC z anglického *Intermetallic compound*) je spojena s procesem smáčení pájeného substrátu roztaveným materiálem. IMC se však vyvíjí i skrze difuzi materiálu v pevné fázi. Mezi příčiny růstu IMC se řadí například znečištění Cu povrchu, nevhodně zvolené teploty či dlouhá doba pájení. Růst intermetalických vrstev je patrný na rozhraní pájecí slitiny a pájecích plošek a to jak u DPS tak u vývodů součástek. Vrstvy vznikají rozpouštěním naneseného materiálu (např. Sn, Ni, Au) v základním materiálu (typicky Cu). Růst intermetalických vrstev je často zaznamenáván při využití povrchové úpravy HASL, kdy vrstva roste mezi pájkou s obsahem cínu a měděným podkladem. Vzniklá vrstva je pak sloučeninou  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  a následně také  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  (v případě jiných povrchů, např. s obsahem stříbra, vznikají podobné sloučeniny, jejichž příkladem může být  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ ). Tloušťka bývá řádově desetiný mikrometru a její přítomnost je nezbytná pro zajištění dobré přilnavosti materiálů. IMC tedy indikuje, že došlo ke vzniku metalurgické vazby mezi pájkou a povrchem substrátu. [6, 21, 29]

---



**Obrázek 18** Řez intermetalickým spojem.

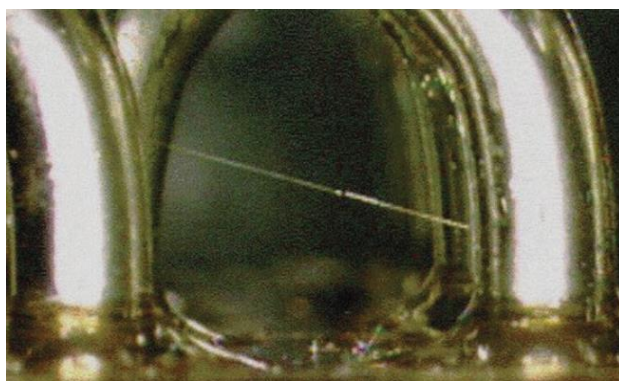
Významnou negativní vlastností v případě zmíněné intermetalické vrstvy  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  je nesmáčivost, což představuje významnou překážku. Současně je teplota tání této vrstvy vyšší, než teplota tání pájky, což situaci nadále komplikuje. Kritický stav nastává v případě, že povrchová vrstva má malou tloušťku. V tu chvíli může dojít až k situaci, kdy intermetalická vrstva proroste skrze povrchovou úpravu a vývod přestane zcela smáčct. [29, 30]

Další vlastností IMC je vysoká křehkost, díky čemuž je tato vrstva považována za nejslabší část spoje a v případě velké tloušťky této vrstvy dochází ke snížení tolerance vůči teplotnímu cyklování. Tato křehkost je daná za dobré spojení pájky s povrchem DPS. Obecnou vlastností těchto vrstev je průběžný růst, který se dále zrychluje s narůstající teplotou. Proto se jedná o významný faktor, který ovlivňuje dobu a způsob skladování elektromateriálu. [29, 30]

### 3.3 Cínové whiskery

V oblasti bezolovnatého pájení je růst cínových whiskerů velmi častý, a zároveň obávaný jev. Whiskery patří mezi základní fenomény, které mají vliv na spolehlivost pájených spojů. Lze si je představit jako vlákna, která rostou za specifických podmínek a vedou k tvorbě velmi čistých monokrystalů. Jedná se tedy o uspořádanou strukturu, která nabízí zajímavé vlastnosti jako je vysoká pevnost v tahu. Whiskery jsou v elektrotechnice často spojovány s potížemi v podobě zkratů mezi vývody (obr. 19). Významným problémem je růst whiskerů na povrchu slitin bez obsahu olova jako jsou např.:  $\text{SnAgCu}$ ,  $\text{SnAg}$  a další. Bylo pozorováno, že whiskery rostou i v případě slitin s obsahem olova, ale nedosahují tak významných délek, proto bývá tato problematika často spojována se směrnici RoHS. [31, 32, 33]





*Obrázek 19 Whisker mezi dvěma vývody [34].*

Pro popis mechanismu růstu neexistuje jednotný názor a i nadále je předmětem zkoumání. Různé zdroje popisují mechanismus růstu různě. Dle [32] se předpokládá, že je růst způsoben tlakovou mechanickou silou. Tato síla je důsledkem zbytkového napětí vyvolaného elektro pokovením a tím že dojde k vytažení whiskeru se toto napětí uvolní. Jiný zdroj [31] popisuje dva základní mechanismy růstu whiskerů – bazální růst (basal growth) a růst špičky (tip growth). Principem bazálního růstu je migrace atomů k základně whiskeru, přičemž dochází k jeho vytačování ze substrátu. Bazální růst se projevuje zejména u pocínovaných povrchů. Principem růstu špičky je připojování atomů ke špičce rostoucího whiskeru. Příkladem mohou být  $Al_2O_3$ , či SiC whiskery, které rostou při vysokých teplotách.

*Tabulka 4 Základní vlastnosti whiskerů [32].*

<b>Všeobecný popis whiskerů</b>	
Tvar	Jehlicovitý, kroucený, hákovitý, vidlicovitý, hrudkovitý, pyramidální
Doba růstu	Dny – roky
Rychlost růstu	0,03 – 0,9 cm/rok
Délka whiskeru	1 – 5 mm (až do 10 mm)
Průměr whiskeru	3 – 10 $\mu m$
Vliv prostředí	Teplota, tlak, vlhkost, teplotní cyklování, elektrické pole
Příčiny	Strukturální změny, chemie

Platí, že příčinou růstu whiskerů jsou faktory, které zvyšují mechanické napětí a podporují difuzi v pájce. Těmito faktory jsou zejména:

- 1) **Tlakové napětí** – mechanické, tepelné, chemické a jejich kombinace
  - **Vnější** (způsobené mechanickým namáháním, ohybem, kroucením a dalšími)

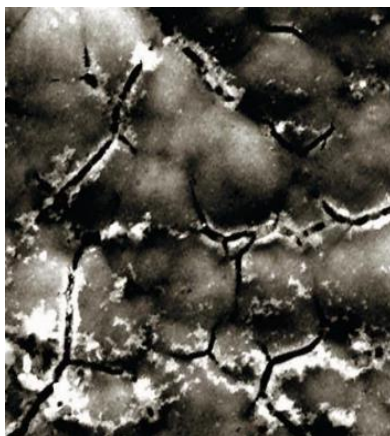
- 
- **Vnitřní** (způsobené procesem pokovení, velikostí pájecích zrn, chemickými vlivy, či koeficientem roztažnosti substrátu a pájky).
- 2) **Krystalická struktura slitiny** – charakteristika zrna a přítomnost IMC
- V pájce s malými pájecími zrny ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ) vznikají větší a déle rostoucí whiskery. Vysvětlením může být, že při rekrystalizaci se malá zrna spojují do větších celků, tím se mění mřížková vzdálenost a výsledkem je vytlačení materiálu v podobě whiskeru. Vrstva oxidu na povrchu cínu tomuto růstu pak brání.
  - Růstem IMC vzniká tlak v Sn matici, nárůstem whiskeru pak dojde k uvolnění tohoto napětí.
- 3) **Tloušťka a materiál vrstvy/substrátu**
- 4) **Teplota**
- Vyšší teplota podporuje růst whiskeru, ale k růstu dochází i při pokojové teplotě.
- 5) **Vlhkost** [32]

Dále je uvedena prevence a různé metody, kterými se lze whiskerům bránit:

- Difuzní bariéra.
  - Jedná se o vrstvu mezi Cu ploškou a SAC pájkou, např. Ni vrstva či  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  vrstva známá z kapitoly o růstu intermetalických vrstev. Při aplikaci Ni na pocínovaný povrch DPS působí tahové napětí dovnitř materiálu, což působí jako prevence růstu.
- Omezení používání čistých Sn povrchů.
- Rovnoměrnější tloušťka pájky.
- Zmenšení mechanického napětí.
- Omezení působení vyšších teplot a další. [32, 33]

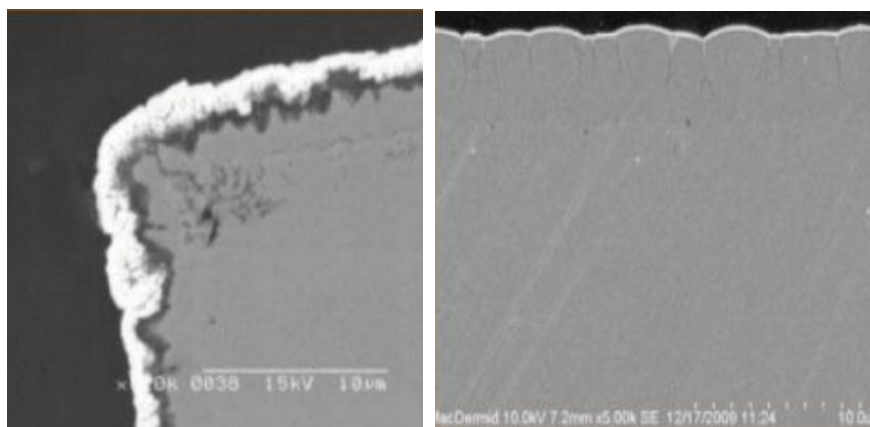
### 3.4 Černá pájecí ploška

Jev černé pájecí plošky, (v literatuře označován jako *Black Pad Effect*), je přímo navázán na přítomnost fosforu při nanášení povrchové úpravy typu ENIG. Černá vrstva je způsobena nízkou kvalitou niklu a vzniká přímo při ponoru do zlata. Pro vznik černé plošky musí dojít k souhře, kdy je povrch niklu odkrytý a je prodloužena doba ponoru. [20, 32]



**Obrázek 20** Černá pájecí ploška pod skenovacím elektronovým mikroskopem [35].

Černá pájecí ploška patří mezi nejzávažnější vady povrchové úpravy typu ENIG. Důvodem je malá tloušťka ENIG vrstvy, díky čemuž dochází při pájení k rozpuštění zlata v pájce a pájka se pak spojí přímo s vrstvou niklu. Platí, že silná koroze niklu má za následek vytvoření vrstvy, která je bohatá na fosfor a pájku přijímá jen obtížně. Tato vada může mít podobu horizontální vrstvy, která se nachází na rozhraní niklu a pájeného spoje, nebo může tvarem připomínat vlasečnice pronikající z niklové vrstvy k podkladovému měděnému materiálu. Oba zmíněné projevy jsou vidět na obrázku 21. V obou případech má černá vrstva velmi nepříznivý efekt na spolehlivost pájeného spoje. Nevýhodou této vady je omezení její vizuální detekce, protože na nikl je nanášena vrstva zlata, která vadu vizuálně zakrývá. [20, 32, 35]



**Obrázek 21** Projevy černé pájecí plošky v podobě horizontální vrstvy (vlevo) a vlasečnic (vpravo) [20].

V praxi existují metody na odhalování této vady. Metody nejsou průmyslově standardizované a spočívají v ponoru zkoumaných komponent do koncentrované kyseliny dusičné při pokojové teplotě a to na dobu 30 s. Porucha by se v takovém případě projevila zčernáním komponenty. Nevýhodou testu je nekonzistentnost a vysoká míra subjektivit. [20]

---

## 4 Skladování elektromateriálů

Skldování elektromateriálů, respektive doba skládování je klíčová z hlediska pájitelnosti a je doporučováno, aby čas mezi výrobou součástky a její aplikací do obvodu byl kratší než 2 roky. Toto doporučení je udáváno normou ČSN EN 61760-2 ed. 2. Pokud je doba skládování delší než 2 roky, je vhodné, aby před použitím součástka prošla zkouškami na její pájitelnost. Při skládování je tedy nutné udržovat přehled o stavu součástek a po jejich použití kontrolovat parametry kvality osazených DPS. [16]

Při dlouhodobějším skládování součástek musí být zajištěno omezení vlivu prostředí na skládovaný elektromateriál. Významnými nežádoucími vlivy, které mohou vést k degradaci materiálu, jsou zejména změny teploty a vlhkost, která způsobuje oxidaci povrchů. Právě na vlhkost jsou v praxi nejvíce náchylné součástky typu QFP a BGA, ale i více vrstvé DPS, u kterých může dojít k difuzi vlhkosti z povrchu do základního materiálu. Pro tyto účely byla zavedena norma J-STD-033, ve které je možné nalézt tabulku uvedenou níže. Na základě této tabulky se zařízení rozdělují do kategorií podle citlivosti na vlhkost. Tyto úrovně citlivosti uvádí výrobce vždy na štítku obalu. [22, 24]

*Tabulka 5 Úroveň vlhkosti a životnost na dílně [22].*

Úroveň citlivosti na vlhkost	Životnost na dílně po vyjmutí z ochranného sáčku v továrních podmínkách $\leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}/60\text{ \% RH}$
1	Neomezená při $\leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}/85\text{ \% RH}$
2	365 dní
2a	28 dní
3	7 dní
4	3 dny
5	2 dny
5a	1 den
6	Před použitím je nutno vysoušet. Po vysušení je nutno pájet v časovém limitu, uvedeném na štítku.

### 4.1 Ochranné prostředky proti vlhkosti

Zvýšená vlhkost v ovzduší je velmi úzce spjata s korozními procesy. Rychlost těchto procesů lze ovlivnit snížením náchylnosti kovu k oxidaci, snížením agresivity média či izolací kovu od tekutiny. Toho lze docílit několika způsoby uvedenými dále. [27]

---

### 4.1.1 Inhibitory koroze

Funkce inhibitoru spočívá v nanesení tenké ochranné vrstvy na chráněný materiál (adsorpční inhibitory) či v pasivaci povrchu (pasivační inhibitory). Princip nanesení je založen na distribuci inhibitorů koroze skrze tekutinu, jejíž cílem je přenést inhibitory na rozhraní kov-tekutina. Zde dojde k přichycení molekuly inhibitoru ke kovu, či jeho reakci s povrchem, čímž dojde k vytvoření tenké přilnavé sloučeniny. Rozhodujícím parametrem je koncentrace inhibitoru, kdy při jejím poklesu přestává inhibitor povrch chránit. Pokles koncentrace může být způsoben omýváním povrchu vodou, kondenzací par a dalšími. [27, 36]

Existují 2 hlavní skupiny inhibitorů. První skupinou jsou kontaktní inhibitory, které chrání povrch jen v místech, kde se nachází inhibitor. Příkladem může být dusitan sodný (pasivační typ) ve formě vodného roztoku, který chrání ocel a není vhodný do kyselých prostředí. Druhou skupinou jsou vypařovací inhibitory. Tyto inhibitory se po aplikaci dlouhodobě vypařují, a tím vzniká v okolí povrchu nekorozivní atmosféra. Příkladem může být benzoan amonný ve formě aerosolu, který chrání rovněž ocel. [27, 36]

### 4.1.2 Vysoušedla

Jedná se o látky, které na sebe vážou vlhkost v uzavřeném prostoru. Nejznámějšími vysoušedly jsou dehydrosil, silikagel, křemičitan hlinitý či oxid hlinitý. Samotný účinek vysoušedla je definován tzv. sorpční kapacitou, tj. hmotností vlhkosti, kterou je schopno pojmout 100 g vysoušedla. Příkladem může být dehydrosil se sorpční kapacitou 14. Tedy 100 g rozpouštědla je schopno pojmout 14 g vody. Dehydrosil tedy odstraňuje vzdušnou vlhkost uvnitř obalů a využívá se zejména při lodní přepravě či při dlouhodobém skladování. Jedná se o přípravek na jedno použití a je inertní a ekologicky nezávadný. Likvidace tedy není nijak problematická. Přednosti silikagelu spočívají mimo jiné v jeho snadné likvidaci a také v tom, že neznečišťuje životní prostředí. Silikagel je možné rovněž regenerovat a to při teplotě maximálně 120 °C. Tato regenerace probíhá do ustálení hmotnosti, která indikuje vypaření veškeré vlhkosti. [27, 36]

### 4.1.3 Destimulátory koroze

Destimulátory koroze často bývají součástí obalového materiálu. Obecně vzato se jedná o látky s možností vázat korozivní složky atmosféry. Příkladem destimulátoru koroze může být například octan mědi či chlorid kademnatý nebo chlorid rtuťnatý. [36]

---

---

#### 4.1.4 Ochranné obaly

Pro správnou funkci vysoušedla musí být materiál spolu s vysoušedlem umístěn v ochranném obalu, čímž je materiál zároveň chráněn proti mechanickému poškození. Může se jednat například o uzavíratelné antistatické sáčky. [36]

#### 4.2 Způsoby skladování

- **Kotoučové zásobníky**

Nejčastějším způsobem skladování SMD součástek je skladování v tzv. kotoučových zásobnících. Princip spočívá v umístění součástek do plastové pásky s vylišovanými vaničkami, do kterých se součástky uloží. Po uložení součástek jsou vaničky překryty tenkou průhlednou páskou, která brání vypadnutí součástek. V takovémto stavu je páska se součástkami navinuta na plastový kotouč. Výhodou tohoto způsobu skladování je možnost okamžitého vložení zásobníku do podavače osazovacího stroje pro automatické osazování. Kotouč a páska mají standardizované parametry a rozměry, díky kterým je možné okamžité zapojení do procesu výroby bez jakýchkoli předchozích příprav. [14]

- **Sáčky MBB**

Zkratka MBB vychází z anglického *Moisture-barrier bag* a jedná se o neprodyšné sáčky, do kterých bývá výrobek uložen již v továrně. Po uložení výrobku se přidávají různé prostředky ochrany proti vlhkosti či karty indikátoru vlhkosti a poté se sáček zavaří. Tyto MBB sáčky bývají navrženy na ochranu zařízení po dobu jednoho roku. V případě kontroly zařízení, při které je otevřen sáček MBB, je nutné podle kategorie citlivosti zařízení na vlhkost opětovně sáček zavařit či zařízení uložit ve vysoušecím kabinetu. [22]

- **Skladovací a vysoušecí kabinety**

Tyto kabinety udržují velmi nízkou relativní vlhkost (1 – 5 %) díky vysoušecím systémům. Při takto nízkých vlhkostech pak vysoušení probíhá při velmi nízkých teplotách (40 – 60 °C). Díky tomu nedochází k teplotnímu namáhání skladovaných elektromateriálů. Kabinety chrání uložené materiály nejen proti vlhkosti, ale také před účinky elektrostatických výbojů. [24]

---

Z obecného hlediska existují 2 úrovně vlhkosti pro vysoušecí kabinety. První úroveň odpovídá relativní vlhkosti maximálně 10 %. V takovém případě lze prodloužit životnost materiálu až na dvojnásobek. I tak se zde jedná pouze o dočasné uložení a tudíž tento typ kabinetu nenahrazuje MBB sáček. Druhá úroveň odpovídá relativní vlhkosti maximálně 5 % a poskytuje neomezenou dobu skladování. Tento druhý typ je tedy lepší než samotné MBB sáčky. [22]

## **5 Metody validace elektromateriálů**

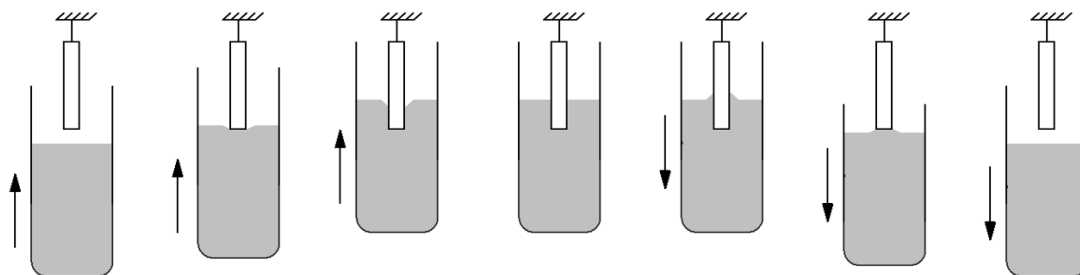
Vlastnosti materiálů z hlediska jejich spolehlivosti je nutné monitorovat. Pro tyto potřeby jsou často používány dva způsoby kontroly. Prvním je měření pájitelnosti, kdy je zkoumána smáčivost povrchů. Právě smáčivost je hlavním ukazatelem spolehlivosti součástek z pohledu pájecího procesu. Druhým způsobem je mikroskopie, kdy probíhá pouze vizuální kontrola materiálu, popřípadě může být provedena také analýza chemického složení pozorovaných substrátů při využití speciálních typů mikroskopů (např. elektronový mikroskop s dostupnou prvkovou analýzou).

### **5.1 Měření pájitelnosti**

Metody měření pájitelnosti se dělí do dvou skupin a to na metody kvantitativní a kvalitativní. Kvantitativní metody umožňují přesné vyhodnocení a poskytují výsledky v podobě různých charakteristik. Naproti tomu kvalitativní metody podávají výsledky, jejichž přesnost a kvalita vyhodnocení je odvislá od schopností a zkušenosti kontrolora.

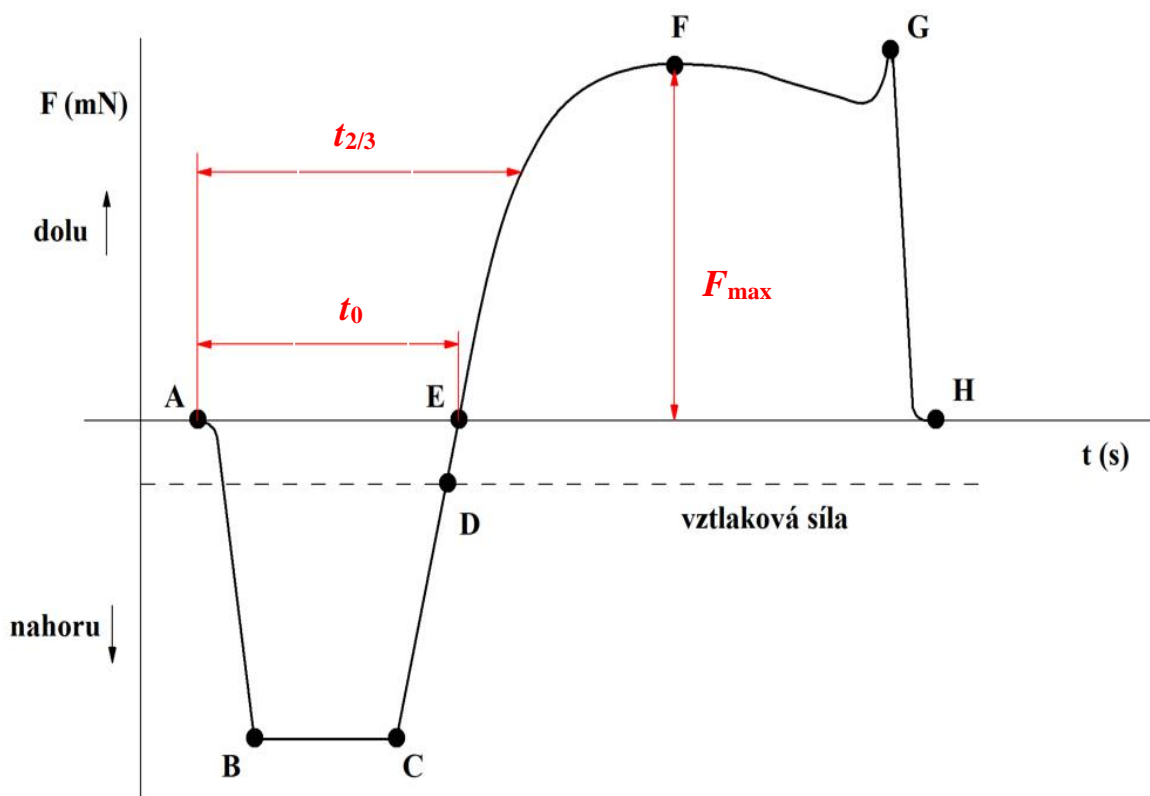
#### **5.1.1 Metoda smáčecích vah**

Metoda smáčecích vah je kvantitativní metodou zkoumání smáčivosti substrátů. Základním prvkem této metody je zařízení, které je označováno jako meniskograf. Ten sestává z nádoby s roztavenou pájkou, jejíž teplota je udržována na konstantní hodnotě. Nad nádobou se nachází měřený vzorek, který je zavěšen na siloměru. Měřeným vzorkem může být například elektrická součástka. Při ponoření vzorku do lázně je tímto siloměrem (vahami) měřena síla, která na vzorek působí ve vertikálním směru. Průběh smáčení je uveden na obrázku 22. Tato síla je zaznamenávána a ihned po měření je automaticky vygenerován graf označovaný jako smáčecí křivka (obrázek 23). [37, 38, 39]



Obrázek 22 Proces smáčení.

Smáčecí křivka zobrazuje závislost síly působící na vzorek ve vertikálním směru (osa Y) na čase (osa X). Pokud se křivka nachází v záporné části osy Y, tak z grafu vyplývá, že síla působí směrem nahoru, tedy vzorek je lázní vytlačován, a tudíž nesmáčí. Pokud se křivka nachází v kladné části osy Y, znamená to, že síla působí směrem dolů a vzorek je vtahován zpět do lázně, tedy smáčí. Na základě tvaru smáčecí křivky je pak tedy možno rozlišit, zda byl měřen smáčivý, či nesmáčivý vzorek a jak smáčení daného vzorku probíhá. Metoda odhalí zejména sílu, rychlost či rovnoměrnost smáčení. Mimo měření síly a času je pro dostatečnou věrohodnost výsledků nutné striktně dodržovat také teplotu lázně. Dovolena odchylka teploty bývá maximálně 1 °C. [7, 37, 38]



Obrázek 23 Smáčecí křivka.



---

Popis bodů na křivce:

A ... První vzájemný dotyk vzorku a lázně

A – B ... sklon odpovídá rychlosti ponoru

B – C ... doba je odvislá od přestupu tepla mezi vzorkem a lázní (úzce souvisí s tepelnou kapacitou)

C ... počátek smáčení vzorku

C – F ... změna smyslu působení síly

C – D ... lázeň vytlačuje vzorek směrem vzhůru

D ... síla je úměrná vztlačové síle (povrch pájky a povrch vzorku jsou kolmé)

E ... síly jsou v rovnováze (výsledná síla je nulová)

G ... bod, kdy došlo k vytažení vzorku z lázně

H ... konečný stav měření

- **Vyhodnocení měření**

Výsledky měření jsou vyhodnoceny na základě tvaru smáčecí křivky a tří základních parametrů zakreslených červeně v obrázku 12. Prvním parametrem je parametr  $t_0$ , v literatuře označován jako *Time to zero*, který vypovídá o čase mezi prvním kontaktem vzorku s lázní a protnutím smáčecí křivky s nulovou osou (nebo nulovou osou korigovanou vztlakem). Druhým parametrem je  $t_{2/3}$ , který odpovídá času, za který dosáhne vertikální síla dvou třetin maximální síly. Posledním parametrem je  $F_{\max}$ , který představuje maximální dosaženou sílu. Kvantitativní hodnocení na základě tří parametrů je známo pod pojmem skóre pájitelnosti (anglicky *Solderability score*, neboli *S-Score*) a nabývá hodnot 0 (nesmáčivé vzorky) až 10 (skvěle smáčivé vzorky). Hodnocení touto metodou bude provedeno i v praktické části této práce, proto je níže uvedena tabulka, podle které hodnocení probíhá. [7, 37, 38]

*Tabulka 6 Tabulka pro hodnocení pájitelnosti [38].*

Skóre $t_0$	$t_0$ (s)	Skóre $t_{2/3}$	$t_{2/3}$ (s)	Skóre $F_{\max}$	$F_{\max}$ (mN)
0	> 3	0	> 3	0	< 0,1
1	2 – 3	1	2 – 3	1	0,1 - 0,2
2	1 – 2	2	1,5 – 2	2	0,2 - 0,3
3	< 1	3	1 - 1,5	3	> 0,3
		4	< 1		

---

### 5.1.2 Ponořovací test

Tato metoda je zde zmíněna, protože je velmi podobná metodě smáčecích vah, nyní se však jedná o kvalitativní test. Pro měření může být využita také obdobná aparatura, nyní však bez záznamu smáčení. Test je založen na ponoru DPS do lázně s roztavenou pájkou. Po vytažení testovaného elektromateriálu dojde ve většině případů pouze k vizuální kontrole smáčivosti. Pro zkoumání těchto kvalit bývá často využívána optická mikroskopie. Samotné vyhodnocení je pak prováděno komparativní analýzou. [40, 41]

Tato metoda nepodává tak přesné výsledky, jako metoda smáčecích vah. Jedná se však o levnější a efektivnější způsob měření, který nevyžaduje tak přesné nastavování aparatury jako v případě smáčecích vah. Existují zde normy, na jejichž základě lze vynášet hodnocení na zkoumaným elektromateriálem. Například normy MIL-STD-883 Method 2003 či J-STD-002 uvádějí následující kritéria, která musí být splněna, aby vzorek testem prošel. [41, 42]

- Před kontrolou povrchu musí být odstraněno veškeré tavidlo.
- Zkoumání musí být prováděno se zvětšením 10x až 20x.
- Povrch musí být souvisle pokryt na minimálně 95% ponořeného povrchu.

