

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

A0M13IND

Mechanické vlastnosti spojů pájených ultrazvukem

Mechanical properties of ultrasonic-assisted soldering joints

Autor práce: Bc. Martin Čepěk

Vedoucí práce: Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Studijní obor: Technologické systémy

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
katedra elektrotechnologie

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Martin Čepek**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Technologické systémy

Název tématu: **Mechanické vlastnosti spojů pájených ultrazvukem**

### Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se a porovnejte rozdíly konvenčních metod pájení a pájení pomocí ultrazvuku.
2. Porovnejte mechanické vlastnosti pájených spojů vytvořených ultrazvukovým a konvenčním pájením na substrátech s různou povrchovou úpravou.
3. U vybraných vzorků prozkoumejte vnitřní strukturu pájeného spoje.
4. Výsledky experimentů vyhodnoťte.

### Seznam odborné literatury:

- [1] Subramanian K.: Lead-free Solders : Materials Reliability for Electronics, 2012, Wiley, ISBN:9780470971826
- [2] Karl J. Puttlitz, Kathleen A. Stalter: Handbook of Lead-free Solder Technology, ISBN: 9780824748708
- [3] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [4] Pietriková A., Ďurišín J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálů pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

Vedoucí: Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

Ing. Karel Dušek, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.

vedoucí katedry

děkan

V Praze dne 16. 3. 2016

## **Poděkování:**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za jeho rady, pomoc a odborné vedení. Dále děkuji rodině za psychickou a morální podporu při psaní práce.

## **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Mechanické vlastnosti spojů pájených ultrazvukem vypracoval samostatně a v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů pro vypracování závěrečných prací, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

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

V Praze dne .....

**Martin Čepek**

**Anotace:**

Předkládaná diplomová práce se zabývá ultrazvukovým pájením, porovnáním této metody pájení s metodami konvenčními. Porovnáním vlastností těchto spojů jak z hlediska mechanického, tak fyzikálně-chemického.

**Klíčová slova:**

Ultrazvuk, kavitace, ultrazvukové pájení

**Abstract:**

Presented diploma thesis deals with ultrasonic soldering, comparing this method of soldering with conventional methods by comparing mechanical properties as well as physico-chemicals properties.

**Key words:**

Ultrasound, cavitation, ultrasound soldering

# Obsah

Teoretická část.....	8
1 Úvod.....	8
2 Dělení pájení podle metody .....	9
2.1 Pájení pájedlem .....	9
2.2 Reakční pájení .....	9
2.3 Pájení ultrazvukem .....	9
2.4 Pájení ponorem.....	10
2.5 Pájení v peci .....	10
2.6 Pájení ve vakuu.....	10
2.7 Pájení odporovým teplem .....	10
2.8 Indukční pájení.....	11
2.9 Pájení plamenem .....	11
2.10 Pájení IR paprsky.....	12
2.11 Pájení přetavením.....	12
2.12 Pájení vlnou .....	14
3 Úvod do ultrazvuku.....	15
3.1 Historie .....	15
4 Ultrazvuk .....	17
4.1 Co je to ultrazvuk? .....	17
4.1.1 Akustická kavitace .....	18
4.1.2 Teorie kavitace .....	18
5 Ultrazvuk v medicíně .....	20
5.1 Způsoby zobrazení obrazu .....	21
5.1.1 Jednorozměrná zobrazení .....	21
5.1.2 2D zobrazení .....	22
5.1.3 3D zobrazení .....	23
6 Ultrazvukové pájení.....	25
6.1 Ultrazvukový pájecí systém .....	25
6.2 Efekt kavitace v ultrazvukovém pájení .....	26
6.3 Ultrazvukové pájení kovů.....	26
6.4 Mechanické působení ultrazvuku během pájení .....	27
6.5 Chemické působení ultrazvuku během pájení.....	27
6.6 Úpravy povrchu před ultrazvukovým pájením .....	28
6.7 Průběh ultrazvukového pájení .....	28
6.8 Ultrazvukové pájení nekovů.....	28
6.9 Aktivní pájecí slitiny .....	29
7 Ultrazvukové čištění.....	31
7.1 Princip UZ čištění.....	31
7.2 Výhody ultrazvukového čištění .....	32
7.3 Využití ultrazvukového čištění .....	32
8 Pájecí slitiny.....	34
8.1 Měkké pájky .....	34
8.2 Tvrdé pájky.....	34
9 Dělení pájek podle materiálu .....	35