### 5.1.3 Kuličkový test

Stejně jako v případě ponořovacího testu se i zde jedná o kvalitativní metodu testování smáčivosti. Princip metody je následovný. Roztavená kulička pájky je položena na nesmáčivý povrch. Takovým povrchem může být například sklo, či nerezová ocel. Do této kuličky je spuštěn zkoumaný vývod takovým způsobem, aby půlil kuličku pájky. Vyhodnocení pak probíhá na základě doby, která uběhne mezi spuštěním vývodu a jeho obklopením pájkou. Přesnost výsledků této metody je tedy silně závislá na rychlosti reakce spouštění časovače a nevyžaduje důkladnou technickou analýzu. Tato metoda se v současné době těší oblibě kvůli svým nesporným přednostem, které jsou uvedeny níže. [41, 43, 44]

- Lze odděleně hodnotit jednotlivé vývody měřené součástky.
- Malá kulička více reaguje na jevy jako například rozpouštění pájitelného povlaku, na rozdíl od lázně.
- Pro každý test může být použita nová nekontaminovaná pájka.

---

## 5.2 Mikroskopie

Mikroskopie je zásadním pomocníkem při zkoumání povrchů a velmi napomáhá pochopení základních materiálových změn např. právě v technologii pájení. Mikroskopy lze s výhodou využít jak při destruktivních, tak při nedestruktivních metodách testování.

- **Destruktivní metody testování**

Těmito metodami jsou myšleny primárně ty metody, při kterých je nutné zhotovit metalografické výbrusy. Ty jsou v další fázi zkoumány pod mikroskopem. Metalografické výbrusy si lze představit jako zkoumané předměty, pevně uchycené do společného rámce, které jsou následně zality nejčastěji epoxidovou pryskyřicí. Po vytvrzení jsou tyto vzorky zbroušeny až na požadovanou vrstvu, ve které má testování probíhat. Je tak možné mikroskopicky zkoumat vnitřní části vzorků, ovšem za cenu jejich destrukce.

- **Nedestruktivní metody testování**

Nedestruktivními metodami jsou myšleny takové metody, při kterých nedochází k žádnému cílenému poškození vzorku. Existují různé metody testování, které využívají rozličné technologie od CCD kamer, přes rentgenové zářiče, až po právě zmiňovanou mikroskopii.

### 5.2.1 Optická mikroskopie

Optická (světelná) mikroskopie využívá viditelnou oblast spektra a umožňuje zvětšení typicky v rozmezí od 50× až po 1000×. Teoretické maximum bývá uváděno až cca 2000×. Optický mikroskop se skládá ze dvou hlavních částí. Jedná se o objektiv a okulár. Objektiv je tvořen soustavou čoček, která je nejbližší objektu a vytváří skutečný převrácený obraz pozorovaného předmětu. Okulár pak slouží k posunu obrazu tak, aby se dal okem lépe zaostřit. Lze ho tedy přirovnat k lupě. Pozorovaný objekt často není adekvátně osvětlen, proto součástí mikroskopu bývá také světelný zdroj s kondenzorem. [45, 46, 47]

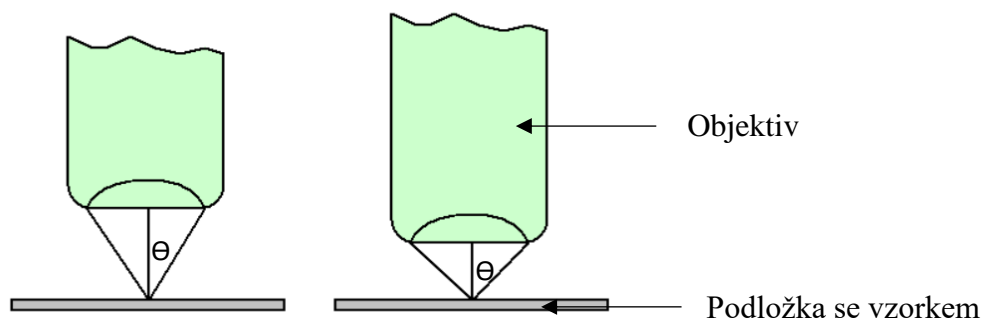
Kvalita zobrazení je jedním ze základních požadavků kladených na mikroskopy obecně. Tato kvalita je nejvíce odvislá od kontrastu obrazu a zvětšení mikroskopu spolu s rozlišovací schopností mikroskopu (minimální vzdálenost dvou bodů objektu, které se ještě zobrazí jako oddělené). Právě rozlišení soustavy je závislé zejména na vlnové délce světla  $\lambda$ , indexu lomu

---

mezi čelní čočkou a preparátorem  $n$  a otvorovým úhlem objektivu, respektive polovinou tohoto úhlu, která je označena jako  $\theta$ . Rozlišení lze matematicky vyjádřit pomocí Abbeho zákona. [45, 47]

$$d_{x,y} = \frac{\lambda}{2 \cdot (n \cdot \sin\theta)} \quad (3)$$

$$d_z = \frac{2 \cdot \lambda}{(n \cdot \sin\theta)^2} \quad (4)$$



*Obrázek 24 Vyznačení otvorového úhlu objektivu (jeho poloviny).*

Část  $n \cdot \sin\theta$  v uvedeném vzorci se nazývá numerická apertura (NA). Platí, že čím je hodnota NA vyšší, tím je lepší i rozlišovací schopnost objektivu. Zároveň platí, že NA roste se zvětšením. [45]

U zobrazování trojrozměrných objektů lze využít teoretickou rozlišovací schopnost mikroskopu jen v případě vzorků, jejichž tloušťka je menší, než hloubka ostrosti objektivu (tj. část prostoru, který je vymezen dvěma rovinami kolnými na optickou osu). U silnějších vzorků se kvalita obrazu snižuje vlivem překryvu obrazu zaostřené roviny a dalších nezaostřených rovin. Tím vzniká nežádoucí zamlžení obrazu. Tento negativní jev výrazně omezuje konfokální mikroskopie, a protože byl konfokální mikroskop využit i v praktické části této práce, bude mu věnována zvláštní pozornost. [48]

### **Konfokální mikroskopie**

Na trhu se lze setkat s velkým množstvím verzí konfokálních mikroskopů (např. mikroskopy na bázi Nipkowova rotujícího disku či LSCM – z anglického *Laser Scanning Confocal Microscope*). Princip činnosti bude vysvětlen na příkladu laserového skenovacího konfokálního mikroskopu.

---

- **Princip konfokálního mikroskopu**

Princip je založen na zaměření bodového zdroje v podobě laserového paprsku na clonku. Dopadlé světlo z bodového zdroje je rozptýleno či odraženo od vzorku a následně stejným objektivem opět sbíráno. Toto světlo tedy opět projde objektivem a vytvoří další obraz clonky. Tento obraz je děličem paprsků přenesen před fotonásobič, kde je umístěna druhá konfokální bodová clona. Díky malému otvoru v této druhé cloně je odstraněno veškeré rušivé záření, tedy záření nepocházející z fokusované roviny. Pro zobrazení celé fokusované roviny je nutné ji popsaným způsobem postupně skenovat. Toto skenování je prováděno pohybem paprsku světla, pohybem vzorku či pohybem objektivu. Díky filtrování záření je výsledný počítačem vytvořený obraz plně zaostřen a představuje optický řez vzorkem. [48, 49, 50, 51]

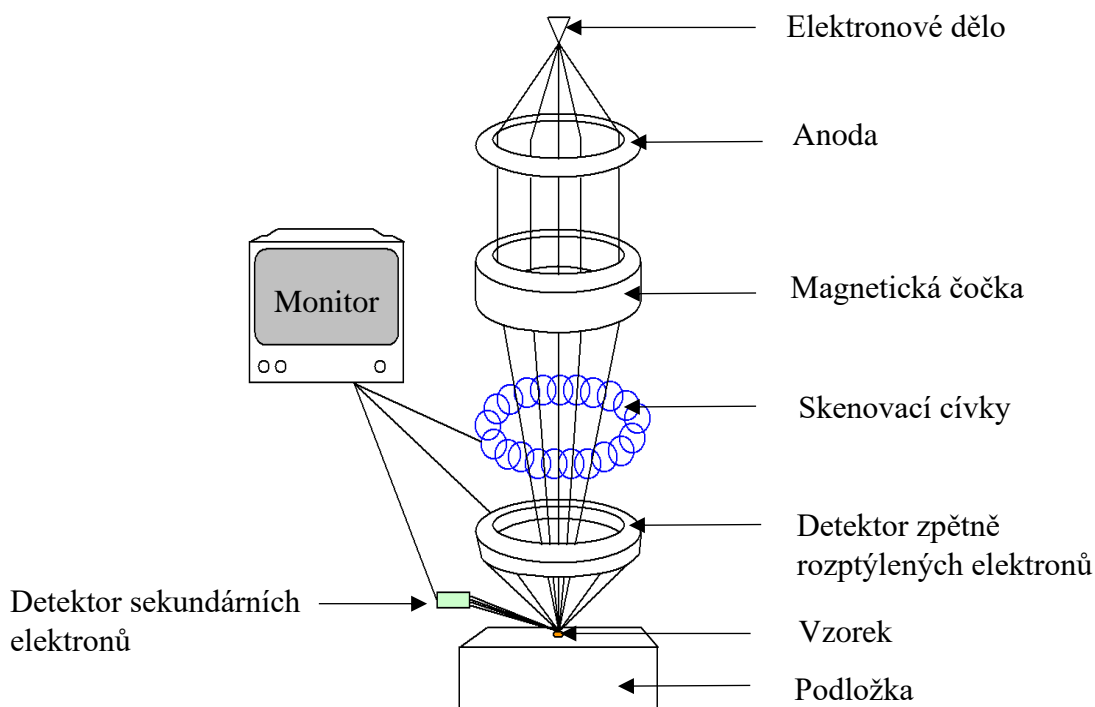
- **Výhody a nevýhody konfokální mikroskopie**

Konfokální mikroskop má vyšší rozlišovací schopnost a také kontrast oproti klasickému optickému mikroskopu. Je to z důvodu, že je detekováno pouze světlo z ohniskové roviny. Mimo to má ale i další benefity. Příkladem může být prostorová rekonstrukce obrazu. Při posuvu vzorku blíže či dále od objektivu lze totiž zkoumat i roviny v různých hloubkách (vrstvách). Z velkého množství těchto dílčích optických řezů v různých vrstvách pak lze zpětně rekonstruovat celý prostorový obraz vzorku. Další výhodou je také neinvazivnost této metody či digitální výstup, se kterým je možno dále pracovat (náhledy, rotace a další). Konfokální mikroskopie je zahrnuta v rámci optické mikroskopie, nicméně v podstatě představuje článek mezi optickou mikroskopií a elektronovou mikroskopií. [48, 52]

## **5.2.2 Elektronová mikroskopie**

Elektronový mikroskop se liší oproti optickým mikroskopům zejména tím, že jsou zde fotony nahrazeny elektrony a skleněné čočky nahrazeny elektromagnetickými čočkami. Stejně jako v případě konfokální mikroskopie se i zde rozlišují různé druhy přístrojů.

- TEM – transmisní elektronový mikroskop pracuje na principu detekce prošlých elektronů skrze tenký vzorek.
- SEM – skenovací elektronový mikroskop využívá k zobrazení zpětně odražené elektrony potažmo sekundární elektrony. [45, 53]



Obrázek 25 Konstrukce elektronového mikroskopu.

- **Princip elektronového mikroskopu**

Základním prvkem mikroskopu je elektronové dělo produkující elektrony, které jsou dále urychlovány anodou na níž je napětí v rozmezí cca 5 – 30 kV (nejsilnější TEM nabízí až 300 kV). Velikost tohoto napětí ovlivňuje hloubku průniku, tedy vyšší napětí má za následek větší penetraci, která umožní větší rozlišení, ale zároveň způsobí i větší poškození vzorku z mikroskopického hlediska. Pro produkci konzistentního elektronového svazku je zásadní zajištění dostatečného vakua. Po průchodu anodou svazek dále prochází skrze elektromagnetickou čočku, která svazek fokusuje. Pak elektrony prochází skrze skenovací cívky, které svazek elektromagneticky vychylují, a tím umožňují rychlý pohyb svazku po povrchu vzorku. Dále svazek prochází detektorem zpětně odražených elektronů a dopadá na vzorek. Při dopadu na vzorek vzniká rentgenové záření (RTG) jakožto vedlejší produkt interakce elektronu s materiálem. Na základě tohoto RTG záření pak může být provedena prvková analýza, protože energie RTG záření je pro každý prvek rozdílná. Po dopadu svazku jsou následně snímány zpětně odražené, potažmo sekundární elektrony a výsledek je zobrazen na monitor. Zobrazování probíhá skrze luminescenci a emitované fotony jsou následně převedeny na elektrický signál a zesíleny. Rozdílem v měření v režimu odražených a sekundárních elektronů spočívá jejich energii a rychlosti, tedy v potřebě brzdit odražené, popřípadě urychlovat sekundární elektrony ještě před vyvoláním luminescence. [45, 54]

---

- **Výhody a nevýhody elektronové mikroskopie**

Elektronový mikroskop nabízí vedle samotného zobrazení vzorku také jeho prvkovou analýzu či informaci o krystalografické orientaci, popřípadě analýzu povrchových defektů vzorku (SEM), nebo také zkoumání homogenity vzorků až na atomární úrovni (tenký vzorek + TEM). Elektronové mikroskopy SEM se navíc snadno ovládají, mají relativně příjemné uživatelské rozhraní a data jsou získávána vcelku rychle. Vedle předností jsou zde ale i jistá úskalí. Velkým omezením jsou rozměry vzorku, které bývají omezeny na maximálně centimetry. Vzorky musí být navíc pevné a stabilní ve vakuu. U SEM často bývá také problém s detekcí velmi lehkých prvků, jako je například vodík, či helium. V souvislosti se zmíněnými lehkými prvky je vhodné zmínit poznatky pro praktické zkoumání. Při měření je důležitý fakt, že v režimu odražených elektronů budou pozorovaná tmavší místa indikovat přítomnost lehčích prvků. Příkladem může být kyslík, tedy tmavá místa mohou indikovat oxidaci. Zároveň platí, že ze šikmých ploch bude detekováno větší množství sekundárních elektronů a tato místa se budou jevit jako světlejší. [45, 53, 55]

Jistým omezením může být zároveň výrazná závislost na typu detektoru. Detektor má totiž zásadní vliv na energetické rozlišení a citlivost na prvky přítomné v malém množství. Používanými typy detektorů mohou být vlnové disperzní rentgenové detektory WDS (z anglického *Wavelength-Dispersive X-Ray Spectroscopy*) či energiově disperzní detektory EDS (z anglického *Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy*), které umožňují analýzu chemického složení. Pro průzkum velmi malých hloubek povrchů odpovídajících cca 10 nm (cca 30 atomových vrstev) je vhodné použít rentgenovou fotoelektronovou spektroskopii XPS (z anglického *X-Ray Photoelectron Spectroscopy*). Chemické složení takto tenkých vrstev měřených pomocí XPS se často liší od složení poskytnutého zmíněnými metodami. XPS zároveň nabízí jednoznačné určení prvků a to v libovolné směsi. [56]

---

## PRAKTICKÁ ČÁST

### 6 Úvod do experimentu a návrh měření

Experimentální část zkoumá vliv degradace vývodů na pájitelnost vybraných typů SMD součástek při různých tavidlech. Pro tyto potřeby bylo vybráno 5 typů součástek (dále označovány také jako vzorky) s různými daty expirace. Cílem bylo porovnat exspirované a neexspirované vzorky z hlediska možných rozdílů v jejich pájitelnosti a na základě experimentu předat doporučení, zda je možné exspirované součástky v průmyslové praxi dále používat či nikoli.

Hlavním parametrem, který může udávat kvalitu či míru degradace vývodu součástky, je právě pájitelnost, která byla popsána v teoretické části, v kapitole 1.2. Po průzkumu možností měření tohoto parametru bylo navrženo využití metody smáčecích vah, která je rovněž popsána v teoretické části, v kapitole 5.1.1. Ta umožňuje kvantitativní měření a přináší exaktní výstupy experimentu. Pro doplnění a podložení naměřených výsledků metodou smáčecích vah byla navržena také vizuální kontrola vývodů. K těmto účelům bylo možné využít vybavení laboratoře sestávajícího z konfokálního mikroskopu Keyence VK-X1000 vhodného k optickým měřením a elektronového mikroskopu SEM Thermo Scientific Phenom ProX zprostředkovávajícího také prvkové analýzy. Pro komplexnost a hloubkový vhled do materiálových struktur bylo navrženo také zhotovení metalografických výbrusů, které ve spojení se zmíněnou mikroskopií a dalšími nástroji nabízí výzkum a měření intermetalických vrstev.

Tímto posledním krokem by bylo měření ucelené a přinášelo by exaktní výsledky týkající se smáčení vývodů a vizuální výsledky jejich povrchových i pod povrchových materiálových změn spolu s analýzou chemického složení.

### 7 Použité materiály

#### 7.1 Rozdělení vzorků a tavidel

Měřené vzorky byly před započítím experimentu v originálním obalu, tedy uschovány v kotoučových zásobnících v balení po 1800 a 3000 ks. Z důvodu předchozího používání bylo součástek v některých zásobnících znatelně méně. Další informace o způsobu a místě předchozího skladování (např. vlhkost a teplota prostoru) známy nebyly. Jak bylo zmíněno,



vzorky jsou různých typů, velikostí pouzder, vývodů, ale i různých povrchových úprav. Pro přehlednost je dále uvedena tabulka se specifikacemi. Data expirace v tabulkách jsou pro přehlednost barevně odlišena.

*Tabulka 7 Popis použitých součástek.*

Sada vzorků	Typ součástky	Pouzdro	Typ vývodu	Povrch. úprava	Datum expirace	RoHS štítek
1	PUMD13/1	SOT363	L (racčí křídlo)	Sn	06. 8. 2024	ANO
2	PESD12VL1BA	SOD323	L (racčí křídlo)	Sn	28. 5. 2024	ANO
3	PESD12VL1BA	SOD323	L (racčí křídlo)	Sn	1. 1. 2018	nenalezen
4	VN5E160STR-E	SO-8	L (racčí křídlo)	Ag	31. 12. 2019	nenalezen
5	VN5E160STR-E	SO-8	L (racčí křídlo)	Ag	12. 12. 2022	nenalezen

Pro měření pájitelnosti vývodů bylo vhodné před experimentem na vývody aplikovat tavidlo. Pro tyto účely byla vybrána 2 tavidla. Tavidlo Topnik LP-1 a tavidlo podle normy IPC (z důvodu zkrácení popisků je dále v textu označováno také jako IPC tavidlo). Pro stanovení referenční hodnoty smáčení byla jedna skupina vzorků smáčena také bez tavidla. Tavidlo LP-1 je tekuté transparentní tavidlo, které je vedeno v normě ČSN EN ISO 9454-1 pod označením 2.1.3.A. IPC tavidlo bylo vytvořeno v laboratoři podle příslušné normy, tedy bylo namícháno v poměru 75 % isopropyl alkohol a 25 % kalafuna. Díky této směsi má tavidlo nahnědlou barvu, typickou právě pro kalafunu.

## 7.2 Mikroskopie

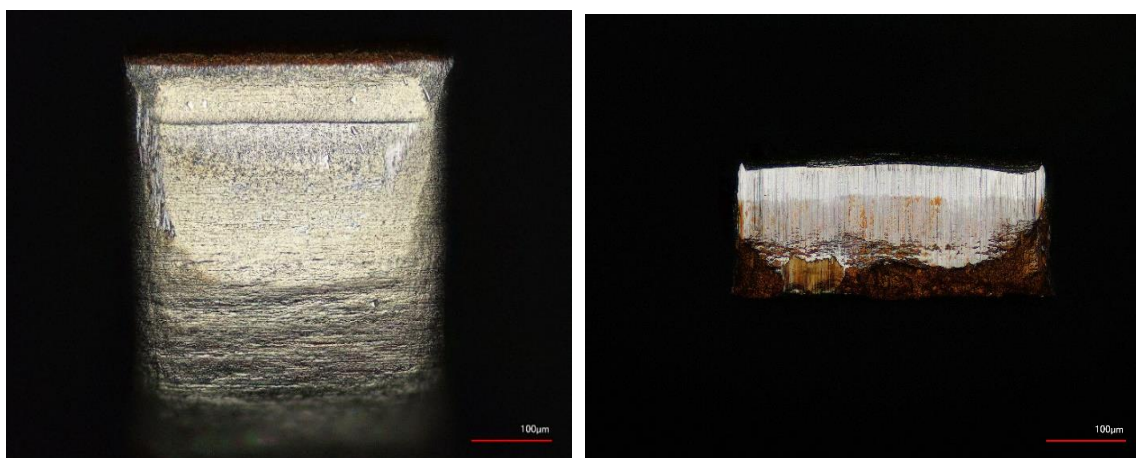
- **Konfokální mikroskop**

Prvním krokem experimentu byla vizuální kontrola a měření rozměrů vývodů na konfokálním mikroskopu. Měření bylo provedeno na laserovém skenovacím konfokálním mikroskopu Keyence VK-X1000 (obr. 26). Všechna pozorování vývodů byla provedena ze dvou pohledů a to z boční a ze spodní strany součástky. Oba pohledy jsou důležité zejména proto, že boční strana zajišťuje pohled na plochu, kterou byla součástka spuštěna do lázně při měření smáčivosti a spodní strana je pak plochou, která by byla po osazení v kontaktu s DPS. Mikroskop umožňuje osvětlovat vzorek kombinací bílého a laserového paprsku o vlnové délce 408 nm. Pro potřeby měření bylo využíváno osvětlení výrobcem označované jako ring, coax, a popřípadě i jejich kombinace. I když přístroj umožňuje přiblížení až 28 800×, při měření bylo využito pouze přiblížení v rozmezí 2,5× – 50× v závislosti na zkoumaném vzorku. [57]



**Obrázek 26** Konfokální mikroskop Keyence. [57]

Od každé sady vzorků bylo pod mikroskopem pozorováno více součástek (v případě že se jednotlivé vzorky ze stejné sady od sebe více vizuálně lišily, bylo provedeno více měření). Na základě snímků z mikroskopu byly učiněny předpoklady a očekávání před měřením metodou smáčecích vah. Ukázka obrázků (konkrétně vývodu součástky ze sady vzorků 4, před smáčením) je uvedena níže.



**Obrázek 27** Ukázka snímku z konfokálního mikroskopu (vlevo: spodní pohled na vývod, zvětšení 20 $\times$ , osvětlení coax, vpravo: přední pohled na vývod, zvětšení 20 $\times$ , osvětlení coax).

- **Elektronový mikroskop**

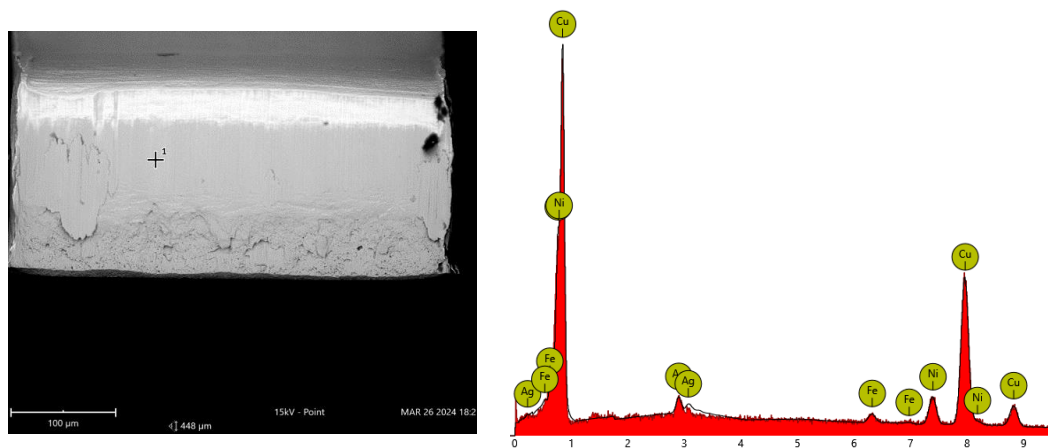
Pro praktickou část bylo vedle konfokálního mikroskopu využito také skenovacího elektronového mikroskopu – SEM Thermo Scientific Phenom ProX. Zkoumání chemického složení zprostředkovává softwarový balíček a plně integrovaný energiově disperzní spektrometr. Elektronové dělo pracuje při napětích 5, 10 a 15 kV, přičemž v praktické části

---

bylo využíváno výhradně napěťové úrovně 15 kV a to primárně v režimu zkoumání bodů (point) a v některých případech také v režimu zkoumání plochy (map). Obrázek mikroskopu a ukázka změřeného spektra prvků je uveden níže. [57]



**Obrázek 28** Skenovací elektronový mikroskop Phenom. [57]



**Obrázek 29** Ukázka měření vývodu na SEM a prvková analýza vybraného bodu. (Sada vzorků 4, 15 kV - Point)

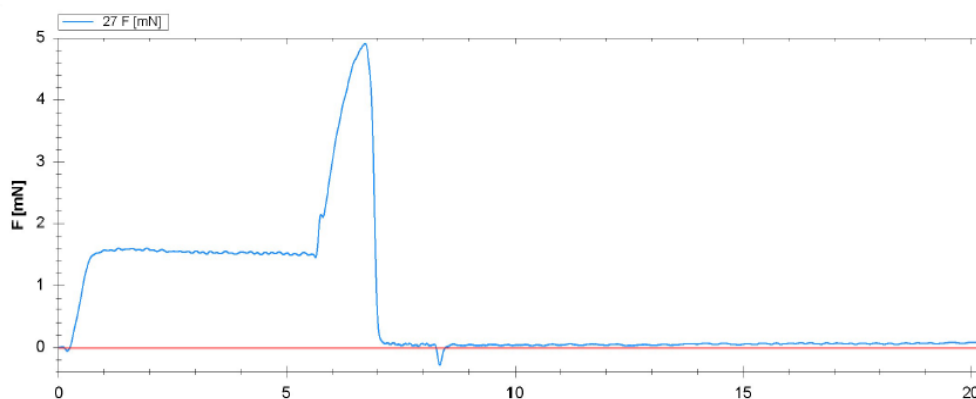
### 7.3 Meniskograf

V další části bylo provedeno měření smáčivosti vývodů součástek a to při dvou různých tavidlech a bez tavidla. Před vlastním měřením bylo provedeno několik pokusů pro odladění hloubky ponoru a dalších parametrů experimentu. Nanášení tavidla spočívalo v odlití části tavidla do víčka, do kterého byly pinzetou namáčeny vývody součástek. Tavidlo zde bylo použito, aby byl patrný rozdíl ve smáčení při použití různých typů tavidel a jako reference byly smáčeny vzorky bez tavidla. Hned po aplikaci tavidla bylo přebytečné tavidlo odstraněno a vzorky následně uchyceny do meniskografu a vzápětí bylo provedeno měření. Obrázek meniskografu je uveden dále.