9.1	Bezolovnaté pájky.....	35
9.2	Olovnaté pájky.....	38
<b>Praktická část .....</b>		<b>37</b>
<b>10</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>37</b>
<b>11</b>	<b>Porovnání mechanických vlastností pájených spojů.....</b>	<b>37</b>
11.1	Výroba vzorků .....	37
11.2	Použité slitiny a páječky .....	38
11.3	Testování a výsledky testování .....	40
11.4	Zhodnocení experimentu .....	42
<b>10</b>	<b>Porovnání vnitřní struktury pájených spojů .....</b>	<b>45</b>
10.1	Výroba vzorků .....	45
<b>11</b>	<b>Vyhodnocení vzorků .....</b>	<b>47</b>
<b>11.1</b>	<b>Podklad: Sklo.....</b>	<b>47</b>
11.1.1	Aktivní pájecí olovnatá slitina na sklo .....	47
11.1.2	Aktivní pájecí bezolovnatá slitina na sklo .....	49
<b>11.2</b>	<b>Podklad: Měď.....</b>	<b>50</b>
11.2.1	Sn93Ag6,5Cu0,5 + Sn93Ag6,5Cu0,5 .....	50
11.2.2	Sn93Ag6,5Cu0,5 + bezolovnatá pájecí pasta .....	51
11.2.3	Bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + Bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku .....	52
11.2.4	Bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + bezolovnatá pájecí pasta .....	53
11.2.5	Bezolovnatá aktivní pájecí slitina bez použití ultrazvuku + Bezolovnatá aktivní pájecí slitina bez použití ultrazvuku .....	54
11.2.6	Bezolovnatá aktivní pájecí slitina bez použití ultrazvuku + bezolovnatá pájecí pasta .....	55
11.2.7	Olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + bezolovnatá pájecí pasta .....	56
11.2.8	Olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + Olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku.....	58
<b>11.3</b>	<b>Povrchová úprava: ENIG .....</b>	<b>60</b>
11.3.1	Olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + Olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku.....	60
11.3.2	Sn93Ag6,5Cu0,5 + Sn93Ag6,5Cu0,5 .....	63
11.3.3	Bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + Bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku .....	65
11.3.4	Olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + bezolovnatá pájecí pasta .....	67
11.3.5	Bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + bezolovnatá pájecí pasta .....	69
<b>11.4</b>	<b>Podklad: HAL.....</b>	<b>71</b>
11.4.1	Olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + Olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku.....	71
11.4.2	Bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + Bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku .....	73
11.4.3	Sn93Ag6,5Cu0,5 + Sn93Ag6,5Cu0,5 .....	75
11.4.4	Olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + bezolovnatá pájecí pasta .....	77
11.4.5	Bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + bezolovnatá pájecí pasta .....	79
11.4.6	Sn93Ag6,5Cu0,5 + bezolovnatá pájecí pasta .....	81
<b>12</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>83</b>
<b>Přehled použité literatury.....</b>		<b>85</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>		<b>87</b>
<b>Seznam tabulek.....</b>		<b>89</b>

# Teoretická část

## 1 Úvod

Pájení je jeden z nejstarších způsobů spojování za tepla. Jeho základním principem je spojování materiálů pomocí roztaveného pomocného materiálu. První zmínky o pájení pocházejí již ze starověkého Egypta, dávno před naším letopočtem. Rozsáhlé rozšíření a použití této metody zejména v průmyslové výrobě se datuje až od roku 1930.

Pájení v elektrotechnice patří k nejdůležitějším činnostem v elektrotechnickém průmyslu a je u něj kladen vysoký důraz na kvalitu.

V minulých desetiletích bylo preferováno pájení olovnatými slitinami z důvodů, jak kvalitativních, tak ekonomických. V současnosti však podle evropské směrnice RoHS (Restriction of Hazardous Substances – směrnice EU) je zakázáno používat olovo v pájkách. Olovnaté pájky jsou tedy nahrazovány různými slitinami, u kterých je nutno dosáhnout srovnatelných parametrů.



*Obr 1: Historická ilustrace pájení*

V této diplomové práci se budu věnovat problematice pájení. Zaměřím se na pájecí metody, olovnaté a bezolovnaté pájky, na jejich vlastnosti a vzájemné rozdíly.