**Obrázek 30** Meniskograf Microtronik LBT 210, stejný typ byl využit při experimentu. [58]

Při práci s meniskografem bylo nejprve nutné v systému vytvořit měřicí skupinu pro exspirované a neexspirované vzorky a definovat měřené součástky. Do systému byly pro každou sadu vzorků zadány rozteče, rozměry, tvary a počty vývodů. Je dobré zmínit, že v datasheetech od výrobce součástek byly často uváděny velké tolerance, proto byly rozměry několika vzorků změřeny také na konfokálním mikroskopu. Z měření vyplynulo, že součástky se často pohybují v lepším případě na hraně tolerancí a v horším případě jsou skutečné rozměry o něco menší. Definovány byly tedy průměrné rozměry změřené mikroskopem. Pro každý vzorek bylo také nutné nastavit parametry jako hloubka ponoru, které byly zjišťovány experimentálně. Hloubky ponorů jednotlivých vzorků odpovídaly 140  $\mu\text{m}$  (vzorky 1), 90  $\mu\text{m}$  (vzorky 2 a 3) a 300  $\mu\text{m}$  (vzorky 4 a 5). Pájecí pasta byla pro všechna měření stejná a jednalo se o SAC305. Teplota tání byla pokaždé nastavena na hodnotu 270  $^{\circ}\text{C}$ . Po nastavení a stabilizaci teploty, zvolení definovaného vzorku a měřicí skupiny bylo vždy spuštěno měření. Po ukončení měření došlo k automatickému vygenerování smáčecí křivky, včetně naměřených dat a se zvlášť vyznačenými hodnotami, které byly využity pro vyhodnocení dle kapitoly 5.1.1, tedy dle zdroje [38]. Ukázka vygenerované smáčecí křivky je uvedena dále.

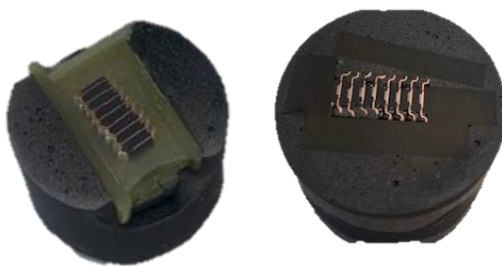


**Obrázek 31** Ukázka průběhu smáčení jedné strany vývodů vzorku 4.

---

## 7.4 Metalografické výbrusy

Zhotovení a měření metalografických výbrusů je již posledním dílem experimentální části práce. Výbrusy byly zhotoveny výlučně pro součástky s většími pouzdry, tedy skupiny vzorků 4 a 5. U menších součástek je zhotovení výbrusů velmi problematické právě kvůli rozměrům pouzder a vývodů. Byly tedy zhotoveny 3 výbrusy, kde každý výbrus obsahoval 8 součástek. Jednalo se o součástky ze skupiny vzorků 4 a 5, které byly nesmáčeny, smáčeny bez tavidla a smáčeny s IPC a LP-1 tavidlem. Součástky k sobě byly přilepeny, umístěny do silikonové misky a zality epoxidem. Po vytvrzení byl epoxid včetně částí součástek odbroušen pomocí brusných kotoučů se zrnitostí až 2500. Aby bylo možné strukturu zkoumat pod elektronovým mikroskopem a výsledky byly dostatečně přesné, bylo přistoupeno k leštění povrchu. Leštění probíhalo pomocí leštících kotoučů v kombinaci s diamantovou suspenzí. Ukázka zhotoveného výbrusu je uvedena na následujícím obrázku.



*Obrázek 32 Vybroušené a vyleštěné metalografické výbrusy.*

Po výrobě výbrusu následovalo měření intermetalických vrstev, jejichž vznik byl očekáván na rozhraní povrchu součástky a pájecí pasty SAC305. Měření bylo provedeno na elektronovém mikroskopu v režimu point a map. Kromě prvkových analýz byly u každé intermetalické vrstvy zaznamenány 3 snímky se stejným zvětšením (tedy i měřítkem obrázku), jasem i kontrastem. Tyto snímky byly následně vloženy do programu NIS-Elements, kde na základě barevné odlišnosti intermetalické vrstvy byla vypočtena plocha náležící dané IML. Při známém měřítku obrázku ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ), známém počtu pixelů v obou osách obrázku a pomocí vypočtené plochy bylo možné snadno dopočítat průměrnou tloušťku IML napříč celým obrázkem. Pro větší statistický vzorek bylo toto provedeno pro všechny 3 snímky náležící jedné IML.

---

## 8 Metodika experimentu

Metodika experimentu odrážkovitě popíše provedené kroky od počátečního pozorování skrze mikroskopy po finální zhotovení výbrusů. Níže jsou kroky nastíněny včetně základních specifikací.

- Prvotní inspekce pomocí mikroskopů.
  - Konfokální mikroskopie – pozorování vývodů z více pohledů a při různých osvětleních a přiblíženích podle zkoumaného vzorku.
  - Elektronová mikroskopie SEM – pozorování při různých přiblíženích. s napětovou hladinou 15 kV. Součástí bylo provedení prvkových analýz.
- Měření smáčecími vahami.
  - Nastavení měřicích skupin v meniskografu a definování konkrétních vzorků před prvním měřením.
  - Čekání na stabilizaci teploty lázně.
  - Nanesení požadovaného tavidla na vývody.
  - Uchycení vzorku do nejvhodnějšího přípravku.
  - Spuštění měření.
  - Uložení automaticky vygenerované smáčecí křivky po měření.
- Zhotovení a měření metalografických výbrusů.
  - Výběr dostatečně velkých součástí pro výbrusy.
  - Uchycení součástí do silikonové mističky a zalití epoxidem.
  - Vytvrzení, vybroušení a leštění povrchu v požadované hladině (výšce).
  - Elektronová mikroskopie s prvkovou analýzou.
  - Měření tloušťky intermetalických vrstev v programu NIS-Elements.

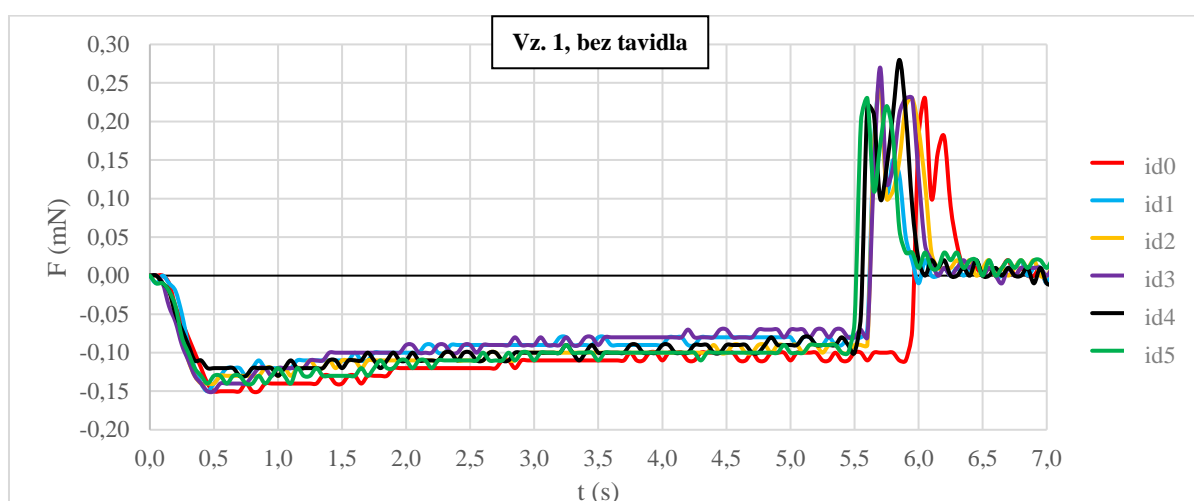
## 9 Výsledky experimentu

Ve výsledcích experimentu budou uvedeny výsledky měření zvolenými metodami, které jsou uvedeny v kapitole 8 Metodika experimentu. Výsledky budou uvedeny formou grafů, tabulek s hodnotami, snímků či jiným soupisem naměřených dat. Pro samotný rozbor výsledků a diskuzi je připravena kapitola 10 Vyhodnocení výsledků.

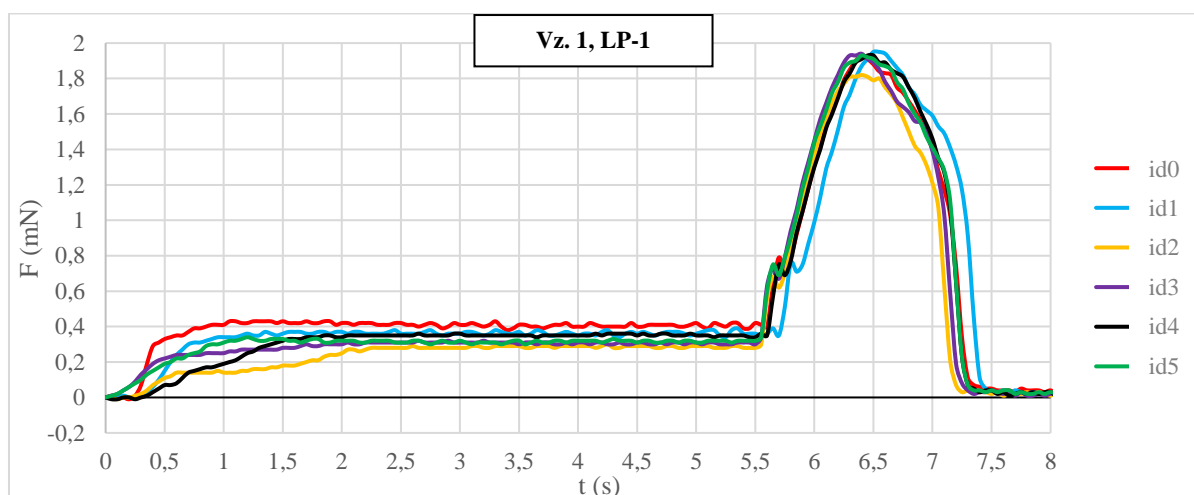
## 9.1 Výsledky pájitelnosti vzorků

V této kapitole budou představeny výsledky měření metodou smáčecích vah. Ke každé skupině grafů bude přidán krátký popis a tabulka výsledků včetně celkového skóre pájitelnosti každého smáčeného vývodu. Toto skóre bylo určeno na základě tabulky v kapitole 5.1.1 Metoda smáčecích vah. Vstupní hodnoty pro hodnocení  $t_0$ ,  $t_{2/3}$  a  $F_{\max}$  byly automaticky vygenerovány softwarem meniskografu. V případě, že se u některého z měřených časů vyskytuje hodnota  $\infty$ , znamená to, že k danému jevu vůbec nedošlo. Tedy nekonečný čas indikuje nulovou smáčivost. Popisky jednotlivých průběhů jsou označeny jako id“číslo“.

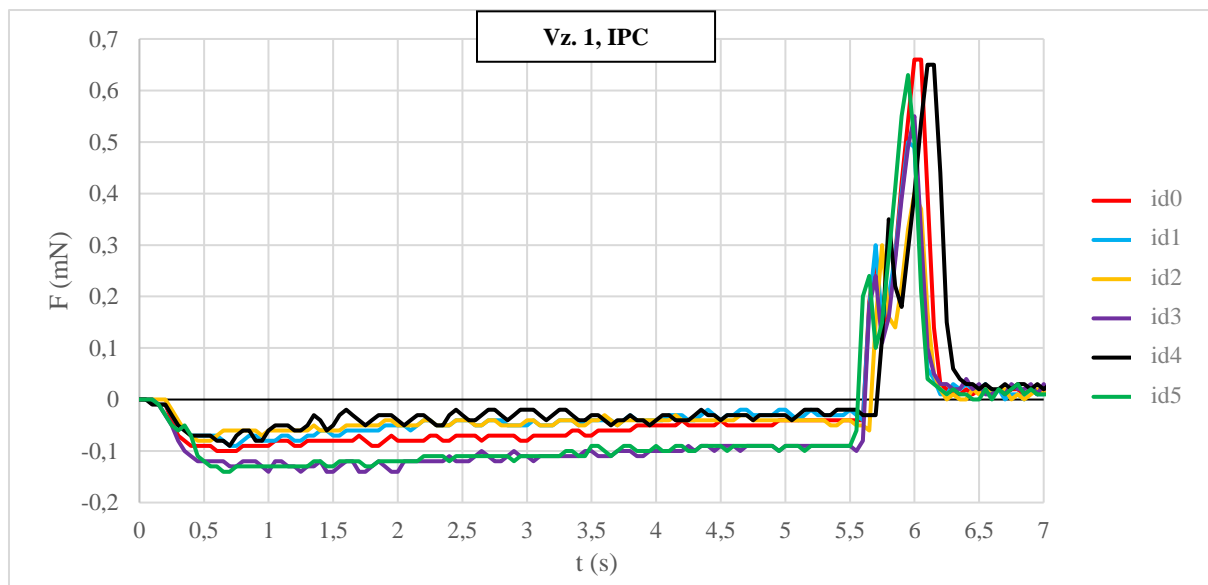
### • SADA VZORKŮ 1



Graf 1 Sada vzorků 1, smáčeno bez tavidla.



Graf 2 Sada vzorků 1, smáčeno s tavidlem LP-1.



**Graf 3** Sada vzorků 1, smáčeno s tavidlem podle normy IPC.

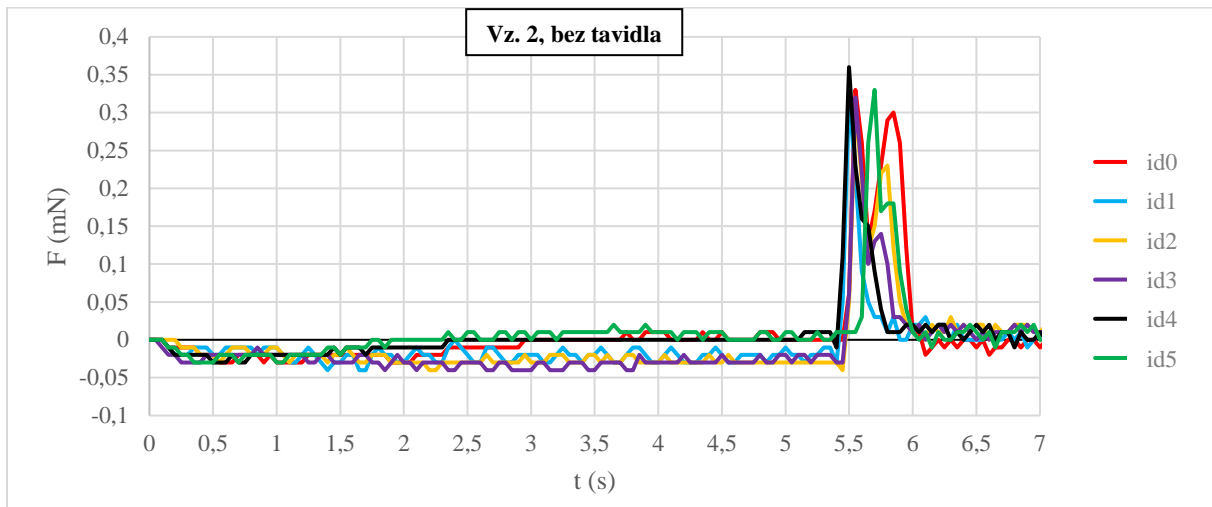
**Tabulka 8** Výsledky smáčení sady vzorků 1.

Tavidlo	id	$t_0$ (s)	$t_{2/3}$ (s)	$F_{\max}$ (mN)	Skóre $t_0$	Skóre $t_{2/3}$	Skóre $F_{\max}$	Skóre celkem
<b>Bez tavidla</b>	0	$\infty$	$\infty$	-0,097	0	0	0	<b>0</b>
	1	$\infty$	$\infty$	-0,076	0	0	0	<b>0</b>
	2	$\infty$	$\infty$	-0,091	0	0	0	<b>0</b>
	3	$\infty$	$\infty$	-0,07	0	0	0	<b>0</b>
	4	$\infty$	$\infty$	-0,083	0	0	0	<b>0</b>
	5	$\infty$	$\infty$	-0,093	0	0	0	<b>0</b>
<b>LP-1</b>	0	0,23	0,41	0,436	3	4	3	<b>10</b>
	1	0,08	0,62	0,384	3	4	3	<b>10</b>
	2	0,15	1,69	0,297	3	2	2	<b>7</b>
	3	0	0,46	0,318	3	4	3	<b>10</b>
	4	0,15	1,19	0,364	3	3	3	<b>9</b>
	5	0	0,66	0,339	3	4	3	<b>10</b>
<b>IPC</b>	0	$\infty$	$\infty$	-0,038	0	0	0	<b>0</b>
	1	$\infty$	$\infty$	-0,02	0	0	0	<b>0</b>
	2	$\infty$	$\infty$	-0,032	0	0	0	<b>0</b>
	3	$\infty$	$\infty$	-0,087	0	0	0	<b>0</b>
	4	$\infty$	$\infty$	-0,016	0	0	0	<b>0</b>
	5	$\infty$	$\infty$	-0,085	0	0	0	<b>0</b>

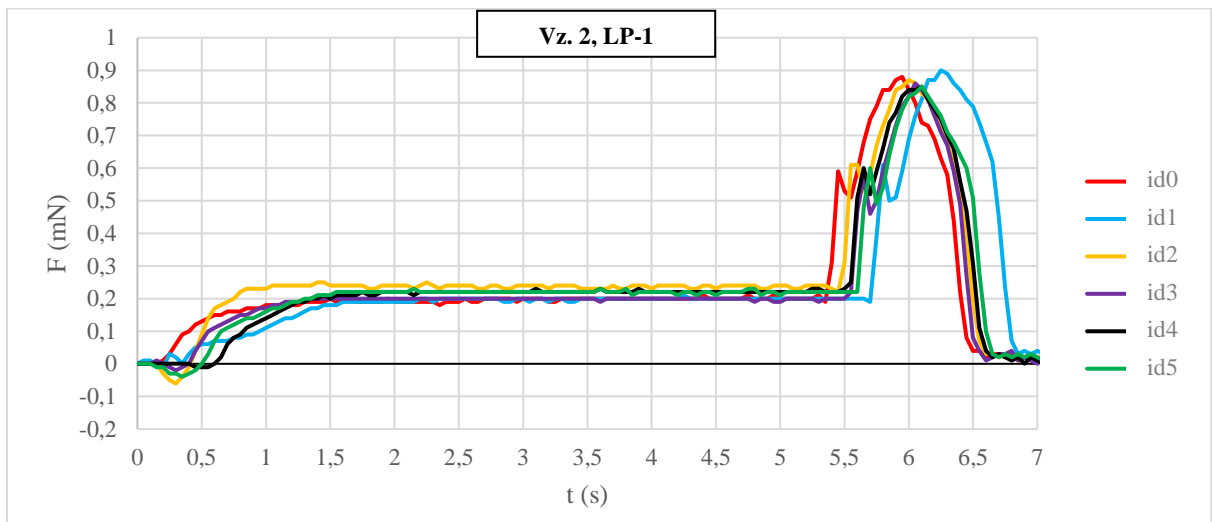
Z tabulky 8 jasně vyplývá, že žádný ze vzorků smáčených bez tavidla a s IPC tavidlem nesmáčí. Všechny změřené časy jsou nekonečné, síly záporné, a tedy výsledky jsou v tomto ohledu velmi konzistentní. Jednoznačně nejlepších výsledků dosahuje tavidlo LP-1, které ve 4 ze 6 případů vykazuje maximální hodnotu celkového skóre. Průměrné celkové skóre všech měření s tímto tavidlem pak odpovídá 9,33. Na zmíněnou relativně vysokou konzistenci výsledků poukazují také grafy 1 – 3, kde se od sebe průběhy liší jen velmi málo.



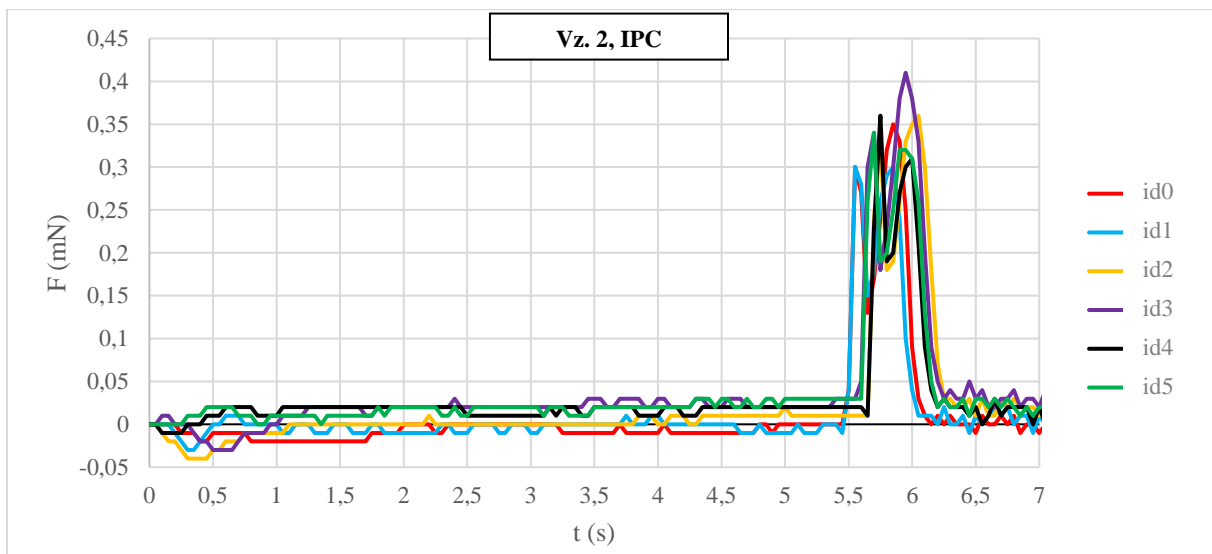
• SADA VZORKŮ 2



Graf 4 Sada vzorků 2, smáčeno bez tavidla.



Graf 5 Sada vzorků 2, smáčeno s tavidlem LP-1.



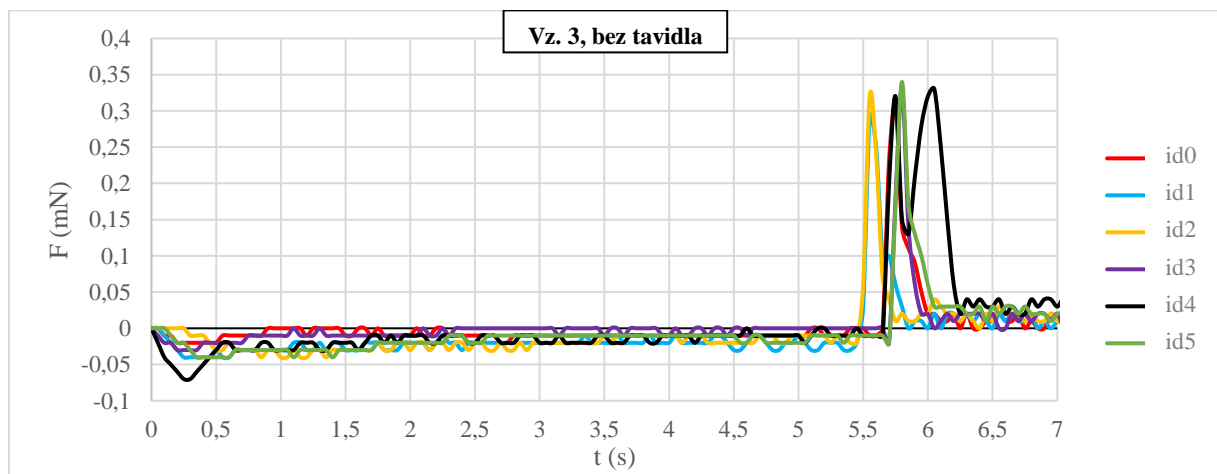
Graf 6 Sada vzorků 2, smáčeno s tavidlem podle normy IPC.

Tabulka 9 Výsledky smáčení sady vzorků 2.

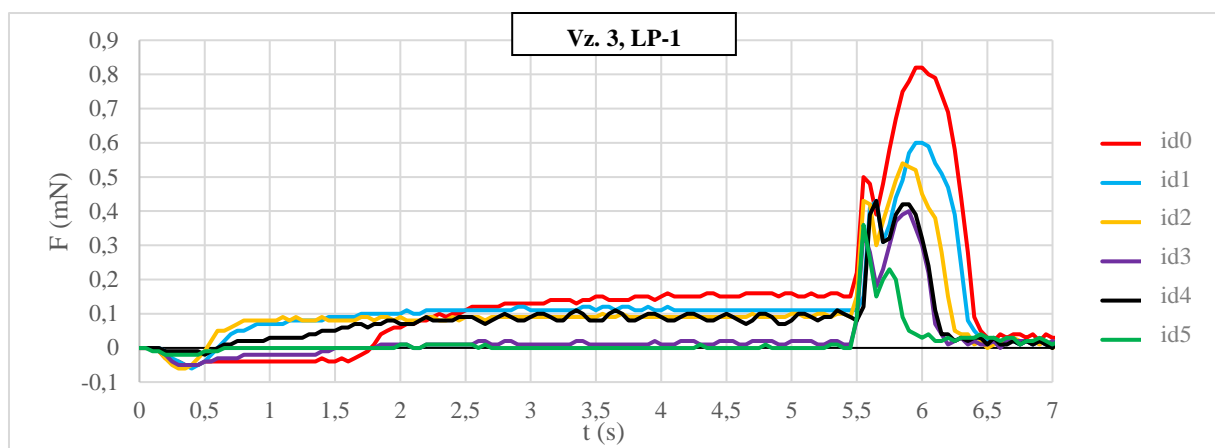
Tavidlo	id	$t_0$ (s)	$t_{2/3}$ (s)	$F_{max}$ (mN)	Skóre $t_0$	Skóre $t_{2/3}$	Skóre $F_{max}$	Skóre celkem
Bez tavidla	0	3,41	3,7	0,007	0	0	0	0
	1	$\infty$	$\infty$	-0,003	0	0	0	0
	2	$\infty$	$\infty$	-0,02	0	0	0	0
	3	$\infty$	$\infty$	-0,02	0	0	0	0
	4	2,77	3,13	0,006	1	0	0	1
	5	1,92	3,1	0,019	2	0	0	2
LP-1	0	0,16	0,56	0,207	3	4	2	9
	1	0,22	1,14	0,207	3	3	2	8
	2	0,41	0,6	0,248	3	4	2	9
	3	0,39	0,73	0,205	3	4	2	9
	4	0,61	1,06	0,227	3	3	2	8
	5	0,5	0,99	0,231	3	4	2	9
IPC	0	2,58	2,63	0,002	1	1	0	2
	1	0,53	0,59	0,011	3	4	0	7
	2	1,37	4,38	0,015	2	0	0	2
	3	0,98	1,81	0,03	3	2	0	5
	4	0,36	0,57	0,023	3	4	0	7
	5	0,21	2,24	0,027	3	1	0	4

I zde je patrné, že vzorky bez tavidla opět nesmáčí (průměrná hodnota odpovídá 0,50), ale rozdíl nastává u tavidla IPC, kde se celková skóre vzájemně velmi liší. Maximální síly jsou ve všech případech tohoto tavidla velmi malé a odpovídající skóre nulové. Rozptyl výsledků tedy způsobuje pouze čas, kdy došlo k velmi slabému smáčení. Průměrné celkové skóre (složené z velmi nestálých hodnot) tedy odpovídá 4,50. Při uvážení výsledků tavidla IPC lze říci, že smáčení je velmi slabé, ale dochází k němu relativně rychle. Nejlepší výsledky opět předkládá tavidlo LP-1. Výsledky mají relativně malý rozptyl a průměrné celkové skóre je 8,67.

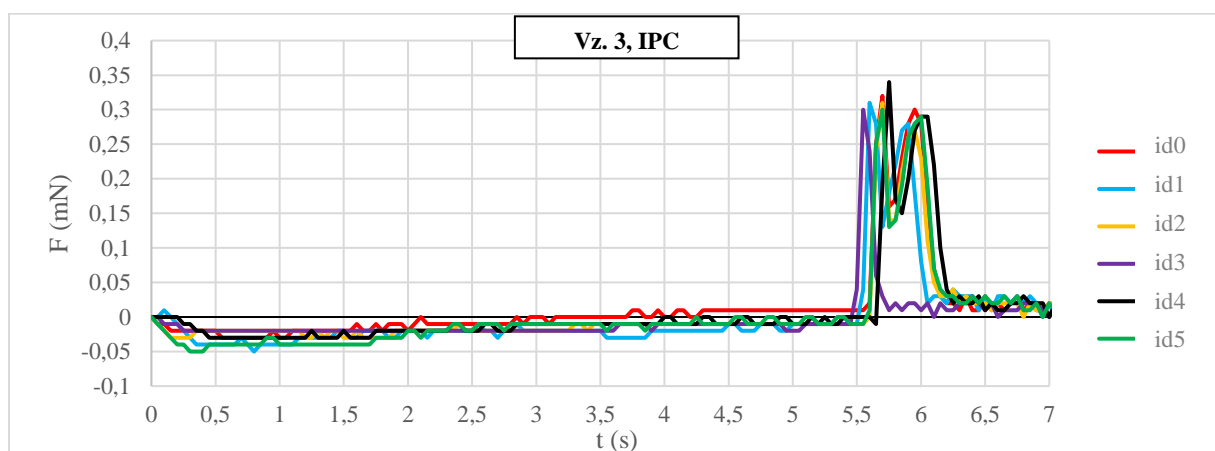
### • SADA VZORKŮ 3



Graf 7 Sada vzorků 3, smáčeno bez tavidla.



Graf 8 Sada vzorků 3, s tavidlem LP-1.



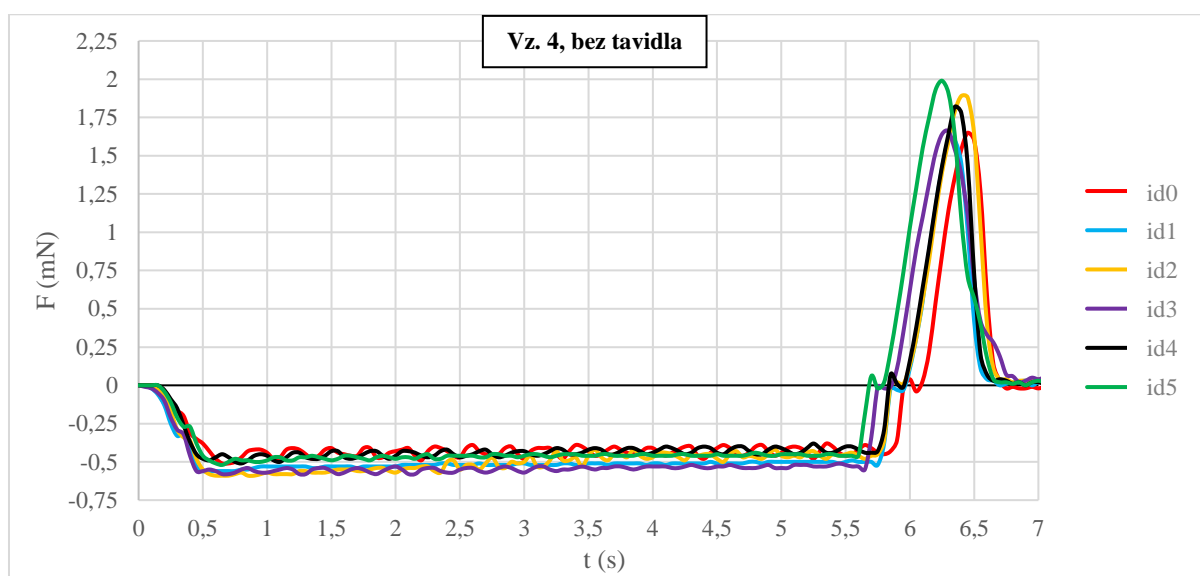
Graf 9 Sada vzorků 3, smáčeno s tavidlem podle normy IPC.

Tabulka 10 Výsledky smáčení sady vzorků 3.

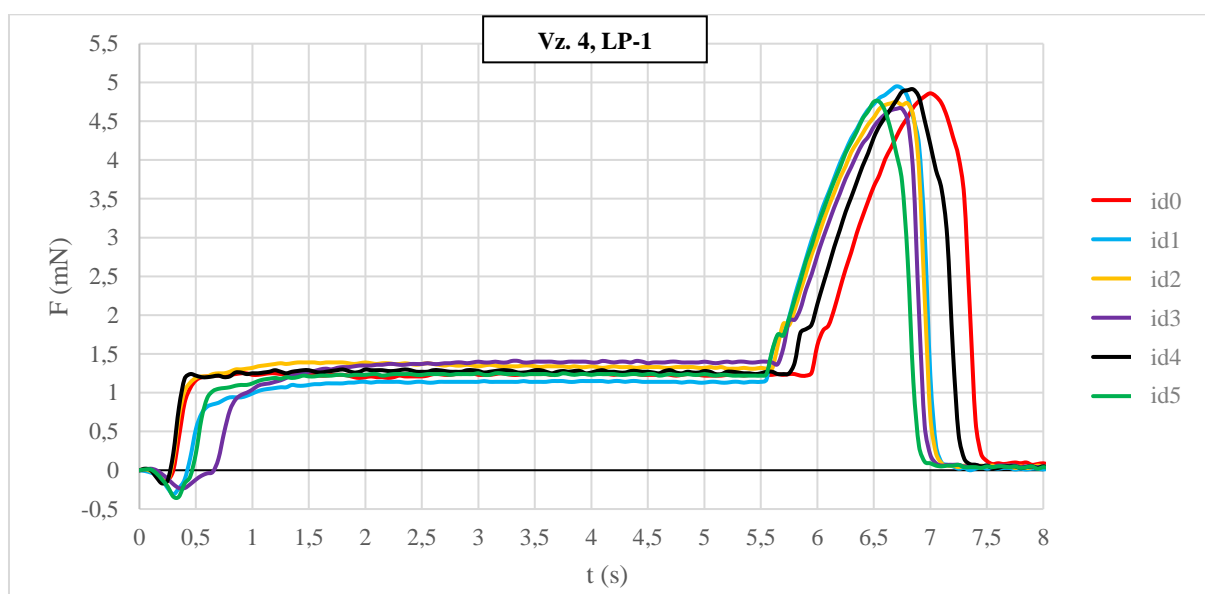
Tavidlo	id	$t_0$ (s)	$t_{2/3}$ (s)	$F_{\max}$ (mN)	Skóre $t_0$	Skóre $t_{2/3}$	Skóre $F_{\max}$	Skóre celkem
Bez tavidla	0	$\infty$	$\infty$	-0,001	0	0	0	0
	1	$\infty$	$\infty$	-0,006	0	0	0	0
	2	$\infty$	$\infty$	-0,008	0	0	0	0
	3	2,38	4,99	0,004	1	0	0	1
	4	$\infty$	$\infty$	-0,004	0	0	0	0
	5	$\infty$	$\infty$	-0,005	0	0	0	0
LP-1	0	1,77	2,47	0,164	2	1	1	4
	1	0,6	1,22	0,119	3	3	1	7
	2	0,52	0,7	0,098	3	4	0	7
	3	1,57	2,49	0,019	2	1	0	3
	4	0,6	1,87	0,11	3	2	1	6
	5	0,89	1,97	0,008	3	2	0	5
IPC	0	3,01	4,28	0,012	0	0	0	0
	1	$\infty$	$\infty$	-0,01	0	0	0	0
	2	$\infty$	$\infty$	-0,005	0	0	0	0
	3	$\infty$	$\infty$	-0,007	0	0	0	0
	4	$\infty$	$\infty$	0	0	0	0	0
	5	4,8	4,81	0,001	0	0	0	0

V tomto případě se jedná o exspirovanou variantu součástek ze sady 2. Z tabulky 10 plyne, že výsledky smáčivosti vzorků bez tavidla i s IPC tavidlem jsou velmi konzistentní a nepříznivé. Síly jsou ve většině případů záporné a naměřené časy často odpovídají nekonečnu. Lze tedy říci, že vzorky prakticky nesmáčí. Součástky smáčené s tavidlem LP-1 dosahují sice nejlepších celkových skóre pájitelnosti, ale v porovnání s neexspirovanou sadou vykazují obecně nižší  $F_{\max}$  a vyšší rozptyl celkových skóre. Jejich průměr zde odpovídá 5,33. Při pokusu o zpřesnění výsledků s tavidlem LP-1 bylo změřeno více hodnot, ale rozptyl se přesto nijak nezlepšil. V tomto případě jsou tedy výsledky velmi závislé na konkrétním vývodu.

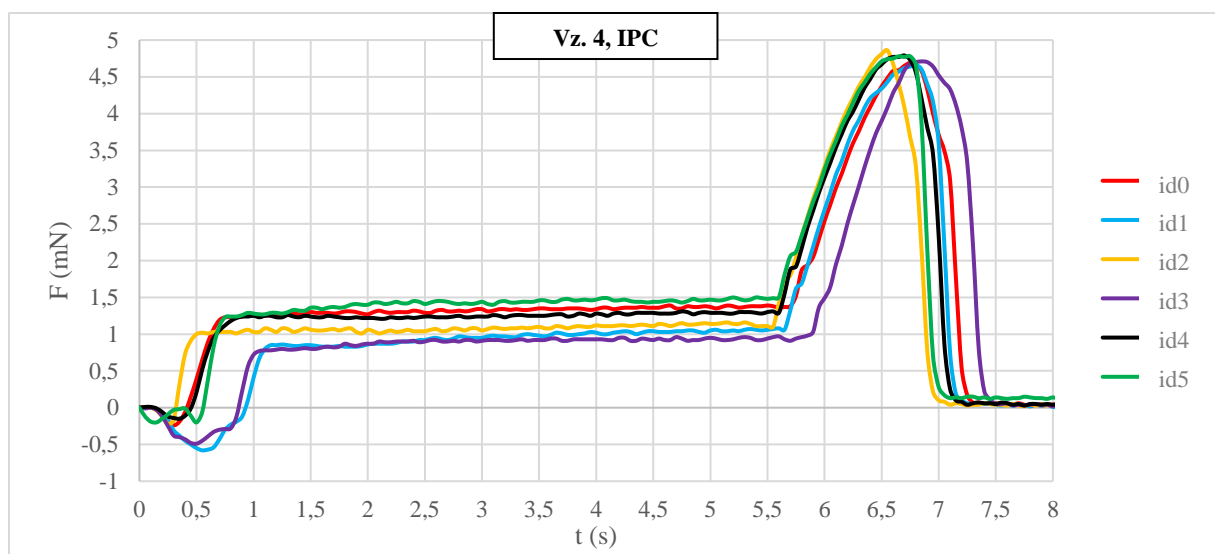
- SADA VZORKŮ 4



Graf 10 Sada vzorků 4, smáčeno bez tavidla.



Graf 11 Sada vzorků 4, smáčeno s tavidlem LP-1.



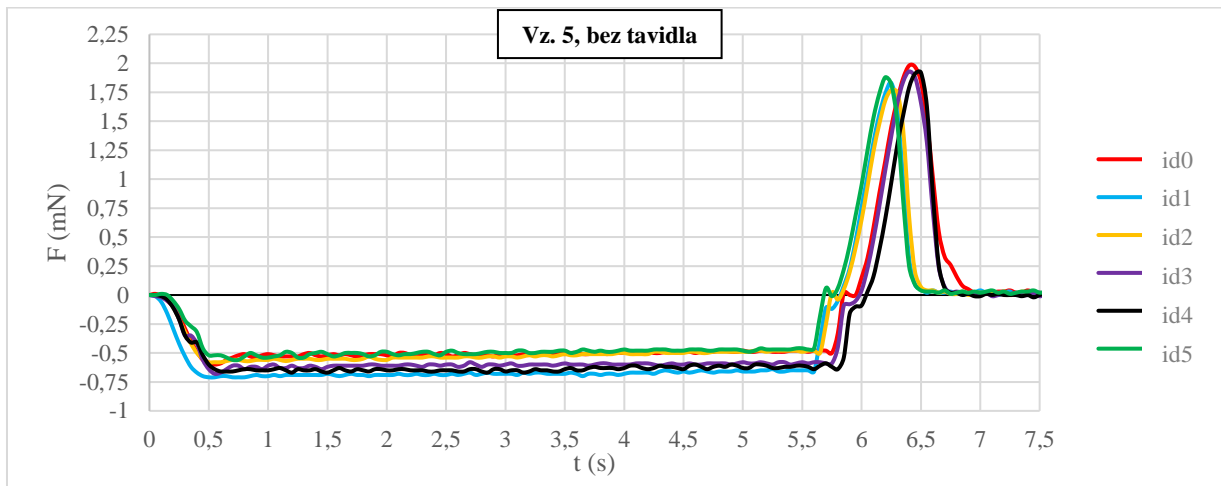
Graf 12 Sada vzorků 4, smáčeno s tavidlem podle normy IPC.

Tabulka 11 Výsledky smáčení sady vzorků 4.

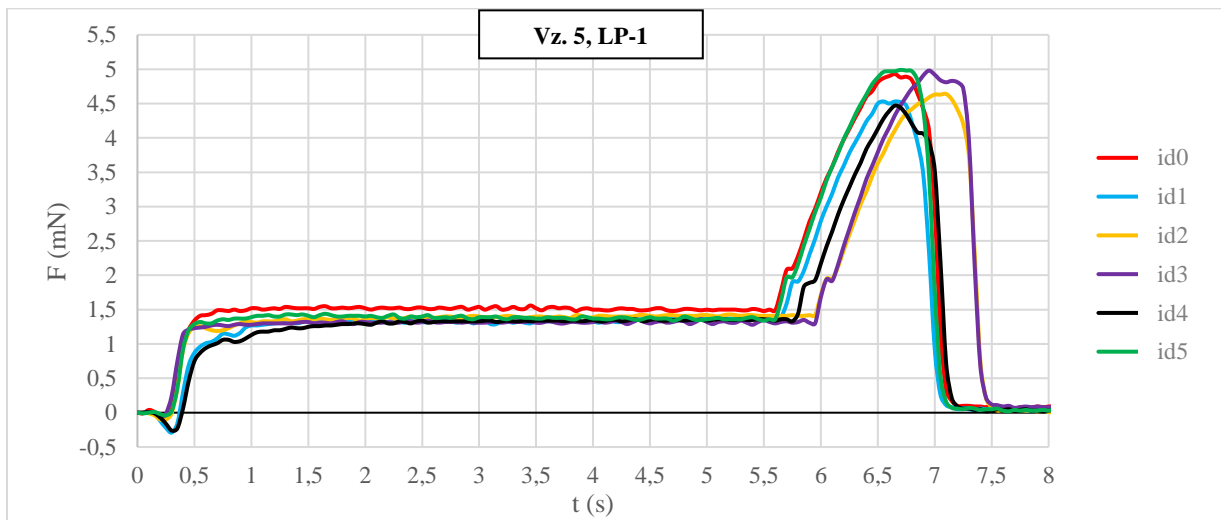
Tavidlo	id	$t_0$ (s)	$t_{2/3}$ (s)	$F_{max}$ (mN)	Skóre $t_0$	Skóre $t_{2/3}$	Skóre $F_{max}$	Skóre celkem
<b>Bez tavidla</b>	0	$\infty$	$\infty$	-0,382	0	0	0	<b>0</b>
	1	$\infty$	$\infty$	-0,492	0	0	0	<b>0</b>
	2	$\infty$	$\infty$	-0,413	0	0	0	<b>0</b>
	3	$\infty$	$\infty$	-0,517	0	0	0	<b>0</b>
	4	$\infty$	$\infty$	-0,385	0	0	0	<b>0</b>
	5	$\infty$	$\infty$	-0,436	0	0	0	<b>0</b>
<b>LP-1</b>	0	0,3	0,4	1,265	3	4	3	<b>10</b>
	1	0,43	0,56	1,16	3	4	3	<b>10</b>
	2	0,28	0,38	1,401	3	4	3	<b>10</b>
	3	0,66	0,87	1,418	3	4	3	<b>10</b>
	4	0,27	0,36	1,309	3	4	3	<b>10</b>
	5	0,47	0,58	1,257	3	4	3	<b>10</b>
<b>IPC</b>	0	0,41	0,61	1,396	3	4	3	<b>10</b>
	1	0,93	1,06	1,059	3	3	3	<b>9</b>
	2	0,32	0,41	1,155	3	4	3	<b>10</b>
	3	0,87	0,97	0,965	3	4	3	<b>10</b>
	4	0,45	0,63	1,313	3	4	3	<b>10</b>
	5	0,56	0,67	1,502	3	4	3	<b>10</b>

V uvedené tabulce se opět projevuje již známý jev, tedy že vzorky bez naneseného tavidla nesmáčí, a to ani s Ag povrchovou úpravou. Rozdílem oproti již známým výsledkům je významné zlepšení smáčivosti při aplikaci IPC tavidla. Hodnoty se drží v okolí maximálního celkového skóre pájitelnosti. Průměr těchto celkových skóre pak odpovídá 9,83, což je zásadní posun, protože dříve uvedené vzorky s IPC tavidlem nedosahují ani poloviny této hodnoty. Není proto překvapením, že při použití tavidla LP-1 vzorky smáčí naprosto skvěle a z příložených grafů je patrné, že smáčecí křivky vykazují minimální rozptyl.

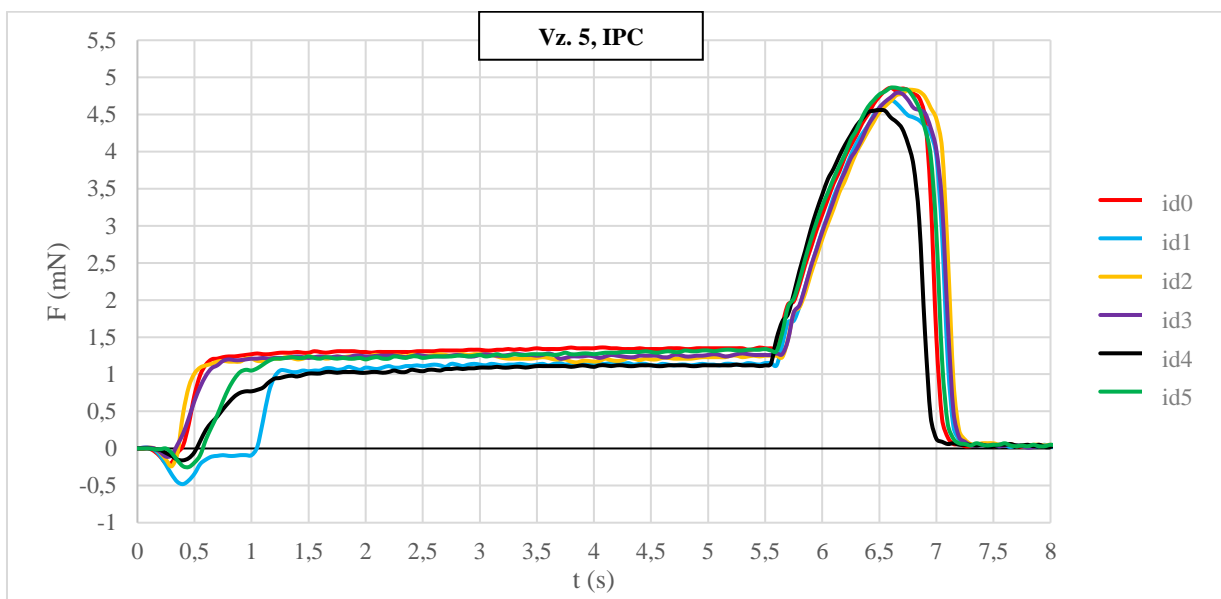
• SADA VZORKŮ 5



Graf 13 Sada vzorků 5, smáčeno bez tavidla.



Graf 14 Sada vzorků 5, smáčeno s tavidlem LP-1.



Graf 15 Sada vzorků 5, smáčeno s tavidlem podle normy IPC.

Tabulka 12 Výsledky smáčení sady vzorků 5.

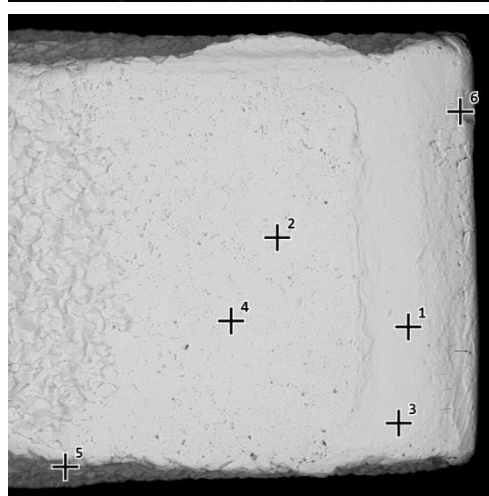
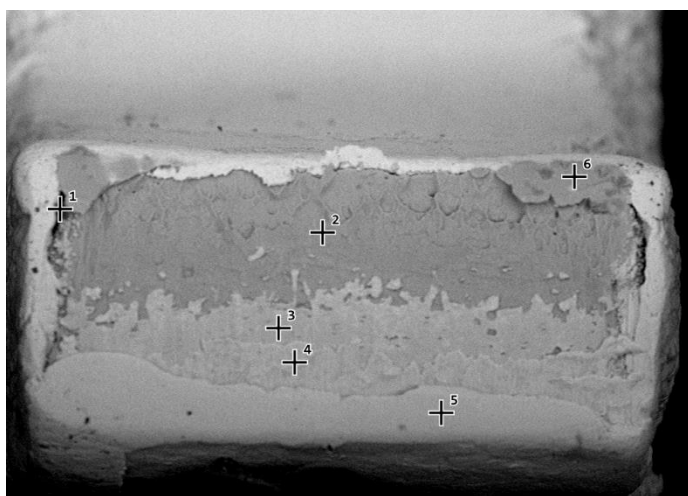
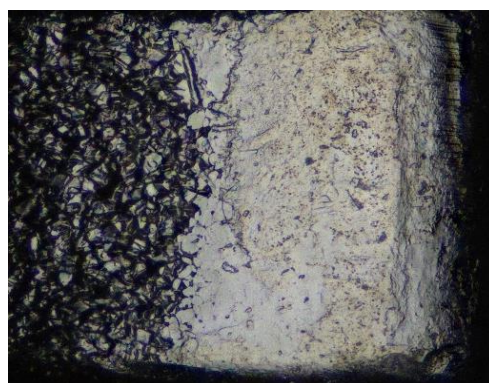
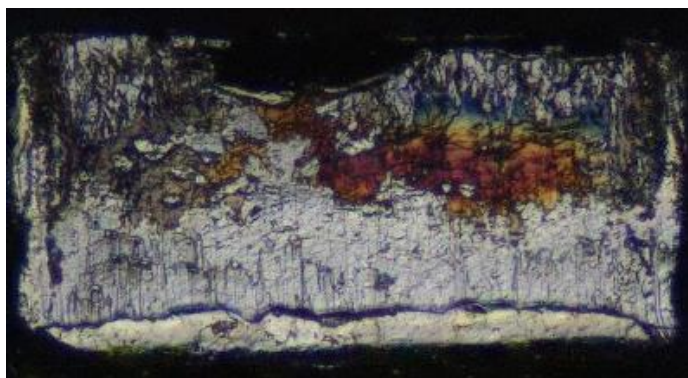
Tavidlo	id	t <sub>0</sub> (s)	t <sub>2/3</sub> (s)	F <sub>max</sub> (mN)	Skóre t <sub>0</sub>	Skóre t <sub>2/3</sub>	Skóre F <sub>max</sub>	Skóre celkem
<b>Bez tavidla</b>	0	∞	∞	-0,47	0	0	0	<b>0</b>
	1	∞	∞	-0,64	0	0	0	<b>0</b>
	2	∞	∞	-0,478	0	0	0	<b>0</b>
	3	∞	∞	-0,57	0	0	0	<b>0</b>
	4	∞	∞	-0,593	0	0	0	<b>0</b>
	5	∞	∞	-0,461	0	0	0	<b>0</b>
<b>LP-1</b>	0	0,29	0,41	1,566	3	4	3	<b>10</b>
	1	0,37	0,53	1,391	3	4	3	<b>10</b>
	2	0,3	0,41	1,429	3	4	3	<b>10</b>
	3	0,25	0,37	1,365	3	4	3	<b>10</b>
	4	0,39	0,58	1,369	3	4	3	<b>10</b>
	5	0,29	0,4	1,446	3	4	3	<b>10</b>
<b>IPC</b>	0	0,38	0,53	1,368	3	4	3	<b>10</b>
	1	0,98	1,15	1,16	3	3	3	<b>9</b>
	2	0,36	0,45	1,284	3	4	3	<b>10</b>
	3	0,33	0,56	1,288	3	4	3	<b>10</b>
	4	0,52	0,89	1,131	3	4	3	<b>10</b>
	5	0,57	0,83	1,332	3	4	3	<b>10</b>

Tyto vzorky exspirovaly před kratším časem, než součástky ze sady 4 (sada vzorků 5 exspirovala před cca 1,5 rokem a sada 4 před cca 4,5 roky). Z výsledků plyne, že i zde se projevuje naprostá nesmáčivost vývodů bez aplikace tavidla a jednoznačná smáčivost vzorků opatřených tavidlem Topnik LP-1. Vzorky s IPC tavidlem rovněž smáčí a průměrná hodnota je stejná jako u déle exspirované varianty (sada 4). Z uvedených grafů pak plyne, že smáčecí křivky pro IPC tavidlo jsou méně rozptýleny, než smáčecí křivky sady vzorků 4 při stejném tavidle.

## 9.2 Výsledky mikroskopie

Dále budou uvedeny snímky vývodů, které byly zachyceny na konfokálním a elektronovém mikroskopu před tím, než došlo k měření metodou smáčecích vah. Obrázky slouží primárně jako ukázka materiálových změn mezi exspirovanými a neexspirovanými součástkami. Pro úplnost budou uvedeny také výsledky prvkových analýz (zastoupení prvků jsou uvedeny v hmotnostních %). Výsledky těchto měření jsou spíše vizuálního charakteru a vypovídají o degradačních pochodech a chemickém složení povrchů, proto nebudou nijak dlouze komentovány. V obrázcích není uvedeno měřítko, ale jejich původní formáty s měřítkem jsou uvedeny v kapitole Přílohy. Další snímky vývodů po smáčení s různými tavidly jsou rovněž v přílohách.

• SADA VZORKŮ 1



Obrázek 33 Vzorek 1, konf. a SEM (přední strana).

Obrázek 34 Vzorek 1, konf. a SEM (spodní strana).