## 2 Dělení pájení podle metody

Asi nejjednodušším dělením pájení je dělení dle použité metody. Následující část mé práce neobsahuje ani přibližně všechny možné metody pájení, jde spíše pouze o informativní seznam.

### 2.1 Pájení pájedlem

Jedná se o nejstarší a nejrozšířenější metodu měkkého pájení. Největší výhodou této metody je rychlý přenos tepla do přesně vymezeného místa spoje, tudíž dochází pouze k ovlivnění materiálu v okolí spoje. [1]

Pájecí přístroj, takzvané pájedlo, je složeno z kovového pájedla a držadla. Volba vhodné velikosti a tvaru pájedla se odvíjí od velikosti pájeného spoje, tloušťky a tepelné vodivosti materiálu a zejména podle přístupnosti spoje. [1]



*Obr 2: souprava pro ruční pájení (pájení pájedlem)*

### 2.2 Reakční pájení

Reakční pájení je způsob využívající reakční schopnosti chemických sloučenin tvořících pájku. Tyto sloučeniny se při pájení rozkládají na kov a produkty mají funkci tavidla. Metoda není příliš rozšířená z důvodu nízké odolnosti spoje proti korozi a také z důvodu nákladného odstraňování zbytků po pájení. [1]

### 2.3 Pájení ultrazvukem

Ultrazvukové pájení je stěžejní metoda pro tuto práci, proto se jí budu hlouběji věnovat v kapitolách 3 až 6.

## 2.4 Pájení ponorem

Pájení ponorem je druhem kapilárního pájení, při kterém je pájený materiál ponořen do lázně s roztavenou taveninou. Díky tomu, že je materiál ponořen v roztavené lázni, nedochází ke kontaktu se vzduchem, a tedy je minimalizována oxidace. [1]



*Obr 3: Souprava na pájení ponorem*

## 2.5 Pájení v peci

Pájení v peci je druhem kapilárního pájení, při němž se ohřívá celý objem součásti. Největší výhodou této metody je schopnost pájet i více součástek složitého tvaru s různým počtem spojů najednou. Protože je součást ohřívána i ochlazována zároveň, nedochází k vnitřnímu pnutí. Mezi hlavní metody pájení v peci patří pájení v peci s normální atmosférou, pájení v peci s ochrannou atmosférou a pájení v peci s redukční atmosférou. [1]

## 2.6 Pájení ve vakuu

Pájení ve vakuu patří mezi novější technologie, používá se například k výrobě motorů, turbínových lopatek a pro měřicí přístroje. Zásadní výhodou této metody je vzduchotěsnost spojů. Z důvodu vysokých cen vakuových pecí se tato metoda používá pouze v těch případech, kdy nelze použít jiných technologií. [1]

## 2.7 Pájení odporovým teplem

Zdrojem tepla je elektrický odpor. Tímto způsobem je možno docílit rychlého vzniku tepla pouze v oblasti spoje, přičemž je možno plně kontrolovat a dodržet teplotu. [1]

Mezi hlavní výhody této metody patří, kromě rychlého ohřevu místního charakteru, vysoká produktivita práce, jednoduchost, hygiena a bezpečnost práce. Jeho hlavní využití je pro spojování vodičů s tepelně citlivou izolací. [1]

## 2.8 Indukční pájení

Při indukčním pájení teplo vzniká elektrickou indukcí, což umožňuje bezdotykový elektrický ohřev součástí na pájecí teplotu. Hlavní podmínkou potřebnou k pájení je dosažení rovnoměrného ohřevu obou spojovaných součástí na pracovní pájecí teplotu. Proto nutnost pomalého ohřevu, aby došlo k rovnoměrnému ohřátí jak povrchu součástí, tak celého průřezu spoje. [1]

Mezi hlavní výhody indukčního pájení patří krátká doba pájení, tudíž nedochází k oxidaci povrchu pájených dílů, dále možnost pájení dlouhých, válcovitých dílů, snadná kontrola tání tavidla a pájky a dobré pracovní podmínky obsluhy. [1]

Za hlavní nevýhodu indukčního pájení se považují obtíže vznikající při pájení tvarově složitých součástí. [1]



Obr 4: Souprava na indukční pájení

## 2.9 Pájení plamenem

Při pájení plamenem dosahujeme místního ohřevu oblasti spoje na pájecí teplotu teplem získaným spalováním hořlavé směsi plynů. Tato metoda je vhodná pro opravy, údržbu, montáž a kusovou výrobu, zejména tvarově rozměrnějších dílů. U této metody se používá skoro výhradně ruční způsob pájení. Výjimečně při pájení v hromadné výrobě se uplatňuje automatizovaný a mechanizovaný způsob pájení. [1]