Obrázek 33:

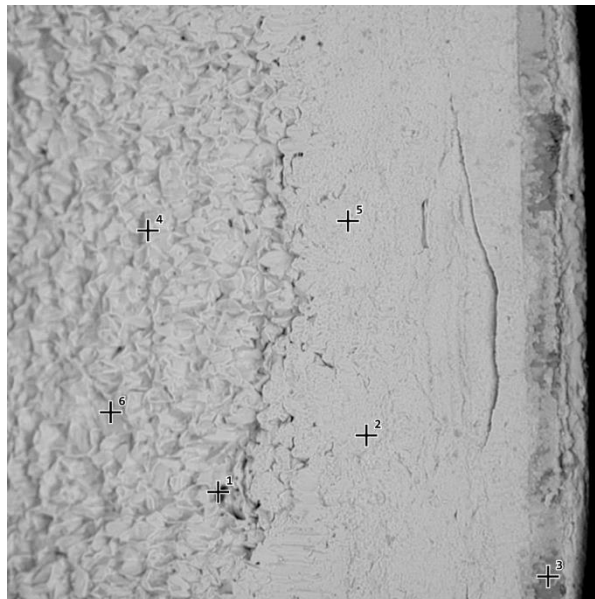
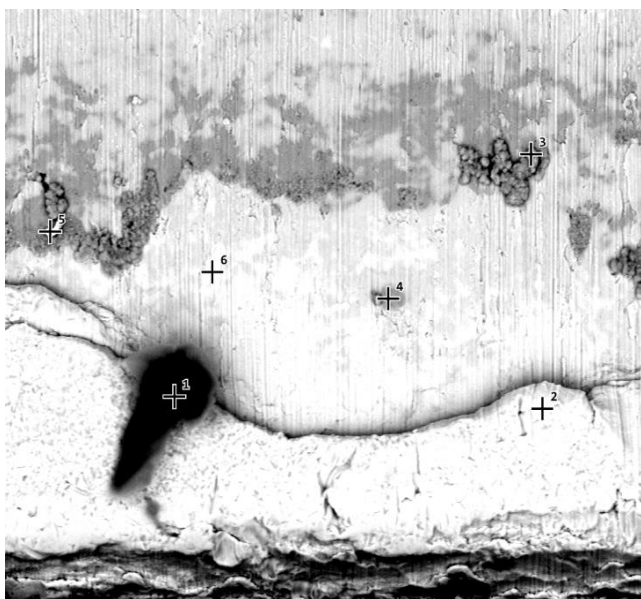
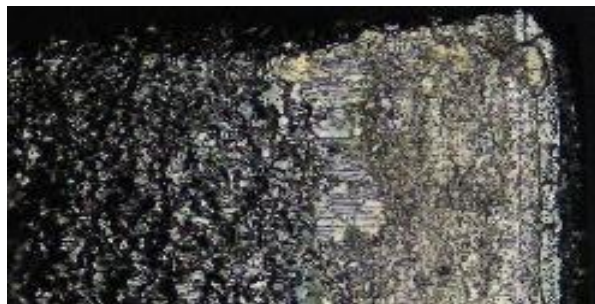
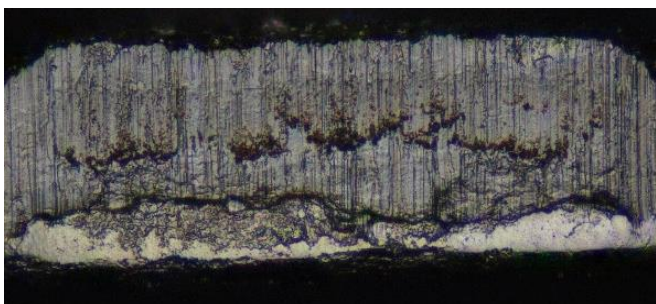
Bod 1:	Bod 2:	Bod 3:	Bod 4:	Bod 5:	Bod 6:
<b>Cu</b> (32,68 %),	<b>Fe</b> (42,78 %),	<b>Sn</b> (44,27 %),	<b>Sn</b> (68,33 %),	<b>Sn</b> (65,48 %),	<b>Fe</b> (36,99 %),
<b>Sn</b> (22,93 %),	<b>Ni</b> (30,23 %),	<b>Cu</b> (23,58 %),	<b>Al</b> (14,53 %),	<b>Al</b> (16,06 %),	<b>Ni</b> (26,18 %),
<b>C</b> (22,64 %),	<b>Al</b> (15,83 %)	<b>Al</b> (17,28 %),	<b>O</b> (7,46 %),	<b>O</b> (9,07 %),	<b>Al</b> (10,64 %),
<b>Al</b> (11,25 %),		<b>C</b> (6,52 %),	<b>C</b> (6,71 %),	<b>C</b> (7,22 %),	<b>Sn</b> (9,06 %),
<b>O</b> (7,40 %),		<b>O</b> (5,10 %),	<b>Cu</b> (2,97 %)	<b>Cu</b> (1,54 %)	<b>O</b> (8,90 %),
<b>Fe</b> (2,26 %)		<b>Fe</b> (2,62 %)			<b>C</b> (6,70 %)

Obrázek 34:

Bod 1:	Bod 2:	Bod 3:	Bod 4:	Bod 5:	Bod 6:
<b>Sn</b> (87,29 %),	<b>Sn</b> (81,84 %),	<b>Sn</b> (83,10 %),	<b>Sn</b> (84,30 %),	<b>Sn</b> (49,73 %),	<b>Sn</b> (65,69 %),
<b>O</b> (7,88 %),	<b>O</b> (7,58 %),	<b>O</b> (7,74 %),	<b>O</b> (8,16 %),	<b>O</b> (26,14 %),	<b>O</b> (14,67 %),
<b>C</b> (4,83 %)	<b>Te</b> (6,10 %),	<b>C</b> (4,86 %),	<b>C</b> (3,92 %),	<b>C</b> (24,13 %)	<b>C</b> (12,89 %),
	<b>C</b> (4,47 %)	<b>Te</b> (4,30 %)	<b>Te</b> (3,62 %)		<b>Te</b> (6,76 %)



• SADA VZORKŮ 2



*Obrázek 35 Vzorek 2, konf. a SEM (přední strana).*

*Obrázek 36 Vzorek 2, konf. a SEM (spodní strana).*

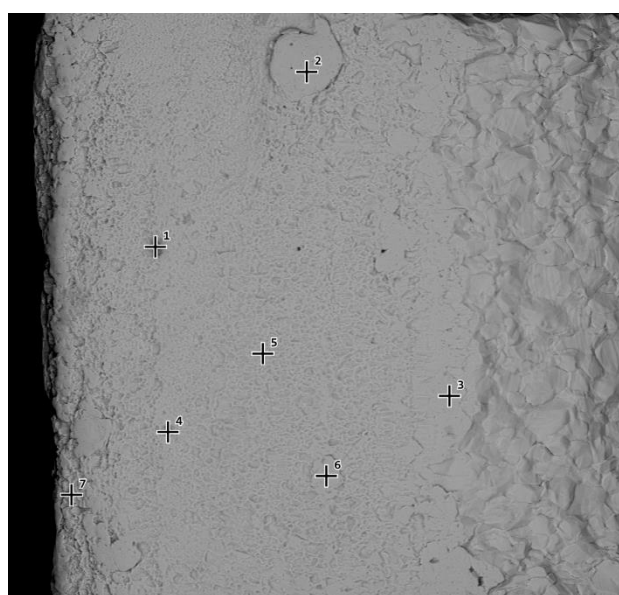
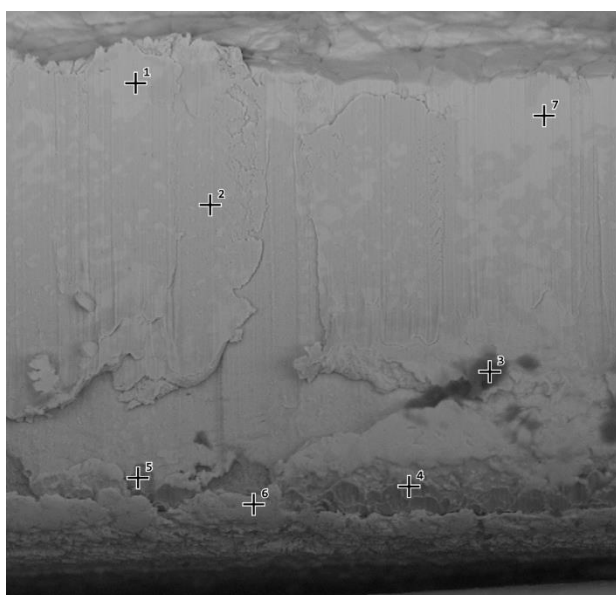
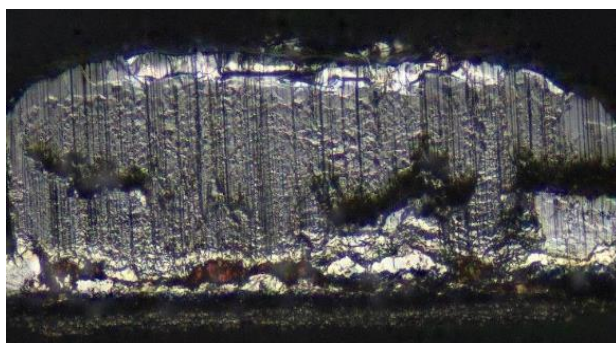
Obrázek 35:

Bod 1:	Bod 2:	Bod 3:	Bod 4:	Bod 5:	Bod 6:
<b>C</b> (55,65 %), <b>Al</b> (27,81 %), <b>O</b> (16,54 %)	<b>C</b> (48,23 %), <b>Al</b> (29,99 %), <b>O</b> (16,82 %), <b>Ni</b> (4,96 %)	<b>C</b> (43,74 %), <b>Al</b> (31,24 %), <b>O</b> (18,29 %), <b>Ag</b> (4,12 %), <b>In</b> (2,61 %)	<b>C</b> (49,08 %), <b>Al</b> (33,48 %), <b>O</b> (17,44 %)	<b>C</b> (49,72 %), <b>Al</b> (31,65 %), <b>O</b> (18,63 %)	<b>C</b> (51,46 %), <b>Al</b> (30,91 %), <b>O</b> (17,62 %)

Obrázek 36:

Bod 1:	Bod 2:	Bod 3:	Bod 4:	Bod 5:	Bod 6:
<b>O</b> (53,55 %), <b>Si</b> (24,27 %), <b>Sn</b> (13,97 %), <b>C</b> (8,21 %)	<b>Sn</b> (85,60 %), <b>O</b> (9,71 %), <b>C</b> (4,69 %)	<b>Cu</b> (70,55 %), <b>C</b> (13,47 %), <b>Sn</b> (11,54 %), <b>O</b> (3,04 %), <b>Fe</b> (1,39 %)	<b>Sn</b> (85,99 %), <b>O</b> (8,13 %), <b>C</b> (4,02 %)	<b>Sn</b> (85,95 %), <b>O</b> (9,25 %), <b>C</b> (4,81 %)	<b>Sn</b> (84,62 %), <b>O</b> (9,42 %), <b>C</b> (4,55 %), <b>Si</b> (1,41 %)

• SADA VZORKŮ 3



Obrázek 37 Vzorek 3, konf. a SEM (přední strana).

Obrázek 38 Vzorek 3, konf. a SEM (spodní strana).

Obrázek 37: (Bod 7 je prakticky stejný jako Bod 1)

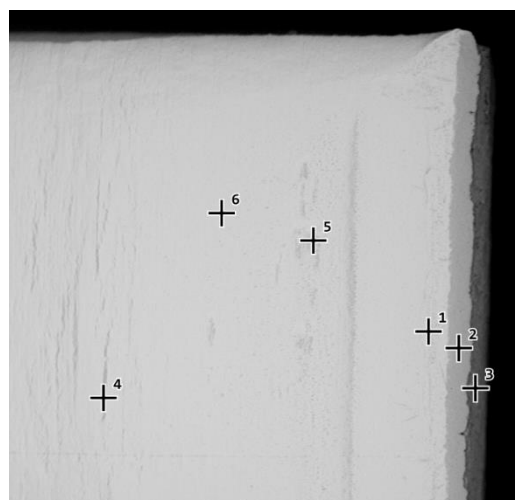
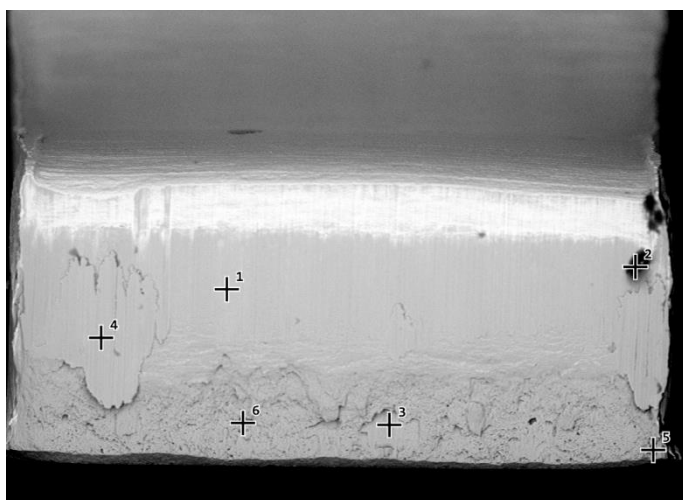
Bod 1:	Bod 2:	Bod 3:	Bod 4:	Bod 5:	Bod 6:
<b>Sn</b> (67,92 %), <b>Al</b> (17,88 %), <b>O</b> (6,28 %), <b>C</b> (4,36 %), <b>Cu</b> (3,56 %)	<b>Sn</b> (51,54 %), <b>Al</b> (12,92 %), <b>C</b> (4,25 %), <b>O</b> (4,22 %)	<b>C</b> (42,65 %), <b>Sn</b> (20,14 %), <b>O</b> (14,96 %), <b>Al</b> (12,25 %), <b>Cu</b> (10,01 %)	<b>Al</b> (45,98 %), <b>Cu</b> (26,62 %), <b>C</b> (11,29 %), <b>Sn</b> (10,96 %), <b>O</b> (4,33 %)	<b>Cu</b> (54,89 %), <b>Al</b> (24,63 %), <b>Sn</b> (9,98 %), <b>C</b> (8,05 %), <b>O</b> (2,45 %)	<b>Sn</b> (40,98 %), <b>Al</b> (37,73 %), <b>Cu</b> (7,62 %), <b>C</b> (5,28 %), <b>O</b> (4,64 %), <b>Sb</b> (2,88 %)

Obrázek 38: (Bod 6 je prakticky stejný jako Bod 3)

Bod 1:	Bod 2:	Bod 3:	Bod 4:	Bod 5:	Bod 7:
<b>O</b> (35,95 %), <b>Sn</b> (25,97 %), <b>Si</b> (24,32 %), <b>C</b> (13,76 %)	<b>Sn</b> (85,21 %), <b>O</b> (10,02 %), <b>C</b> (4,77 %)	<b>Sn</b> (85,96 %), <b>O</b> (9,02 %), <b>C</b> (4,33 %)	<b>Sn</b> (72,35 %), <b>O</b> (22,55 %), <b>C</b> (5,10 %)	<b>Sn</b> (86,68 %), <b>O</b> (7,60 %), <b>C</b> (4,18 %), <b>In</b> (1,54 %)	<b>Sn</b> (82,95 %), <b>O</b> (7,09 %), <b>C</b> (5,71 %), <b>Sb</b> (4,25 %)



• SADA VZORKŮ 4



Obrázek 39 Vzorek 4, konf. a SEM (přední strana).

Obrázek 40 Vzorek 4, konf. a SEM (spodní strana).

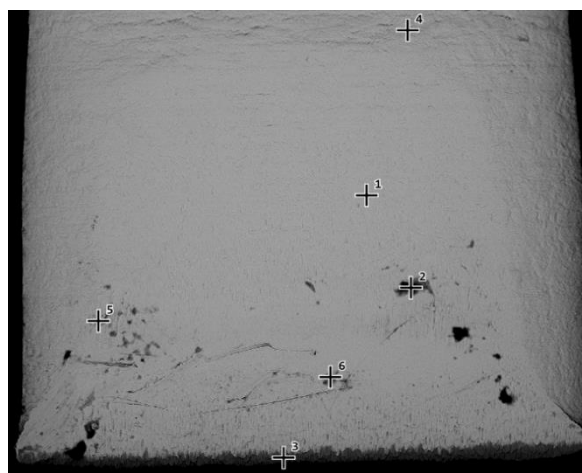
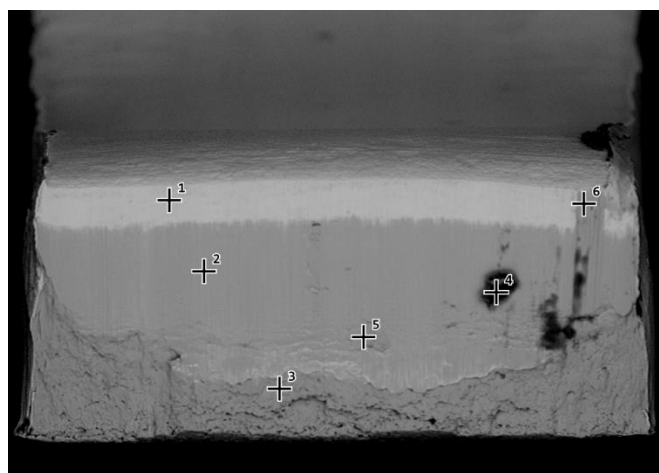
Obrázek 39:

Bod 1:	Bod 2:	Bod 3:	Bod 4:	Bod 5:	Bod 6:
<b>Cu</b> (83,68 %), <b>Ni</b> (11,29 %), <b>Ag</b> (3,19 %), <b>Fe</b> (1,84 %)	<b>C</b> (47,77 %), <b>Cu</b> (27,47 %), <b>O</b> (10,12 %), <b>Ag</b> (8,25 %), <b>Ni</b> (6,39 %)	<b>Cu</b> (100 %)	<b>Cu</b> (98,42 %), <b>Ni</b> (1,58 %)	<b>Cu</b> (85,54 %), <b>C</b> (11,45 %), <b>Fe</b> (3,01 %)	<b>Cu</b> (96,61 %), <b>Ni</b> (3,39 %)

Obrázek 40:

Bod 1:	Bod 2:	Bod 3:	Bod 4:	Bod 5:	Bod 6:
<b>Ag</b> (49,43 %), <b>Ni</b> (31,18 %), <b>C</b> (12,52 %), <b>Cu</b> (5,35 %)	<b>Cu</b> (71,21 %), <b>C</b> (14,38 %), <b>Ag</b> (9,83 %), <b>Ni</b> (2,32 %), <b>O</b> (2,27 %)	<b>C</b> (40,81 %), <b>Ag</b> (23,37 %), <b>O</b> (16,38 %), <b>Cu</b> (13,59 %), <b>Ni</b> (5,86 %)	<b>Ag</b> (51,74 %), <b>Ni</b> (22,36 %), <b>Cu</b> (12,08 %), <b>C</b> (10,82 %)	<b>Ag</b> (45,52 %), <b>Ni</b> (38,62 %), <b>C</b> (11,30 %), <b>O</b> (3,91 %)	<b>Ag</b> (67,57 %), <b>Ni</b> (17,13 %), <b>C</b> (9,21 %), <b>O</b> (3,21 %)

• SADA VZORKŮ 5



Obrázek 41 Vzorek 5, konf. a SEM (přední strana).

Obrázek 42 Vzorek 5, konf. a SEM (spodní strana)

Obrázek 41:

Bod 1:	Bod 2:	Bod 3:	Bod 4:	Bod 5:	Bod 6:
<b>Ag</b> (69,06 %), <b>Ni</b> (10,53 %), <b>Cu</b> (8,49 %), <b>C</b> (7,96 %), <b>Al</b> (3,95 %)	<b>Cu</b> (80,29 %), <b>Ni</b> (10,85 %), <b>Al</b> (4,34 %), <b>Ag</b> (3,22 %), <b>Fe</b> (1,29 %)	<b>Cu</b> (100 %)	<b>C</b> (53,85 %), <b>Cu</b> (22,96 %), <b>O</b> (17,03 %), <b>Al</b> (2,42 %), <b>Ag</b> (2,40 %), <b>Si</b> (1,34 %)	<b>Cu</b> (96,48 %), <b>Al</b> (3,52 %)	<b>Cu</b> (90,67 %), <b>Al</b> (5,89 %), <b>Ni</b> (3,44 %)

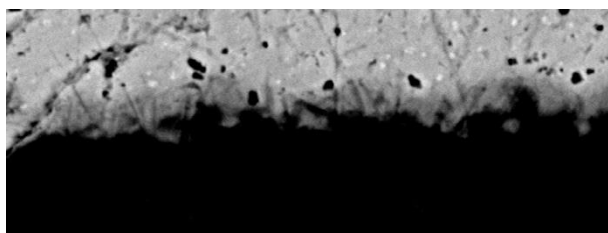
Obrázek 42:

Bod 1:	Bod 2:	Bod 3:	Bod 4:	Bod 5:	Bod 6:
<b>Ag</b> (66,58 %), <b>Ni</b> (25,58 %), <b>C</b> (7,85 %)	<b>Ag</b> (58,60 %), <b>Al</b> (29,72 %), <b>O</b> (4,43 %), <b>Cu</b> (3,84 %), <b>Ni</b> (3,41 %)	<b>Cu</b> (74,21 %), <b>Ag</b> (23,72 %), <b>Ni</b> (2,07 %)	<b>Ag</b> (81,02 %), <b>Ni</b> (10,50 %), <b>C</b> (8,48 %)	<b>Ni</b> (59,39 %), <b>Ag</b> (33,33 %), <b>C</b> (7,28 %)	<b>Ag</b> (63,51 %), <b>C</b> (19,41 %), <b>O</b> (6,51 %), <b>Ni</b> (4,76 %), <b>Cu</b> (3,02 %)

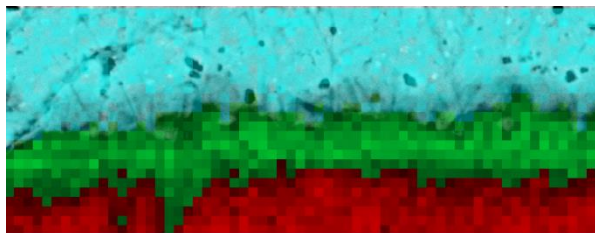
### 9.3 Výsledky metalografických výbrusů

Tato kapitola předkládá výsledky měření intermetalických vrstev. IML se vyznačují sytě šedou barvou na rozhraní vývodu (v obrázcích černě) a pájecí pasty SAC305 (v obrázcích světle šedě) Jak bylo zmíněno v kapitole 7.4. Metalografické výbrusy, pro měření byly zvoleny pouze součástky ze sady vzorků 4 a 5 (smáčené při různých tavidlech, bez tavidla a nesmáčené) a to z důvodu dostatečných mechanických rozměrů pro zhotovení výbrusů. Nesmáčené vzorky nakonec zkoumány nebyly, právě protože nedošlo ke smáčení a tedy ani k růstu intermetalické vrstvy mezi vývodem a nanesenou pájkou. Na elektronovém mikroskopu probíhalo měření v režimu point a map, ale protože režim map byl v této situaci vhodnější, budou dále uvedeny pouze výsledky zjištěné v režimu map. Barvy ploch v obrázcích odpovídají barvám prvků v legendě (bohužel software označuje Cu a Fe shodnou červenou barvou). Průměrná tloušťka intermetalické vrstvy byla vždy určena ze 3 různých snímků stejné IML, přičemž jeden snímek má šířku 1024 pixelů. Tedy v případě že IML sahala od kraje ke kraji snímku, byla celková průměrná hodnota tloušťky vypočtena z 3072 měření.

- **Vzorek 4, tavidlo LP-1**



Obrázek 43 IML, vzorek 4, tavidlo LP-1.



Obrázek 44 IML, vzorek 4, tavidlo LP-1, vyznačené prvky.

Průměrné tloušťky IML změřené na více snímcích:

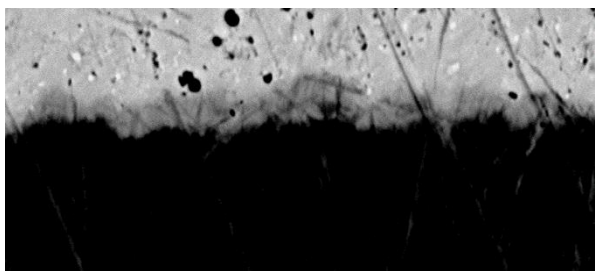
- a) 1,27  $\mu\text{m}$
- b) 1,42  $\mu\text{m}$
- c) 1,26  $\mu\text{m}$

Celková průměrná tloušťka IML: **1,32  $\mu\text{m}$**

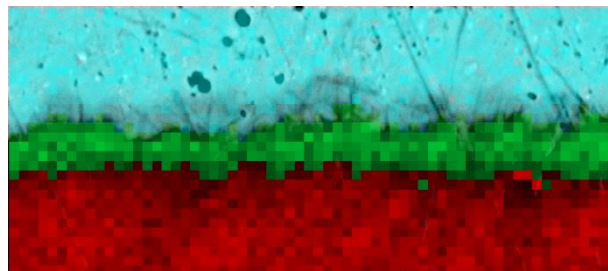
Legenda:

- Sn** (44,19 %),
- Cu** (25,07 %),
- Ni** (19,40 %),
- O** (6,01 %),
- C** (5,34 %)

- **Vzorek 5, tavidlo LP-1**



Obrázek 45 IML, vzorek 5, tavidlo LP-1.



Obrázek 46 IML, vzorek 5, tavidlo LP-1, vyznačené prvky.



---

Průměrné tloušťky IML změřené na více snímkách:

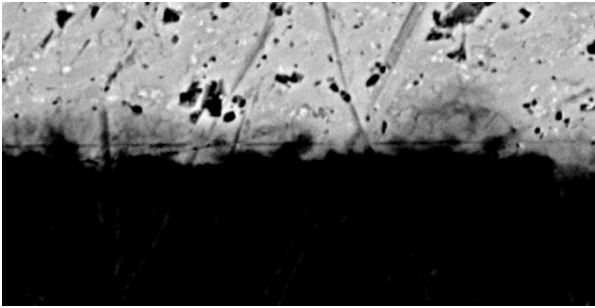
- a) 1,38  $\mu\text{m}$
- b) 1,28  $\mu\text{m}$
- c) 1,27  $\mu\text{m}$

Celková průměrná tloušťka IML: **1,31  $\mu\text{m}$**

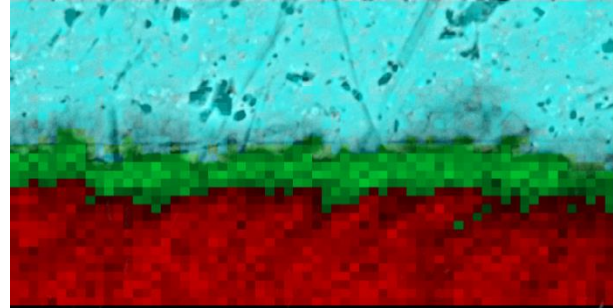
Legenda:

**Sn** (40,73 %),  
**Cu** (34,95 %),  
**Ni** (12,32 %),  
**O** (4,86 %),  
**C** (4,68 %),  
**Fe** (1,14 %)

- **Vzorek 4, tavidlo IPC**



*Obrázek 47 IML, vzorek 4, tavidlo IPC.*



*Obrázek 48 IML, vzorek 4, tavidlo IPC, vyznačené prvky.*

Průměrné tloušťky IML změřené na více snímkách:

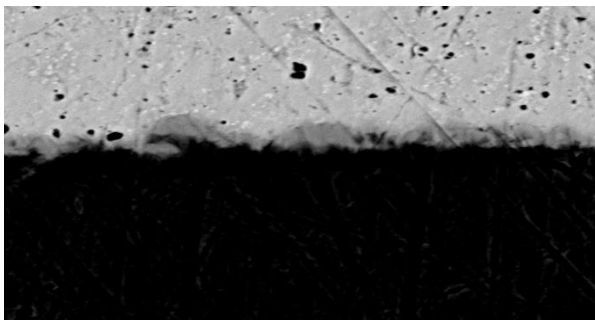
- a) 1,30  $\mu\text{m}$
- b) 1,41  $\mu\text{m}$
- c) 1,30  $\mu\text{m}$

Celková průměrná tloušťka IML: **1,33  $\mu\text{m}$**

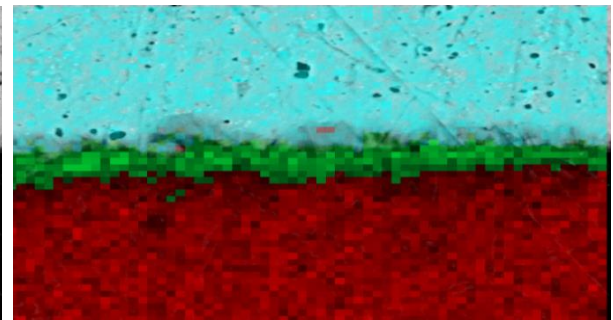
Legenda:

**Sn** (45,64 %),  
**Cu** (32,15 %),  
**Ni** (11,15 %),  
**O** (5,65 %),  
**C** (4,29 %),  
**Fe** (1,12 %)

- **Vzorek 5, tavidlo IPC**



*Obrázek 49 IML, vzorek 5, tavidlo IPC.*



*Obrázek 50 IML, vzorek 5, tavidlo IPC, vyznačené prvky.*

Průměrné tloušťky IML změřené na více snímkách:

- a) 1,34  $\mu\text{m}$
- b) 1,26  $\mu\text{m}$
- c) 1,22  $\mu\text{m}$

Celková průměrná tloušťka IML: **1,27  $\mu\text{m}$**

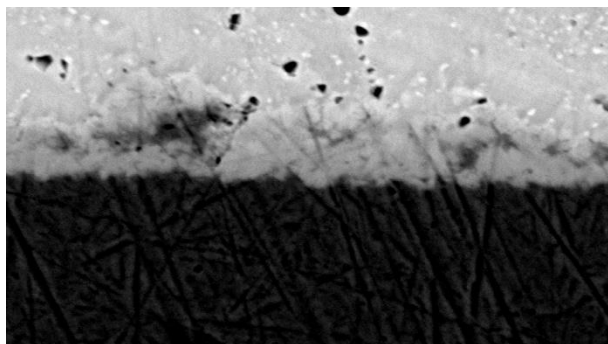
Legenda:

**Cu** (40,95 %),  
**Sn** (39,75 %),  
**Ni** (6,73 %),  
**C** (6,44 %),  
**O** (6,12 %)

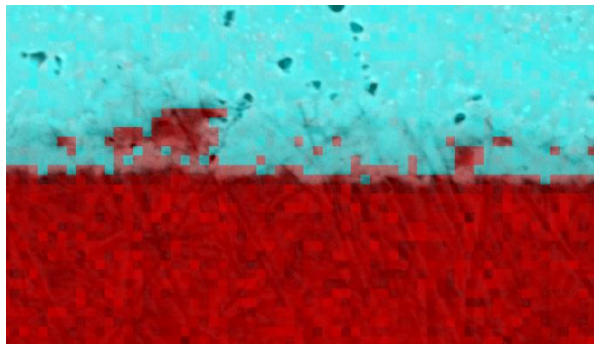
---

- **Vzorek 4, bez tavidla**

V případě vzorků bez tavidla ke smáčení prakticky nedocházelo. Pokud ke smáčení přece jen došlo, tak jen na velmi malé části povrchu vývodu. Právě tyto velmi malé smáčené části byly pro ukázkou vybrány pro měření. Tyto výsledky měření bez tavidla tedy nejsou nijak směrodatné a jsou zde uvedeny pouze jako ukázka bez jakékoli obecné platnosti.



*Obrázek 51 IML, vzorek 4, bez tavidla.*



*Obrázek 52 IML, vzorek 4, bez tavidla, vyznačené prvky.*

Průměrné tloušťky IML změřené na více snímcích:

- a) 1,33  $\mu\text{m}$
- b) 0,79  $\mu\text{m}$
- c) 1,08  $\mu\text{m}$

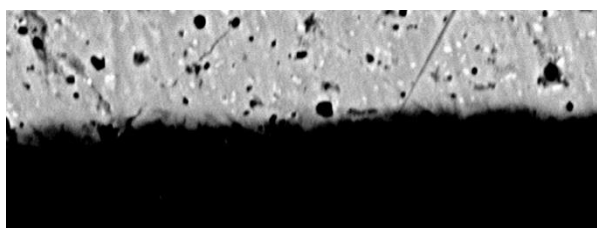
Celková průměrná tloušťka IML: **1,07  $\mu\text{m}$**

Legenda:

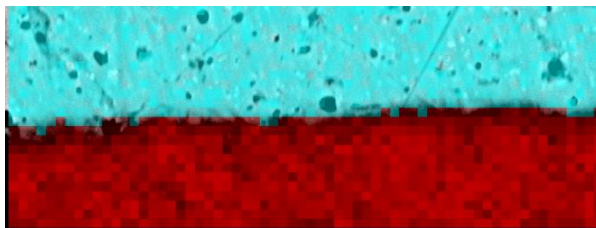
- Cu** (46,54 %),
- Sn** (46,38 %),
- O** (5,67 %),
- Fe** (1,41 %)

- **Vzorek 5, bez tavidla**

I v tomto případě se jedná o smáčení bez tavidla, a proto pro uvedené výsledky platí to samé jako v případě vzorku 4. Tyto výsledky měření bez tavidla tedy nejsou obecně platné.



*Obrázek 53 IML, vzorek 5, bez tavidla.*



*Obrázek 54 IML, vzorek 5, bez tavidla, vyznačené prvky.*

Průměrné tloušťky IML změřené na více snímcích:

- a) 0,44  $\mu\text{m}$
- b) 0,43  $\mu\text{m}$
- c) 0,47  $\mu\text{m}$

Celková průměrná tloušťka IML: **0,45  $\mu\text{m}$**

Legenda:

- Sn** (47,11 %),
- Cu** (39,48 %),
- C** (5,60 %),
- O** (5,33 %),
- Ag** (1,29 %)

---

## 10 Vyhodnocení výsledků

### 10.1 Vyhodnocení smáčivosti

Pro připomenutí zde bude uveden podrobnější popis jednotlivých sad vzorků. Součástky ze sady vzorků 2 a 3 a ze sady 4 a 5 jsou stejného typu a liší se pouze v datu expirace.

- Sada vzorků 1, typ součástek: PUMD13/1, expirace: 6. 8. 2024
- Sada vzorků 2, typ součástek: PESD12VL1BA, expirace: 28. 5. 2024
- Sada vzorků 3, typ součástek: PESD12VL1BA, expirace: 1. 1. 2018
- Sada vzorků 4, typ součástek: VN5E160STR-E, expirace: 31. 12. 2019
- Sada vzorků 5, typ součástek: VN5E160STR-E, expirace: 12. 12. 2022

- **Vliv tavidla**

V níže uvedené tabulce 13 jsou uvedené průměrné hodnoty skóre pážitelnosti (S-Score) a směrodatné odchylky. Z hodnot vyplývá, že vzorky bez tavidla prakticky nesmáčí. V rozmezí 0 – 10 se nepodařilo ani jedné sadě vzorků přesáhnout hranici 0,5 bodu a s ohledem na směrodatnou odchylku lze říci, že výsledky jsou vcelku stabilní. Naproti tomu při využití tavidla Topnik LP-1 jsou průměrná skóre vysoká a relativně stabilní. Výjimku tvoří pouze vzorek 3. Lze tedy zhodnotit, že tavidlo zcela zásadním způsobem zlepšuje smáčivost součástky v porovnání se smáčivostí bez tavidla (zejména patrně u vzorků 4 a 5). Tavidlo podle normy IPC výrazně zlepšuje smáčivost pouze u zmíněných vzorků 4 a 5. Vzorek 2 také smáčí lépe s tavidlem IPC, nicméně směrodatná odchylka je v tomto případě výrazně vyšší.

*Tabulka 13 Průměrné hodnoty skóre pážitelnosti (S-Score) a směrodatné odchylky.*

Sada vzorků	Datum expirace	Bez tavidla		Topnik LP-1		IPC tavidlo	
		Průměrné S-Score	$\sigma$	Průměrné S-Score	$\sigma$	Průměrné S-Score	$\sigma$
1	6. 8. 2024	0	0	9,33	1,11	0	0
2	28. 5. 2024	0,50	0,76	8,67	0,47	4,50	2,06
3	1. 1. 2018	0,17	0,37	5,33	1,49	0	0
4	31. 12. 2019	0	0	10	0	9,83	0,37
5	12. 12. 2022	0	0	10	0	9,83	0,37



---

- **Vliv expirace na součástky PESD12VL1BA**

Při pohledu do tabulky 13 na řádky se sadou vzorků 2 a 3 lze vypořádat, že vzorky 2 (tedy neexpirované) dosahují vyšších hodnot S-Score oproti vzorkům 3. Tento trend je navíc pozorovatelný u obou použitých tavidel i bez tavidla. Nejvýznamnější rozdíl mezi exspirovanými a neexspirovanými součástkami lze vypořádat u tavidla IPC. Exspirovaným součástkám již nebylo možné ovlivnit smáčivost tímto tavidlem. Naproti tomu u neexspirovaných se díky tomuto tavidlu smáčivost zlepšila, i když výsledky nebyly příliš konzistentní jak naznačuje směrodatná odchylka.

Lze tedy prohlásit, že u součástek PESD12VL1BA se 6 letá expirace skutečně projevuje zhoršením smáčivosti oproti neexspirovaným součástkám a obnovení smáčivosti exspirovaných součástek je velmi závislé na zvoleném tavidle. Smáčivost exspirovaných součástek PESD12VL1BA tedy do určité míry lze zlepšit volbou vhodného tavidla, výsledky ale nemusí být příliš konzistentní a míra zlepšení bude silně závislá na konkrétním vývodu.

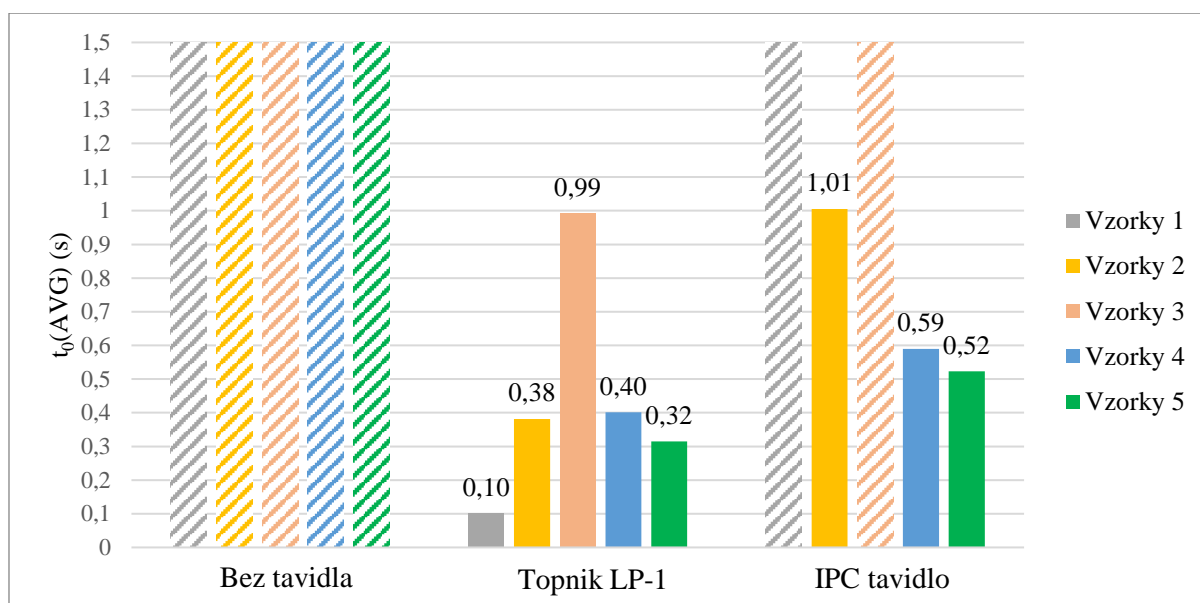
- **Vliv expirace na součástky VN5E160STR-E**

Z tabulky 13 dále vyplývá, že mezi sadou vzorků 4 a 5 není žádný rozdíl při všech využitých tavidlech. Drobné rozdíly jsou patrné pouze z hodnot  $t_0$ ,  $t_{2/3}$ ,  $F_{\max}$ , z nichž jsou uvedené skóre vypočtena (hodnoty jsou uvedeny v kapitole 9.1 Výsledky pájitelnosti vzorků). Průměrné skóre pájitelnosti tak s každým tavidlem dosahuje maximální hodnoty 10 bodů, nebo tuto hranici silně atakuje. Protože při užití obou tavidel jsou hodnoty S-Score velmi vysoké, lze usuzovat, že ani po expiraci delší než 4 roky není žádný problém s pájitelností součástek VN5E160STR-E. Možným důvodem tohoto výsledku může být typ povrchové úpravy. U tohoto typu součástek je využito stříbro, které si i po dlouhé době zachovává skvělé vlastnosti z hlediska smáčivosti.

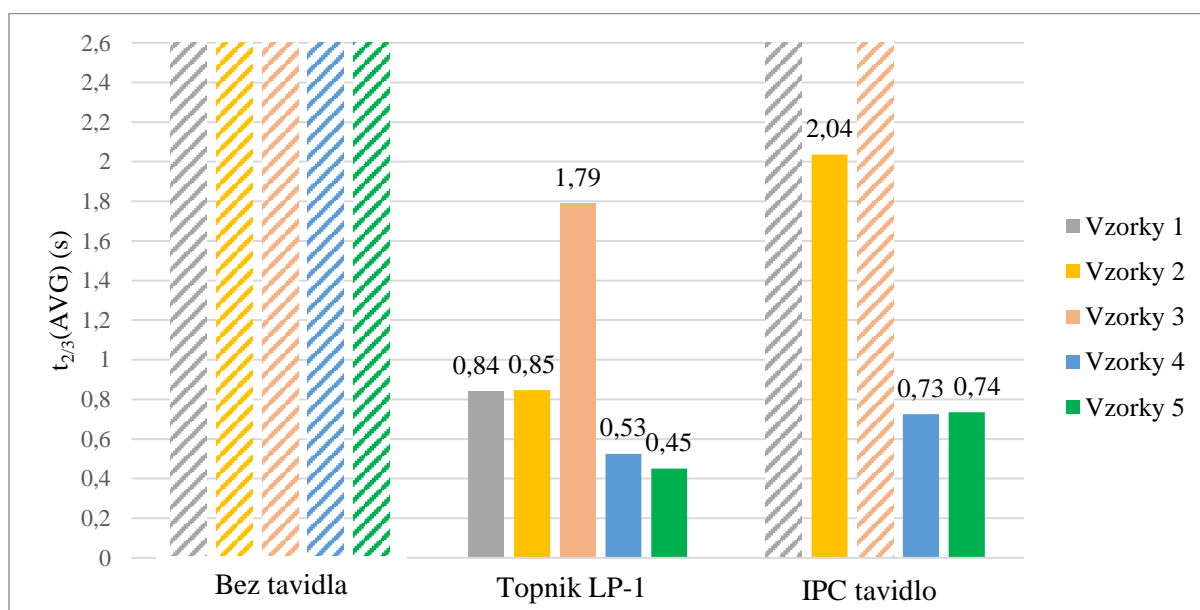
- **Porovnání naměřených hodnot**

Pro podrobnější průzkum výsledků jsou níže uvedeny grafy 16 - 18, které srovnávají průměrné naměřené časy  $t_0$  a  $t_{2/3}$  a síly  $F_{\max}$  z nichž byly vypočteny hodnoty S-Score, jejichž průměry jsou k vidění ve zmíněné tabulce 13. Uvedené grafické výstupy měření smáčivosti rovněž poukazují na význam tavidla při smáčení. Nejlépe si stojí vzorky, které dosahují nejnižších časů v grafech 16 a 17, a zároveň nejvyšších dosažených sil v grafu 18.

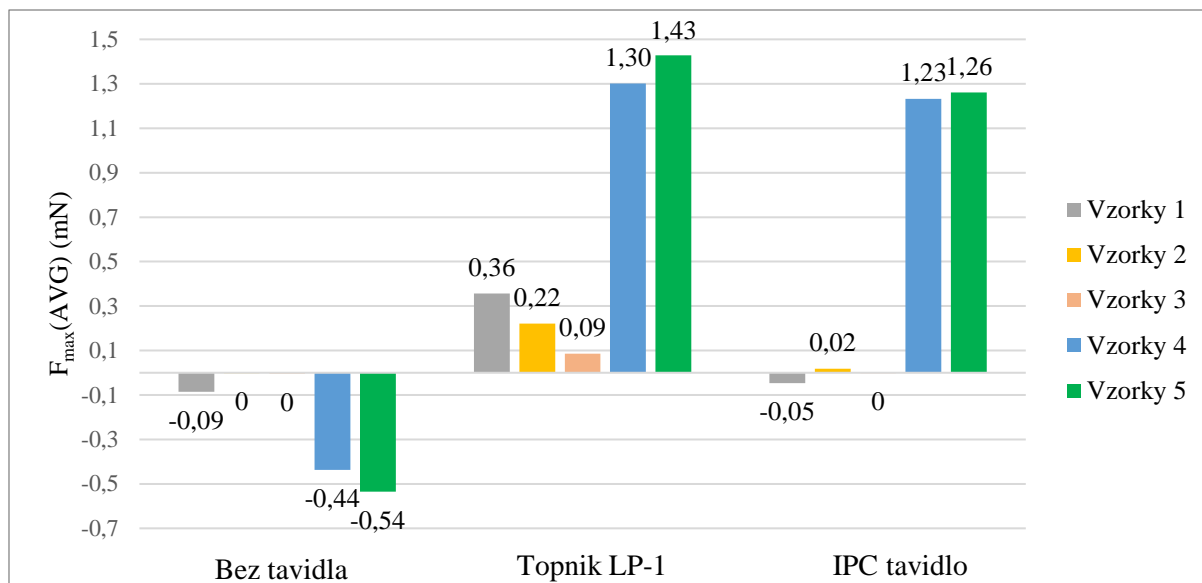
Grafy potvrzují zjištěné informace, tedy že nejlépe smáčí součástky s tavidlem LP-1 (nejkratší časy a největší síly) a naproti tomu součástky měřené bez tavidla prakticky nesmáčí (šrafované sloupce se týkají časů, které meniskograf označil jako  $\infty$ ). Zároveň se opět projevuje, že neexspirované či kratší dobu exspirované součástky (vzorky 2 a 5) mají ve většině případů kratší časy a dosahují vyšších sil v porovnání s déle exspirovanými (vzorky 3 a 4). Neexspirované tedy lépe smáčí. V případě tavidla Topnik LP-1 pak lze konstatovat, že nejlépe smáčí vzorky 4 a 5 (součástky VN5E160STR-E), dále pak vzorky 1 (součástky PUMD13/1) a nejhorší smáčivost vykazují vzorky 2 a 3 (součástky PESD12VL1BA).



Graf 16 Hodnocení vlivu tavidel podle průměrného času  $t_0$ .

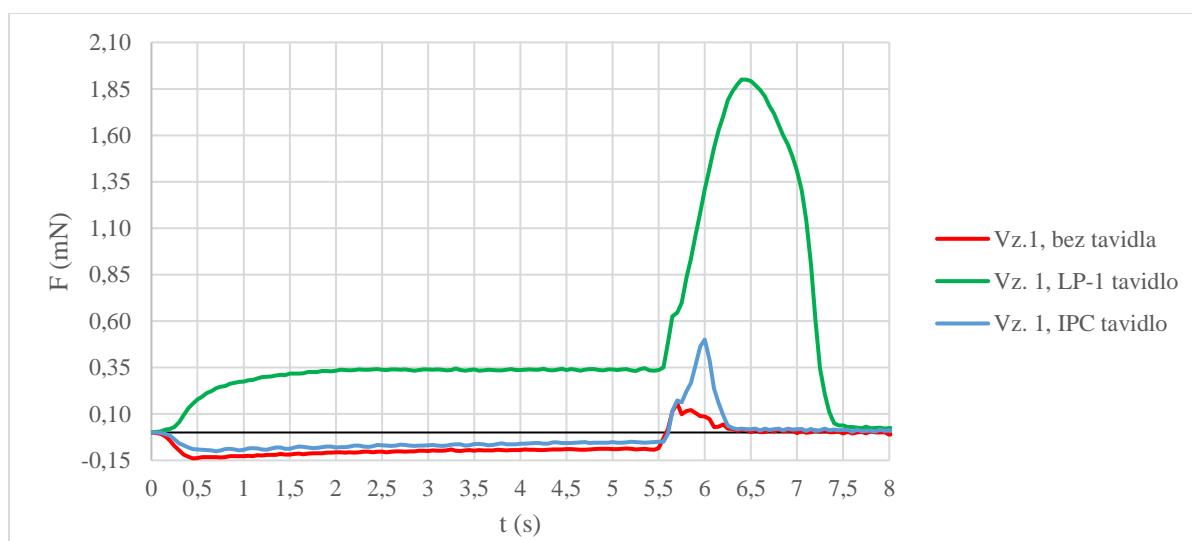


Graf 17 Hodnocení vlivu tavidel podle průměrného času  $t_{2/3}$ .

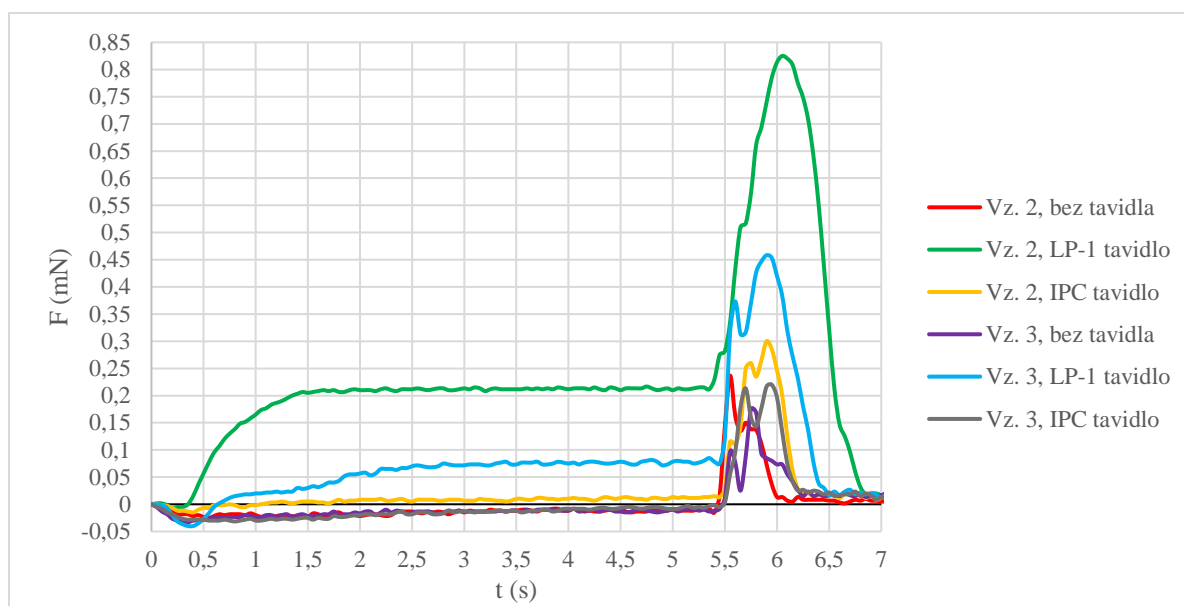


Graf 18 Hodnocení vlivu tavidel podle průměrné síly  $F_{max}$ .

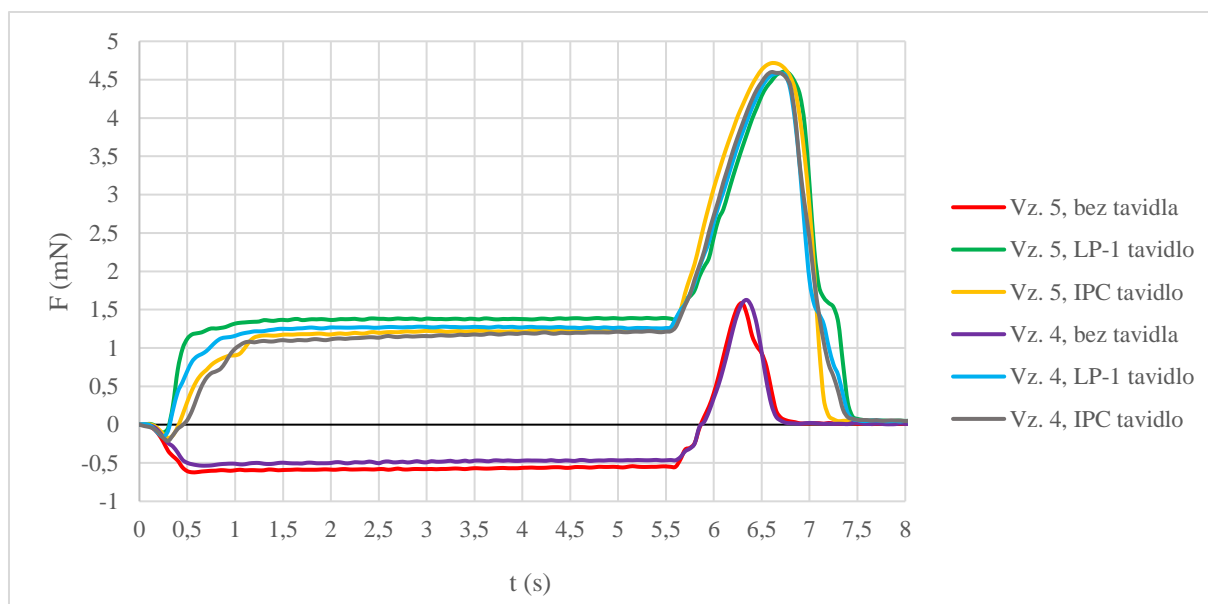
Pro úplnost jsou dále přiloženy aritmetické průměry hodnot křivek uvedených v kapitole 9.1 Výsledky pážitelnosti vzorků. V grafu je tedy zobrazena výsledná křivka reprezentující všechna měření konkrétní sady vzorků při konkrétním tavidle. Vzorky 1 k sobě bohužel nemají exspirovanou variantu, proto jsou uvedeny v samostatném grafu. Grafy 19 – 21 podtrhují zmíněné závěry, tedy že exspirace hraje svou roli zejména u vzorků 2 a 3, v obou případech s cínovou povrchovou úpravou. Rozdíl ve smáčivosti se projevil při použití tavidla LP-1, kdy vývody smáčely dostatečně na to, aby bylo možné říci, že neexspirované součástky lépe smáčí. Naopak v grafu 21 jsou průběhy s tavidly velmi podobné (a všechny poukazují na výbornou smáčivost) a při zahrnutí možných vlivů a okolností při měření nelze jednoznačně určit vliv exspirace.



Graf 19 Smáčivost sady vzorků 1 při různých tavidlech.



**Graf 20** Porovnání smáčivosti sady vzorků 2 a 3 při různých tavidlech.



**Graf 21** Porovnání smáčivosti sady vzorků 4 a 5 při různých tavidlech.

## 10.2 Vyhodnocení mikroskopie

Pro odhalení materiálové degradace byla provedena prvková analýza. Ke snímkům z elektronového mikroskopu byly přiloženy také snímky z konfokálního mikroskopu, které zobrazily vývody ve skutečné vizuální podobě (nejen v odstínech šedi) a bylo tak umožněno přibližné srovnání s prvkovou analýzou. Právě prvková analýza poukázala na materiály povrchových úprav (Sn, Ag, Ni) a základní materiály vývodů (Cu), které byly v některých místech doplněny dalšími prvky organické chemie (zejména C a O), poukazujícími např. na oxidaci materiálů. Ze všeobecného hlediska materiálová analýza neodhalila zásadní rozdíly

---

mezi exspirovanými a neexspirovanými součástkami. Došlo pouze k potvrzení materiálové skladby vývodů a v některých případech byla odhalena částečná oxidace, pro jejíž odstranění se v praxi využívá právě vhodně zvoleného tavidla.

### **10.3 Vyhodnocení metalografických výbrusů**

Kvůli rozměrům součástek byly metalografické výbrusy zhotoveny výhradně ze sady vzorků 4 a 5. Mezi vývody a pájecí pastou vznikala intermetalická vrstva, jejíž tloušťka se u všech broušených součástek s aplikovaným tavidlem pohybovala okolo 1,3  $\mu\text{m}$ . Z prvkové analýzy součástek smáčených s tavidly vyplynulo, že mezi nanesenou pájkou (Sn) a základním vývodem (Cu) se nachází vrstva Ni a v menším zastoupení se rovněž objevují prvky C a O. V některých případech bylo nalezeno také Fe a Ag, což je zároveň materiálem povrchové úpravy. Intermetalické vrstvy jsou tedy ve snímcích viditelné a dosahují zmíněných tloušťek. Pro bližší zkoumání sloučenin však bohužel nebyla dostupná aparatura, protože elektronový mikroskop s energiově disperzním spektrometrem nemá možnost odhalení sloučenin.

---

## ZÁVĚR

Hlavním cílem práce bylo prozkoumat pájitelnost vývodů, resp. vliv expirace na pájitelnost vývodů SMD součástek typu VN5E160STR-E, PESD12VL1BA a PUMD13/1. Zejména první zmíněný typ je významný, protože se jedná o relativně nákladné součástky, tedy výsledky a následná doporučení mohou přinést významnou úsporu. Mimo tohoto hlavního cíle se práce soustředila i na hodnocení tavidel a jejich dopad na pájitelnost exspirovaných a neexspirovaných vývodů.

Teoretická část práce se soustředila primárně na rešerši o materiálech používaných v procesu pájení. Je zde tedy zmínka o pájecích slitinách, tavidlech, materiálech vývodů a jejich povrchových úpravách. Z důvodu zkoumání vlivu expirace byly také zařazeny kapitoly o vadách a degradaci elektromateriálů, na což bylo navázáno kapitolou o možných způsobech skladování. Pro úplnost byly na závěr přidány kapitoly rozebírající možnosti validace elektromateriálů s důrazem na metodu smáčecích vah využitou v praktické části práce.

V úvodu do praktické části byl popsán postup experimentu a použité materiály. Měření sestávala ze zkoumání vývodů součástek pod konfokálním a elektronovým mikroskopem umožňujícím prvkovou analýzu. Dále byla měřena smáčivost vývodů metodou smáčecích vah, přičemž byly vývody opatřeny tavidlem Topnik LP-1, tavidlem podle normy IPC a také proběhlo smáčení bez tavidla. V této části bylo provedeno množství dalších testovacích měření, které však v práci nejsou uvedeny. V poslední části byly zhotoveny metalografické výbrusy součástek VN5E160STR-E, které jako jediné měly dostatečné mechanické rozměry pro výrobu výbrusů. Jejich následné zkoumání bylo zaměřeno na odhalení intermetalických vrstev a jejich tloušťek. Všechny výsledky byly následně vyhodnoceny.

Z výsledků smáčivosti plyne, že je zcela zásadní před smáčením aplikovat na vývody tavidlo. Dle měření se jako vhodnější jeví tavidlo Topnik LP-1, které dosahovalo lepších a stabilnějších výsledků, než tavidlo podle normy IPC. Z pohledu součástek lze konstatovat, že součástky VN5E160STR-E exspirované cca 1,5 roku a 4,5 roku dosahují při stejných tavidlech velmi podobných (takřka stejných) výsledků smáčivosti. Skóre pájitelnosti se pohybuje na stupnici od 0 – 10, kde 10 je nejlepší výsledek, právě v okolí maximální hodnoty 10 v závislosti na použitém tavidle. Vývody tedy výborně smáčí a ani expirace není výraznou překážkou. U neexspirovaných a cca 6,5 roku exspirovaných součástek typu PESD12VL1BA byly výsledky již rozdílnější. Bylo zjištěno, že tavidlo podle normy IPC nijak zásadně nezlepšuje

---

smáčivost exspirovaných součástek. Při tavidle Topnik LP-1 jsou pak patrné významné rozdíly mezi exspirovanou a neexspirovanou variantou. V případě exspirované varianty zprůměrované skóre pážitelnosti přesahuje hodnotu 5 a v případě neexspirované atakuje hodnotu 9. U exspirovaných součástek zlepšení velmi závisí na vybraném kusu součástky. Součástky PUMD13/1 k sobě bohužel neměly exspirovanou variantu, a proto zde lze pouze konstatovat, že i v tomto případě není vhodné používat tavidlo podle normy IPC. Naproti tomu s aplikovaným tavidlem LP-1 vykazují součástky skvělé výsledky smáčivosti, přesahující hodnotu 9.

Výsledky mikroskopie a prvkových analýz neodhalily zásadní rozdíly mezi exspirovanými a neexspirovanými vývody. Podmínky předchozího skladování součástek nebyly známy, ale obecně vzato nebyla mezi různě exspirovanými součástkami pozorována ani zvýšená míra oxidace vývodů či jinak. Dále byly měřeny tloušťky intermetalických vrstev mezi pájkou SAC305 a vývodem součástky VN5E160STR-E, a to u 1,5 roku exspirované i 4,5 roku exspirované sady. Tloušťky vrstev prakticky nebyly rozdílné, a to ani při různých tavidlech (LP-1, IPC). Tímto byly potvrzeny výsledky vyplývající z metody smáčecích vah. Práce tedy odhalila vliv expirace u zvolených typů součástek a poukázala na význam vhodného tavidla v technologii pájení.

## SEZNAM ZKRATEK

- **DPS** ... deska plošných spojů
- **SAC** ... pájecí slitina SnAgCu
- **RoHS** ... směrnice o omezování nebezpečných látek v elektronice
- **HAL/HASL** (*Hot Air Levelling/Solder Levelling*) ... povrchová úprava s obsahem cínu
- **ENIG** (*Electroless Nickel Immersion Gold*) ... povrchová úprava s obsahem zlata
- **OSP** (*Organic Solder Preservatives*) ... organická povrchová úprava
- **IMC/IML** (*Intermetallic Compound/Layer*) ... intermetalická sloučenina/vrstva
- **SMT/SMD** (*Surface Mount Technology/Device*) ... technologie/součástka pro povrchovou montáž
- **BGA** (*Ball Grid Array*) ... typ pouzdra SMD součástky
- **QFP** (*Quad Flat Package*) ... typ pouzdra SMD součástky
- **MBB** (*Moisture-Barrier Bag*) ... sáček chránící proti vlhkosti
- **EU** ... Evropská unie
- **SOIC** (*Small Outline Integrated Circuit*) ... typ pouzdra SMD součástek
- **SOJ** (*Small Outline „J“ leads*) ... typ pouzdra SMD součástek
- **PLCC** (*Plastic Leaded Chip Carriers*) ... typ pouzdra SMD součástek
- **DIP** (*Dual In-Line Package*) ... typ pouzdra SMD součástek
- **SOD** (*Small Outline Diode*) ... typ pouzdra SMD součástek
- **MELF** (*Metal Electrode Leadless Face*) ... typ pouzdra SMD součástek
- **QFN** (*Quad Flat No-lead Package*) ... typ pouzdra SMD součástek
- **CSP** (*Chip Scale Package*) ... typ pouzdra SMD součástek
- **ENImAg** (*Electroless Nickel Immersion Silver*) ... povrchová úprava s obsahem stříbra
- **CCD** (*Charge-Coupled Device*) ... zařízení pro snímání obrazu
- **NA** ... numerická apertura
- **LSCM** (*Laser Scanning Confocal Microscope*) ... laserový skenovací konfokální mikroskop
- **SEM/TEM** ... skenovací/transmisní elektronový mikroskop
- **RTG** ... rentgenové záření
- **WDS** (*Wavelength-Dispersive X-Ray Spectroscopy*) ... vlnová disperzní spektroskopie
- **EDS** (*Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy*) ... energiově disperzní spektroskopie
- **XPS** (*X-Ray Photoelectron Spectroscopy*) ... fotoelektronová rentgenová spektroskopie



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obrázek 1</b> Rozložení sil molekul kapaliny. ....	11
<b>Obrázek 2</b> Vyznačení kontaktního úhlu. ....	12
<b>Obrázek 3</b> Vývod typu „L“. ....	14
<b>Obrázek 4</b> Vývod typu „J“. ....	14
<b>Obrázek 5</b> Vývod typu „I“. ....	14
<b>Obrázek 6</b> Vývod páskem zahnutým pod součástku. ....	15
<b>Obrázek 7</b> Bezvývodové součástky. ....	15
<b>Obrázek 8</b> Válcová čepička. ....	15
<b>Obrázek 9</b> Válcový terčík. ....	15
<b>Obrázek 10</b> Kulové vývody. ....	16
<b>Obrázek 11</b> Ploché vývody. ....	16
<b>Obrázek 12</b> Vývody typu „bump“. ....	16
<b>Obrázek 13</b> Povrchová úprava HAL/HASL, příčný řez vývodem. ....	18
<b>Obrázek 14</b> Povrchová úprava ENIG, příčný řez vývodem. ....	19
<b>Obrázek 15</b> Povrchová úprava chemickým cínem, příčný řez vývodem. ....	20
<b>Obrázek 16</b> Povrchová úprava imerzním stříbrem, příčný řez vývodem. ....	20
<b>Obrázek 17</b> Ilustrativní obrázek koroze na DPS [28]. ....	22
<b>Obrázek 18</b> Řez intermetalickým spojem. ....	24
<b>Obrázek 19</b> Whisker mezi dvěma vývody [34]. ....	25
<b>Obrázek 20</b> Černá pájecí ploška pod skenovacím elektronovým mikroskopem [35]. ....	27
<b>Obrázek 21</b> Projevy černé pájecí plošky v podobě horizontální vrstvy (vlevo) a vlasečnic (vpravo) [20]. ....	27
<b>Obrázek 22</b> Proces smáčení. ....	32
<b>Obrázek 23</b> Smáčecí křivka. ....	32
<b>Obrázek 24</b> Vyznačení otvorového úhlu objektivu (jeho poloviny). ....	36
<b>Obrázek 25</b> Konstrukce elektronového mikroskopu. ....	38
<b>Obrázek 26</b> Konfokální mikroskop Keyence. [57] ....	42
<b>Obrázek 27</b> Ukázka snímku z konfokálního mikroskopu (vlevo: spodní pohled na vývod, zvětšení 20×, osvětlení coax, vpravo: přední pohled na vývod, zvětšení 20×, osvětlení coax). ....	42
<b>Obrázek 28</b> Skenovací elektronový mikroskop Phenom. [57] ....	43
<b>Obrázek 29</b> Ukázka měření vývodu na SEM a prvková analýza vybraného bodu. (Sada vzorků 4, 15 kV - Point).....	43
<b>Obrázek 30</b> Meniskograf Microtronic LBT 210, stejný typ byl využit při experimentu. [58].....	44
<b>Obrázek 31</b> Ukázka průběhu smáčení jedné strany vývodů vzorku 4. ....	44
<b>Obrázek 32</b> Vybroušené a vyleštěné metalografické výbrusy. ....	45
<b>Obrázek 33</b> Vzorek 1, konf. a SEM (přední strana). ....	56
<b>Obrázek 34</b> Vzorek 1, konf. a SEM (spodní strana). ....	56
<b>Obrázek 35</b> Vzorek 2, konf. a SEM (přední strana). ....	57
<b>Obrázek 36</b> Vzorek 2, konf. a SEM (spodní strana). ....	57
<b>Obrázek 37</b> Vzorek 3, konf. a SEM (přední strana). ....	58
<b>Obrázek 38</b> Vzorek 3, konf. a SEM (spodní strana). ....	58
<b>Obrázek 39</b> Vzorek 4, konf. a SEM (přední strana). ....	59
<b>Obrázek 40</b> Vzorek 4, konf. a SEM (spodní strana). ....	59

<b>Obrázek 41</b> Vzorek 5, konf. a SEM (přední strana) .....	60
<b>Obrázek 42</b> Vzorek 5, konf. a SEM (spodní strana) .....	60
<b>Obrázek 43</b> IML, vzorek 4, tavidlo LP-1 .....	61
<b>Obrázek 44</b> IML, vzorek 4, tavidlo LP-1, vyznačené prvky. ....	61
<b>Obrázek 45</b> IML, vzorek 5, tavidlo LP-1 .....	61
<b>Obrázek 46</b> IML, vzorek 5, tavidlo LP-1, vyznačené prvky. ....	61
<b>Obrázek 47</b> IML, vzorek 4, tavidlo IPC. ....	62
<b>Obrázek 48</b> IML, vzorek 4, tavidlo IPC, vyznačené prvky. ....	62
<b>Obrázek 49</b> IML, vzorek 5, tavidlo IPC. ....	62
<b>Obrázek 50</b> IML, vzorek 5, tavidlo IPC, vyznačené prvky. ....	62
<b>Obrázek 51</b> IML, vzorek 4, bez tavidla. ....	63
<b>Obrázek 52</b> IML, vzorek 4, bez tavidla, vyznačené prvky. ....	63
<b>Obrázek 53</b> IML, vzorek 5, bez tavidla. ....	63
<b>Obrázek 54</b> IML, vzorek 5, bez tavidla, vyznačené prvky. ....	63

## SEZNAM TABULEK

<b>Tabulka 1</b> Klasifikace tavidel pro měkké pájení podle hlavních složek [11]. ....	13
<b>Tabulka 2</b> Přehled pouzder a vývodů .....	14
<b>Tabulka 3</b> Kategorie povrchových úprav součástek [16]. ....	17
<b>Tabulka 4</b> Základní vlastnosti whiskerů [32] .....	25
<b>Tabulka 5</b> Úroveň vlhkosti a životnost na dílně [22]. ....	28
<b>Tabulka 6</b> Tabulka pro hodnocení pájitelnosti [38]. ....	33
<b>Tabulka 7</b> Popis použitých součástek. ....	41
<b>Tabulka 8</b> Výsledky smáčení sady vzorků 1 .....	48
<b>Tabulka 9</b> Výsledky smáčení sady vzorků 2 .....	50
<b>Tabulka 10</b> Výsledky smáčení sady vzorků 3 .....	51
<b>Tabulka 11</b> Výsledky smáčení sady vzorků 4 .....	53
<b>Tabulka 12</b> Výsledky smáčení sady vzorků 5 .....	55
<b>Tabulka 13</b> Průměrné hodnoty skóre pájitelnosti (S-Score) a směrodatné odchylky. ....	64

## SEZNAM GRAFŮ

<b>Graf 1</b> Sada vzorků 1, smáčeno bez tavidla. ....	47
<b>Graf 2</b> Sada vzorků 1, smáčeno s tavidlem LP-1. ....	47
<b>Graf 3</b> Sada vzorků 1, smáčeno s tavidlem podle normy IPC .....	48
<b>Graf 4</b> Sada vzorků 2, smáčeno bez tavidla. ....	49
<b>Graf 5</b> Sada vzorků 2, smáčeno s tavidlem LP-1. ....	49
<b>Graf 6</b> Sada vzorků 2, smáčeno s tavidlem podle normy IPC .....	49
<b>Graf 7</b> Sada vzorků 3, smáčeno bez tavidla. ....	50
<b>Graf 8</b> Sada vzorků 3, s tavidlem LP-1. ....	51
<b>Graf 9</b> Sada vzorků 3, smáčeno s tavidlem podle normy IPC .....	51
<b>Graf 10</b> Sada vzorků 4, smáčeno bez tavidla. ....	52
<b>Graf 11</b> Sada vzorků 4, smáčeno s tavidlem LP-1. ....	52

<b>Graf 12</b> Sada vzorků 4, smáčeno s tavidlem podle normy IPC.....	53
<b>Graf 13</b> Sada vzorků 5, smáčeno bez tavidla. ....	54
<b>Graf 14</b> Sada vzorků 5, smáčeno s tavidlem LP-1. ....	54
<b>Graf 15</b> Sada vzorků 5, smáčeno s tavidlem podle normy IPC.....	54
<b>Graf 16</b> Hodnocení vlivu tavidel podle průměrného času $t_0$ . ....	66
<b>Graf 17</b> Hodnocení vlivu tavidel podle průměrného času $t_{2/3}$ . ....	66
<b>Graf 18</b> Hodnocení vlivu tavidel podle průměrné síly $F_{max}$ . ....	67
<b>Graf 19</b> Smáčivost sady vzorků 1 při různých tavidlech.....	67
<b>Graf 20</b> Porovnání smáčivosti sady vzorků 2 a 3 při různých tavidlech. ....	68
<b>Graf 21</b> Porovnání smáčivosti sady vzorků 4 a 5 při různých tavidlech. ....	68

## POUŽITÉ ZDROJE

- [1] Odbor 31200. Ministerstvo průmyslu a obchodu. *Základní informace k problematice RoHS* [online]. 2019 [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/rohs-elektrozarizeni/zakladni-informace-k-problematice-rohs--158558/>
- [2] SMC Corporation. *ROHS směrnice: SMC prvky splňují požadavky směrnice RoHS* [online]. [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.smc.eu/cs-cz/produkty-a-podpora/smernice-eu/rohs-smernice>
- [3] CONRO ELECTRONICS. *What are the disadvantages of lead-free solder vs. lead solder?* Online. 2021. Dostupné z: <https://www.conro.com/what-are-the-disadvantages-of-lead-free-solder-vs-lead-solder/>. [cit. 2024-05-18].
- [4] SIEWERT, Thomas; LIU, Stephen; SMITH, David R. a MADENI, Juan Carlos. *Properties of Lead-Free Solders*. Online. 2002. Dostupné z: [https://www.msed.nist.gov/solder/NIST\\_LeadfreeSolder\\_v4.pdf](https://www.msed.nist.gov/solder/NIST_LeadfreeSolder_v4.pdf). [cit. 2024-05-18].
- [5] SMT CENTRUM. *Pájitelnost* [online]. 2017 [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/pajitelnost/>
- [6] ABEL, Martin a Vladimír CIMBUREK. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. Pardubice: ABE.TEC, 2005. ISBN 80-903597-0-1.
- [7] DUŠEK, Karel. *České vysoké učení technické v Praze. Smáčivost, povrchové napětí a jeho měření*, prezentováno v kurzu B1M13MAD Kontrolní metody a testování v elektrotechnologii, Praha, 2023 [cit. 2024-02-05]
- [8] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky: Povrchová vrstva kapaliny* [online]. In: . [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/639-povrchova-vrstva-kapaliny>
- [9] STARÝ, Jiří. *Bezolovnaté pájení - materiálová a procesní kompatibilita v inertní a inertně/redukční atmosféře*. Praha, 2005 [cit. 2024-02-05]. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Jiří Kazelle.
- [10] KEENE, B. J. *The Surface Tension of Tin and its Alloys with Particular Reference to Solders* [online]. Middlesex, TW11 OL W, UK [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://eprintspublications.npl.co.uk/363/1/DMM113.pdf>. Division of Materials Metrology, National Physical Laboratory.

- [11] ČSN EN ISO 9454-1, *Tavidla pro měkké pájení - Klasifikace a požadavky - Část 1: Klasifikace, označování a balení*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [12] MIL-F-14256F, *Flux, soldering, liquid, paste flux, solder paste and solder-paste flux*. 1989.
- [13] SMT CENTRUM. *Pryskyřičná tavidla na bázi kalafuny*. Online. 2017. Dostupné z: <https://www.smtcentrum.cz/vyber-tavidel/pryskyricna-tavidla-na-bazi-kalafuny/>. [cit. 2024-05-18].
- [14] ŠANDERA, Josef. SMD součástky a jejich provedení a vlastnosti přívodů, balení. Online. *DPS Elektronika od A do Z*. 2021, č. 2. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/clanky/id:78645/smd-soucastky-jejich-provedeni-a-vlastnosti-privodu-baleni>. [cit. 2024-05-18].
- [15] MACH, Pavel. České vysoké učení technické v Praze. *Pouzdra v elektrotechnice*, prezentováno v kurzu B1B13TEP Technologické procesy pro elektrotechniku, Praha, 2021, [cit. 2024-02-05].
- [16] HANUSOVÁ, Dana. Povrchové úpravy na deskách plošných spojů a součástek. Špatná smáčivost povrchu a její příčiny. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2022, (2) [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/clanky/id:84865/povrchove-upravy-na-deskach-plosnych-spoju-a-soucastek-spatna-smacivost-povrchu-a-jeji-priciny>
- [17] PCB MASTER. *Jak vybrat z nejširšího portfolia povrchových úprav?* [online]. 2020 [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.pcbmaster.cz/jak-vybrat-z-nejsirsiho-porftolia-povrchovych-uprav>
- [18] SMT CENTRUM. *Základní materiály pro výrobu desek plošných spojů: Výroba desek plošných spojů* [online]. In: . [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.smtcentrum.cz/vyroba-desek-plosnych-spoju/zakladni-materialy-pro-vyrobu-desek-plosnych-spoju/>
- [19] AMBAT, Rajan a PIOTROWSKA, Kamila. Chapter 5 - Materials and processes for electronic devices and components: how they contribute to corrosion reliability? Online. In: . Woodhead Publishing, 2022, s. 197-250. ISBN 9780323908535. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323908535000062>. [cit. 2024-05-18].
- [20] LONG, Ernest a TOSCANO, Lenora. Electroless Nickel/Immersion Silver—A New Surface Finish PCB Applications. Online. *Metal Finishing*. 2013, roč. 111, č. 1, s. 12-19. ISSN 0026-0576. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026057613701715>. [cit. 2024-05-18].
- [21] Povrchová úprava. In: *Gatema.cz* [online]. 2021 [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.gatema.cz/file-link/povrchove-upravy.pdf>
- [22] ABE.TEC, s.r.o. *Jak vyhovět požadavkům norem pro součástky citlivé na vlhkost v prostředí elektronické výroby* [online]. 2. Ostřešany [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.abetec.cz/eshop/product/e-book-ke-stazeni-zdarma-jak-vyhovet-pozadavkum-norem-pro-soucastky-citlive-na-vlhkost/>
- [23] Vysoká škola chemicko-technologická. *Obecná a anorganická chemie* [online]. 14. 7. 2022 [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://e-learning.vscht.cz/mod/page/view.php?id=13066>

- [24] AMTECH. Problematika zacházení s komponenty náchylnými na vlhkost. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2013, (5) [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/clanky/id:3428/problematika-zachazeni-s-komponenty-nachylnymi-na-vlhkost>
- [25] SMT CENTRUM. *Některé problémy pájitelnosti* [online]. 2017 [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/nektere-problemy-pajitelnosti/>
- [26] KUDLÁČEK, Ivan. České vysoké učení technické v Praze. *Korozní znehodnocování* [online]. [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/351299/mod\\_resource/content/1/05\\_z\\_Koroze.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/351299/mod_resource/content/1/05_z_Koroze.pdf)
- [27] HACKERMAN, Norman. *Electrochemistry Encyclopedia: CORROSION INHIBITION* [online]. Austin, TX 78712, USA, 2006 [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20090703235638/http://electrochem.cwru.edu/encycl/art-i01-inhibitors.htm>. The University of Texas at Austin.
- [28] LI, Licky. PCB HERO. *PCB Corrosion: Causes & How to Prevent It* [online]. 2023 [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.pcb-hero.com/blogs/lickys-column/pcb-corrosion-causes-how-to-prevent-it>
- [29] PODZEMSKÝ, Jiří. *Struktura spojů pájených pájkami bez olova a její vliv na vnější vzhled spoje* [online]. České vysoké učení technické v Praze [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/podzemsky.pdf>
- [30] BERNASKO, Peter. *Study of Intermetallic Compound Layer Formation, Growth and Evaluation of Shear Strength of Lead-Free Solder Joints* [online]. UK, 2012 [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: [https://gala.gre.ac.uk/id/eprint/9452/1/Peter\\_Kojo\\_Bernasko\\_2012.pdf](https://gala.gre.ac.uk/id/eprint/9452/1/Peter_Kojo_Bernasko_2012.pdf). Disertační práce. School of Engineering, University of Greenwich.
- [31] CAHN, R. W. a Michael B. BEVER. Volume 7, T - Z. In: *Encyclopedia of Materials Science and Engineering*. US: Pergamon Press, 1986. ISBN 978-0262031424.
- [32] PIETRIKOVÁ, A., J. ĎURIŠIN a P. MACH. Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.
- [33] LAVERY, Patrick. Tin whiskers and RoHS: a perspective. Online. S. 93. Dostupné z: [https://www.vicorpower.com/documents/industry\\_articles/rohs\\_article2.pdf](https://www.vicorpower.com/documents/industry_articles/rohs_article2.pdf). [cit. 2024-05-19].
- [34] KUYKENDALL, Michelle, Daniel KINGSLEY a Ashish ARORA. INCOMPLIANCE. *The Impact of Tin Whisker Formation on Vehicle Electronics* [online]. 2022 [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://incompliancemag.com/article/the-impact-of-tin-whisker-formation-on-vehicle-electronics/>
- [35] EPP EUROPE. *The black pad effect* [online]. 2012 [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://epp-europe-news.com/technology/applications/the-black-pad-effect/#slider-intro-1>
- [36] KUDLÁČEK, Ivan. České vysoké učení technické v Praze. *Další prostředky dočasné ochrany*, prezentováno v kurzu BD1M13EKP Ekologie a materiály, Praha, 2023 [cit. 2024-02-05].
- [37] SMT CENTRUM. *Metoda smáčekcích vah: Pájený spoj, pájitelnost* [online]. In: . [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/metoda-smacecich-vah/>
- [38] XU, Frank, Robert FARRELL a Rita MOHANTY. *To Quantify a Wetting Balance Curve* [online]. In: . West Haven, CT, s. 28 [cit. 2024-02-05]. Dostupné z:

[https://www.ipc.org/system/files/technical\\_resource/E39%26S19\\_02%20-%20Frank%20Xu.pdf](https://www.ipc.org/system/files/technical_resource/E39%26S19_02%20-%20Frank%20Xu.pdf)

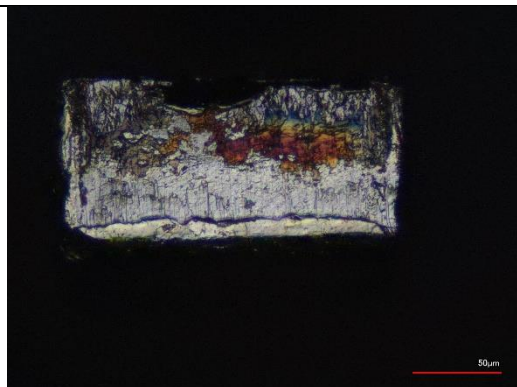
- [39] KRÁLOVÁ, Iva. *Testování pájitelnosti bezolovnatých slitin metodou smáčecích vah*. Online, Diplomová práce, vedoucí Karel Dušek. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2022. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/100880/F3-DP-2022-Kralova-Iva-Diplomova%20prace%2c%20Iva%20Kralova-Mereni\\_pajitelnosti\\_metodou\\_smacecich\\_vah.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/100880/F3-DP-2022-Kralova-Iva-Diplomova%20prace%2c%20Iva%20Kralova-Mereni_pajitelnosti_metodou_smacecich_vah.pdf?sequence=-1&isAllowed=y). [cit. 2024-05-19].
- [40] MINÁŘ, Jan. *Kvalita povrchových úprav DPS a optimalizace testovacího kupónu*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [41] BOLTON, J.T. (1984), "The Meniscograph as a Quality Control Tool—A Case Study in Solderability Testing", *Circuit world*, Vol. 10 No. 3, pp. 4-7. <https://doi.org/10.1108/eb043720>
- [42] ONEIDA RESEARCH SERVICES INC. *Solderability testing* [online]. [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://orslabs.com/services/mechanical-testing/solderability-testing/>
- [43] ALMIT. *Soldering terminology - Globule test* [online]. [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.almi.de/terminologie-des-Lotens/globule-test>
- [44] *Solderability testing* [online]. 2014 [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: [https://www.idc-online.com/technical\\_references/pdfs/mechanical\\_engineering/Solderability\\_Testing.pdf](https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/Solderability_Testing.pdf)
- [45] DUŠEK, Karel. České vysoké učení technické v Praze. *Mikroskopie*, prezentováno v kurzu B1M13MAD Kontrolní metody a testování v elektrotechnologii, Praha, 2023 [cit. 2024-02-05]
- [46] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky: Princip činnosti mikroskopu* [online]. In: . [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/501-princip-cinnosti-mikroskopu>
- [47] GRZNÁROVÁ, Petra, LIPOV, Jan a ANGELINI, Jindřiška. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. *Optická mikroskopie* [online]. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: [https://clab.vscht.cz/files/uzel/0027688/0011~8y8oyUz2zSzKL842MjA09\\_LMAwA.pdf?redirected](https://clab.vscht.cz/files/uzel/0027688/0011~8y8oyUz2zSzKL842MjA09_LMAwA.pdf?redirected)
- [48] PLÁŠEK, Jaromír. Konfokální mikroskop. Online. *Vesmír*. 1995, č. 9. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/1995/cislo-9/konfokalni-mikroskop.html>. [cit. 2024-05-18].
- [49] KUBÍNOVÁ, Lucie. *Pohledy do trojrozměrného mikrosvěta: konfokální a dvoufotonová mikroskopie*. Online. Dostupné z: <https://ziva.avcr.cz/files/ziva/pdf/pohledy-do-trojrozmerneho-mikrosveta-konfokalni-a.pdf>. [cit. 2024-05-18].
- [50] ŠKODA, Jan a JAČENKOVÁ, Blanka. *Konfokální mikroskopie a nové trendy ve fluorescenční mikroskopie*. Online. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/sci/jaro2017/Bi8920/um/2017\\_05\\_Konfokalni\\_mikroskopie\\_a\\_nove\\_trendy.pdf](https://is.muni.cz/el/sci/jaro2017/Bi8920/um/2017_05_Konfokalni_mikroskopie_a_nove_trendy.pdf). [cit. 2024-05-18].
- [51] ELLIOTT, Amicia D. *Confocal Microscopy: Principles and Modern Practices*. Online. In: . 2021. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6961134/#R14>. [cit. 2024-05-18].
- [52] HIBBS, Alan R. Chapter 1 What is Confocal Microscopy? Online. In: *Confocal Microscopy for Biologists*. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=Y0YyBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT16&ots=grniNnbZKf&sig=1I-ayxHppGeQHq6o1ZdIR5zrTnI&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=Y0YyBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT16&ots=grniNnbZKf&sig=1I-ayxHppGeQHq6o1ZdIR5zrTnI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false). [cit. 2024-05-18].

- [53] UMASS CHAN MEDICAL SCHOOL. *What is Electron Microscopy?* Online. Dostupné z: <https://www.umassmed.edu/cemf/whatisem/>. [cit. 2024-05-19].
- [54] NANOSCIENCE INSTRUMENTS. *What is Scanning Electron Microscopy?* Online. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-electron-microscopy/>. [cit. 2024-05-19].
- [55] SWAPP, Susan. *Scanning Electron Microscopy (SEM)*. Online. 2007. Dostupné z: <https://serc.carleton.edu/18401>. [cit. 2024-05-19].
- [56] MOGK, David. X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS; aka Electron Spectroscopy for Chemical Analysis, ESCA). Online. 2021. Dostupné z: [https://serc.carleton.edu/msu\\_nanotech/methods/xps.html](https://serc.carleton.edu/msu_nanotech/methods/xps.html). [cit. 2024-05-19].
- [57] VESELÝ, Petr. *Laboratoř diagnostiky materiálů*. Online. 2018. Dostupné z: <https://technology.fel.cvut.cz/laboratore/laborator-diagnostiky-materialu/>. [cit. 2024-05-19].
- [58] MICROTRONIC MICROELECTRONIC VERTRIEBS GMBH. *LBT210 Solderability Tester Wetting Balance*. Online. 2016. Dostupné z: [https://www.microtronic.de/pdf/lbt210\\_en.pdf](https://www.microtronic.de/pdf/lbt210_en.pdf). [cit. 2024-05-19].

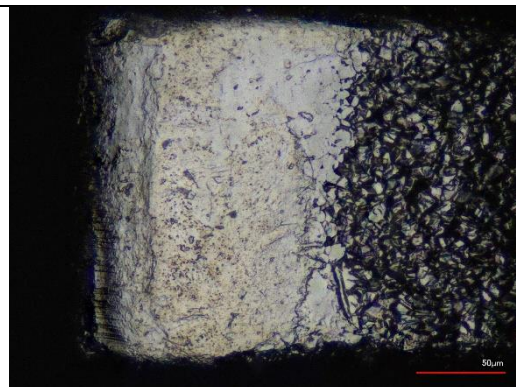


## PŘÍLOHY

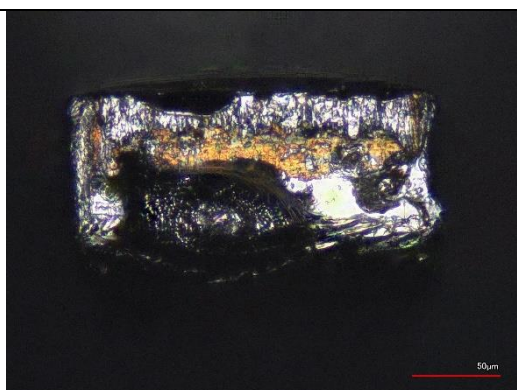
### SMÁČENÉ VÝVODY SADY VZORKŮ 1 – Konfokální mikroskopie



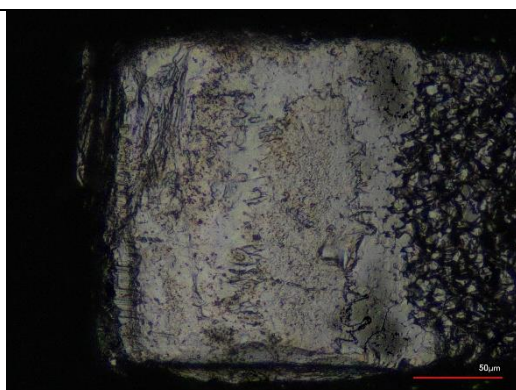
Nesmáčeno, přední strana, 50×, coax



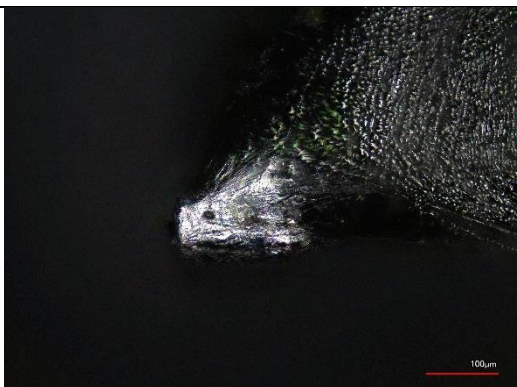
Nesmáčeno, spodní strana, 50×, coax



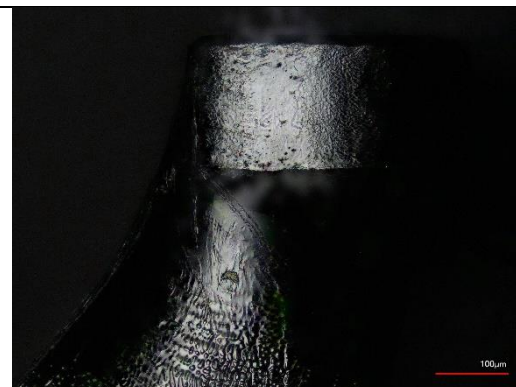
Bez tavidla, přední strana, 50×, coax



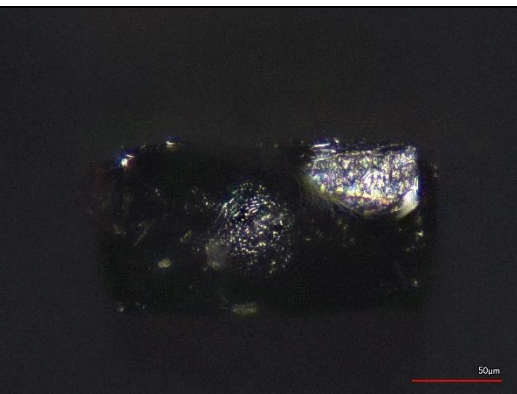
Bez tavidla, spodní strana, 50×, coax



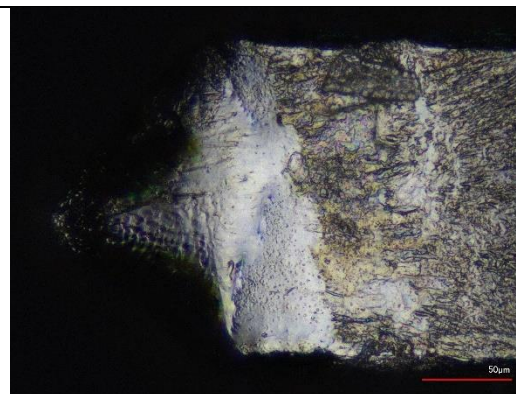
LP-1 tavidlo, přední strana, 20×, coax



LP-1 tavidlo, spodní strana, 20×, coax



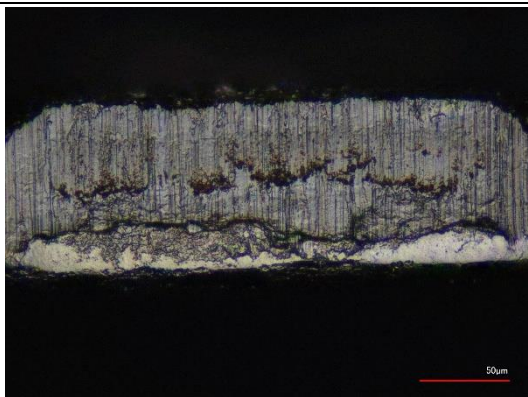
IPC tavidlo, přední strana, 50×, coax



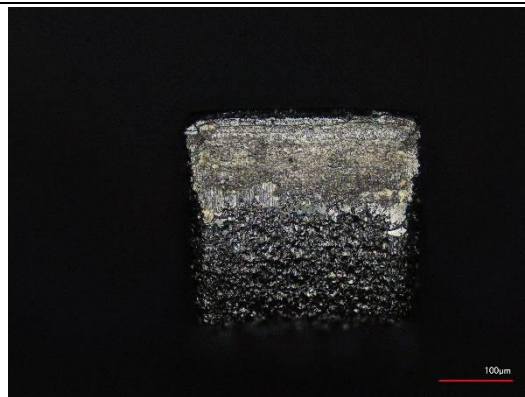
IPC tavidlo, spodní strana, 50×, coax



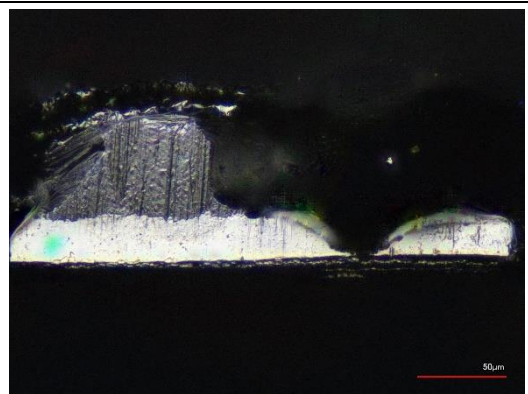
## SMÁČENÉ VÝVODY SADY VZORKŮ 2 – Konfokální mikroskopie



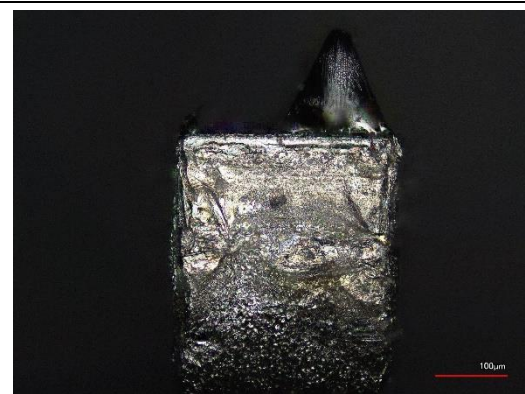
Nesmáčeno, přední strana, 50×, coax



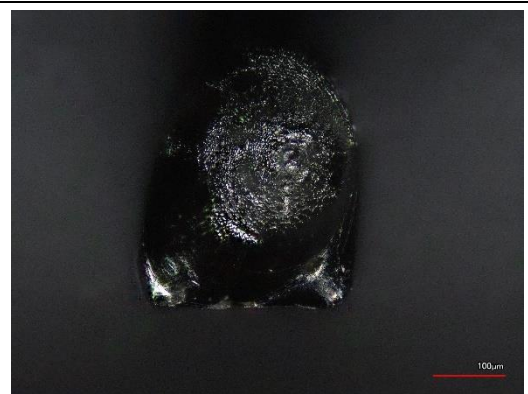
Nesmáčeno, spodní strana, 20×, coax



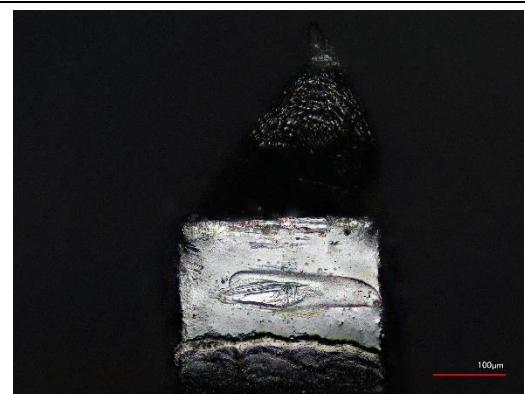
Bez tavidla, přední strana, 50×, coax



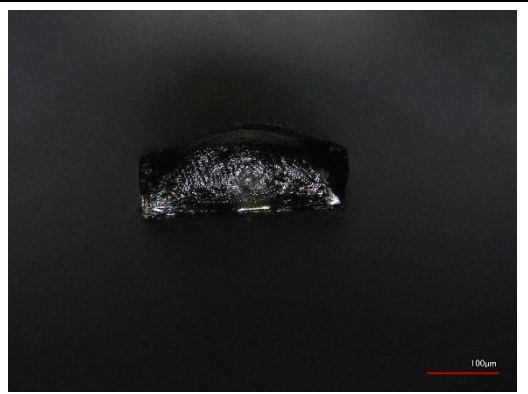
Bez tavidla, spodní strana, 20×, coax



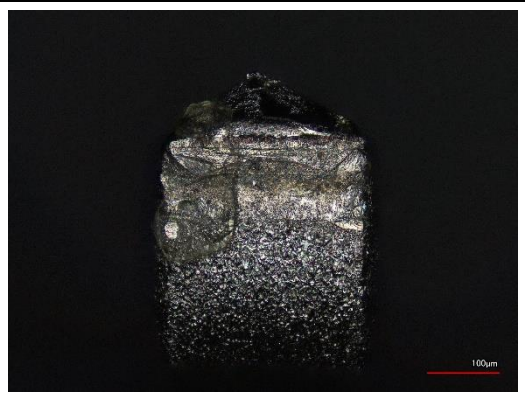
LP-1 tavidlo, přední strana, 20×, coax



LP-1 tavidlo, spodní strana, 20×, coax

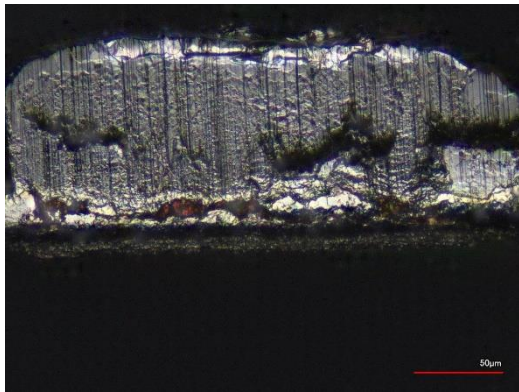


IPC tavidlo, přední strana, 20×, coax

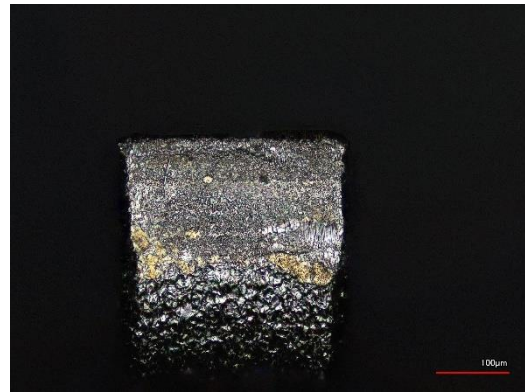


IPC tavidlo, spodní strana, 20×, coax

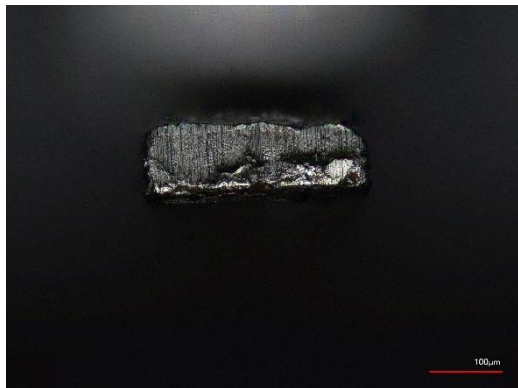
### SMÁČENÉ VÝVODY SADY VZORKŮ 3 – Konfokální mikroskopie



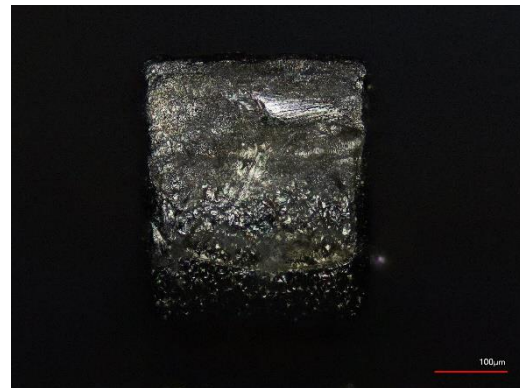
Nesmáčeno, přední strana, 50×, coax



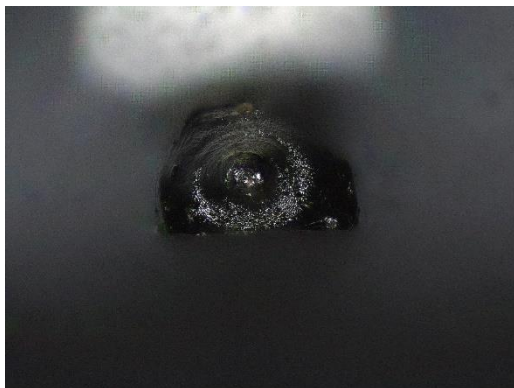
Nesmáčeno, spodní strana, 20×, coax



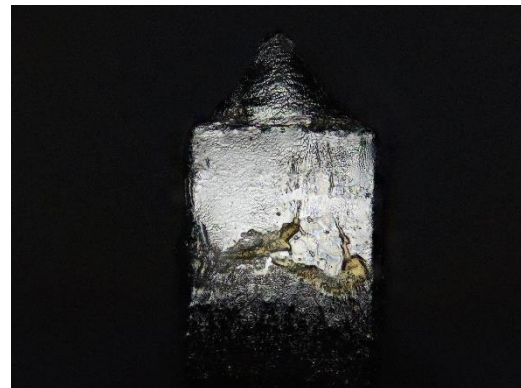
Bez tavidla, přední strana, 20×, coax



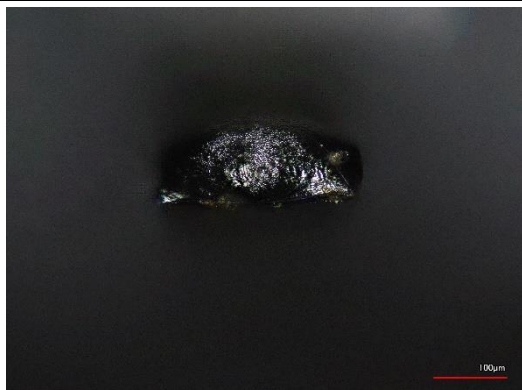
Bez tavidla, spodní strana, 20×, coax



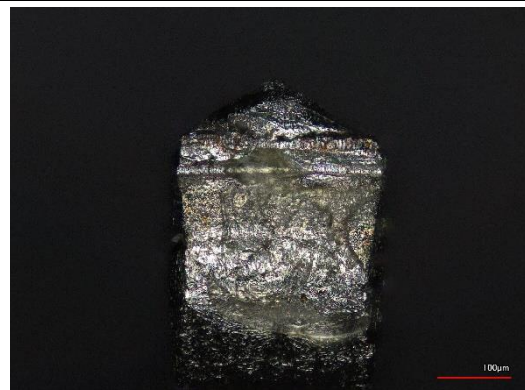
LP-1 tavidlo, přední strana, 20×, coax



LP-1 tavidlo, spodní strana, 20×, coax



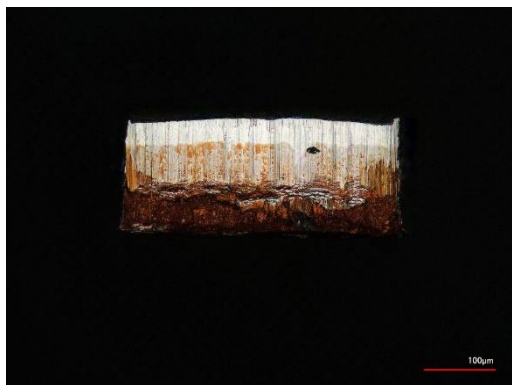
IPC tavidlo, přední strana, 20×, coax



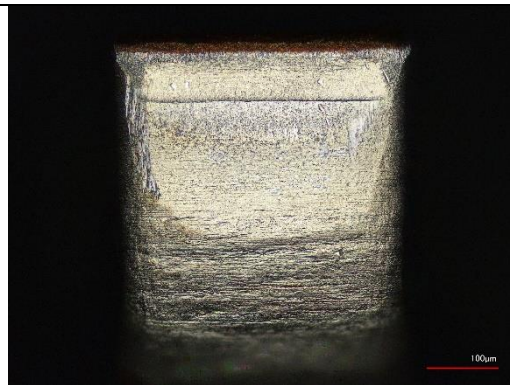
IPC tavidlo, spodní strana, 20×, coax



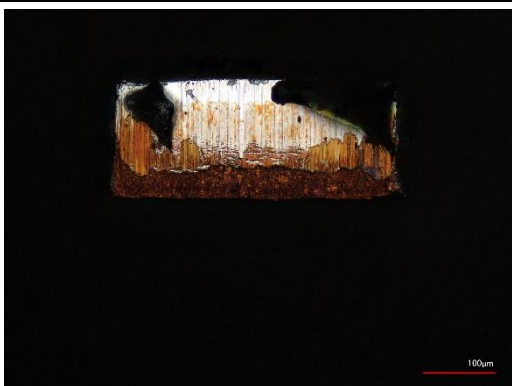
## SMÁČENÉ VÝVODY SADY VZORKŮ 4 – Konfokální mikroskopie



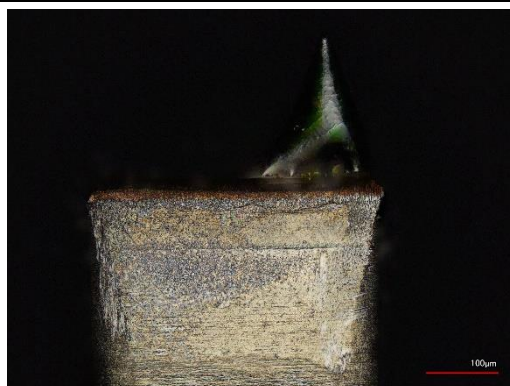
Nesmáčeno, přední strana, 20×, coax



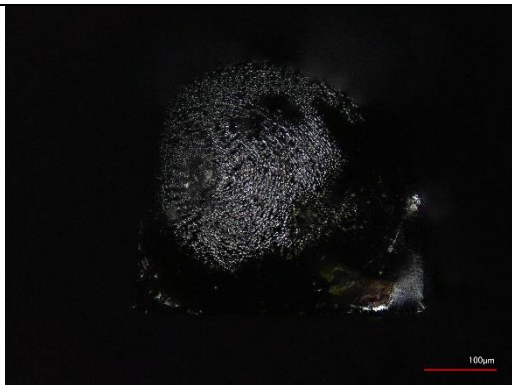
Nesmáčeno, spodní strana, 20×, coax



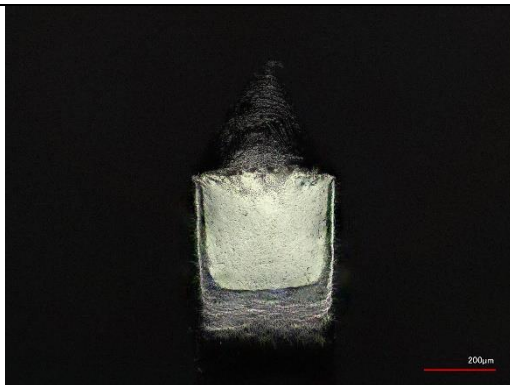
Bez tavidla, přední strana, 20×, coax



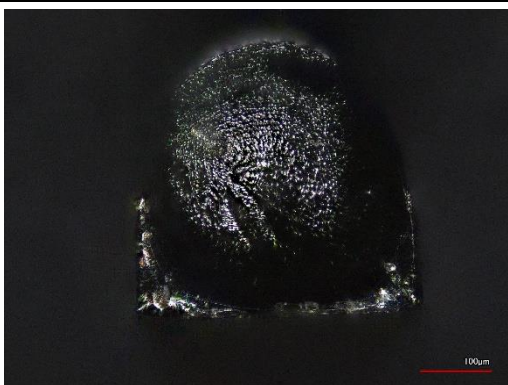
Bez tavidla, spodní strana, 20×, coax



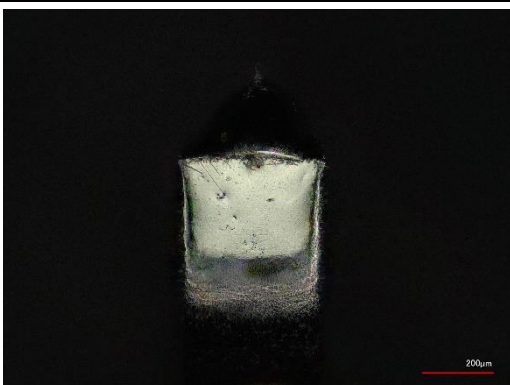
LP-1 tavidlo, přední strana, 20×, coax



LP-1 tavidlo, spodní strana, 10×, ring+coax

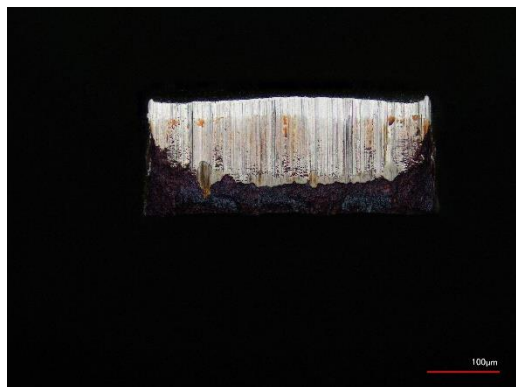


IPC tavidlo, přední strana, 20×, coax

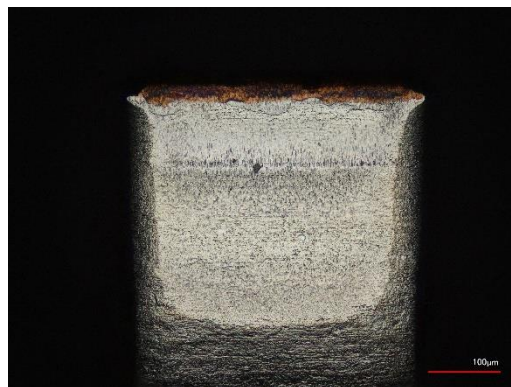


IPC tavidlo, spodní strana, 10×, ring+coax

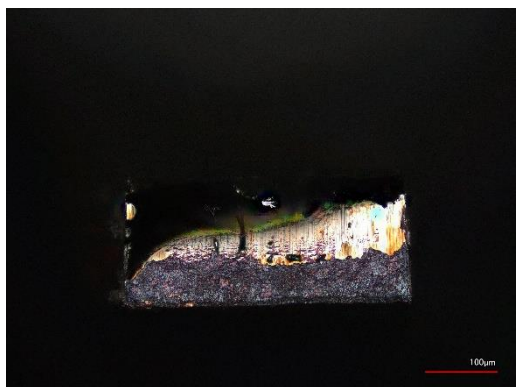
## SMÁČENÉ VÝVODY SADY VZORKŮ 5 – Konfokální mikroskopie



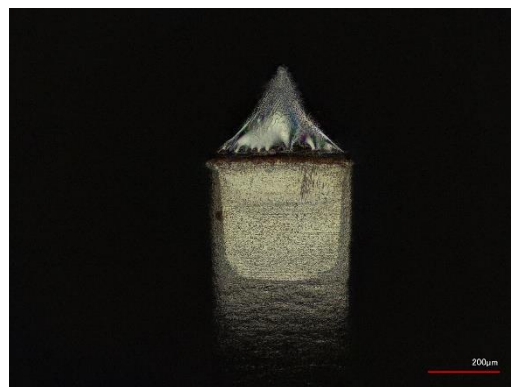
Nesmáčeno, přední strana, 20×, coax



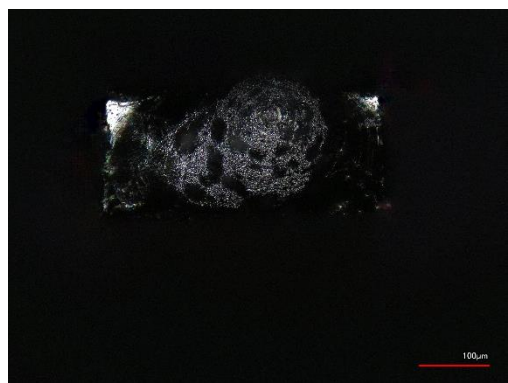
Nesmáčeno, spodní strana, 20×, coax



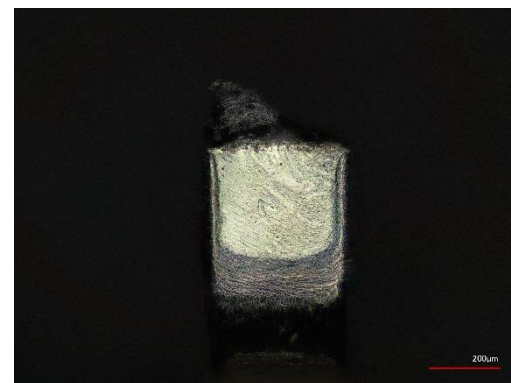
Bez tavidla, přední strana, 20×, coax



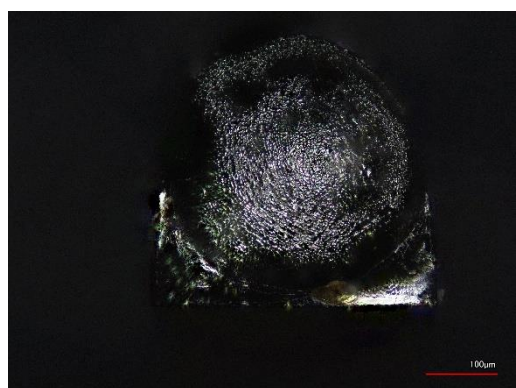
Bez tavidla, spodní strana, 10×, ring+coax



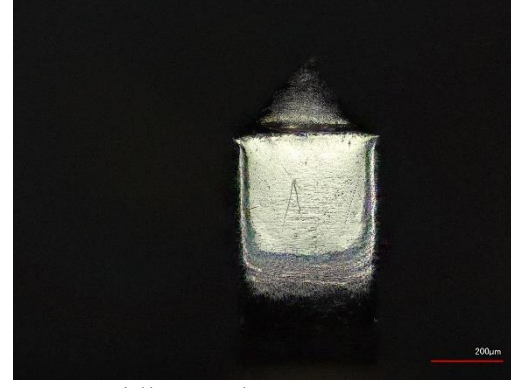
LP-1 tavidlo, přední strana, 20×, coax



LP-1 tavidlo, spodní strana, 10×, ring+coax



IPC tavidlo, přední strana, 20×, coax



IPC tavidlo, spodní strana, 20×, coax