## 2.10 Pájení IR paprsky

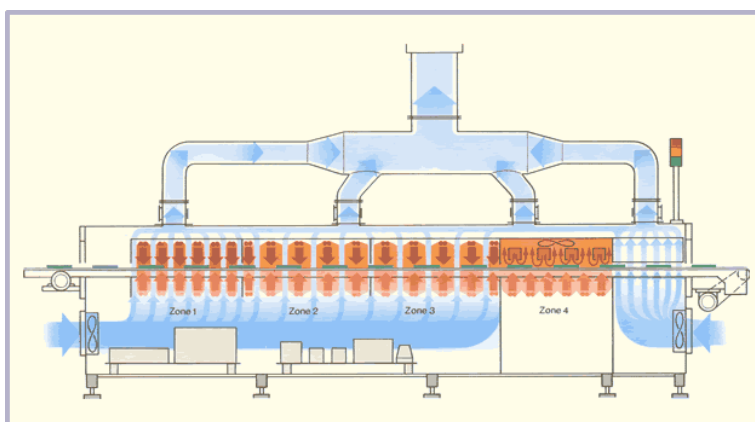
Jde o metodu pájení, při které se tepelná energie do spoje převádí bez dotyku, pouze absorpcí paprsků, které se přeměňují na teplo. Část energie se pak opět vyzáří. [1]

Výhoda ohřevu infračervenými paprsky je v tom, že lze ohřívat předmět ve vakuu nebo v ochranné atmosféře. Nevýhodou je řádově pomalejší ohřev ve srovnání s ohřevem plamenem. [1]

## 2.11 Pájení přetavením

Jedna z nejdůležitějších metod pájení SMD (Surface mount device - součástka pro povrchovou montáž plošných spojů). : [2]

Princip spočívá nejdříve v nanesení pájky ve formě pasty na pájený materiál. Mezi způsoby nanášení pasty patří například síťotisk nebo dávkovač. Dalším krokem je osazení součástkami. Díky lepivosti pasty nehrozí upadávání součástek. Poté proběhne proces přetavení. Je několik běžně používaných postupů. Výhodou je, že při roztavení pájky se osazené součástky díky povrchovému napětí vystředí na pájecích ploškách. [2]



Obr 5: Ilustrace 4-zonové průběžné pece

### 2.11.1 Vyhřívanou deskou

Pájený a osazený materiál se umístí na vyhřívanou desku, kde se zahřeje na teplotu tavení pájky. Po roztavení veškeré pájky se materiál sejme z vyhřívané desky. Metoda je výhodná pro keramické substráty z důvodu nutnosti prohřát celý materiál na teplotu tavení pájky. Při této metodě jde také spájet pouze jednostranně osazený materiál. [2]

### **2.11.2 Zahřátou pájecí formou**

Pro každý druh spoje je nutno zhotovit formu s tvarovanými výstupky. Tyto výstupky přitlačují kontakty součástek k substrátu. Celá forma se zahřeje a teplo pomocí výstupků na kontaktech ohřeje pájku až k roztavení. Poté se vypne ohřev a po vychladnutí se odstraní forma. Hlavní výhodou této metody je, že dojde i k zapájení součástek, T co by mohly pružit. Nevýhodou na druhé straně je, že u součástek nestandardní velikosti a tvaru je nutno použít ruční dopájení. [2]

### **2.11.3 Infrazářičem**

Pro tuto pájecí metodu je možno pájený materiál zapojit do průběžného pájecího zařízení, kde lineární dopravník unáší materiál skrz průběžnou pec. Celý pájecí proces je řízen průchodem několika teplotními zónami. Mezi ně patří například zóna předehřevu, která slouží k ohřátí desky i součástek. Předehřev předchází teplotnímu šoku součástek. V zóně předehřevu se také odpaří většina rozpouštědel z tavidla. V další zóně se odpaří zbytek rozpouštědel a aktivuje se tavidlo. Aktivní látky v tavidle mají za úkol narušit oxidy na vývodech součástek a pájecích ploškách. Následuje zóna přetavení, v této části pece se taví pájka. Teplota je zde o 20 až 40 °C vyšší než teplota tavení pájky. Poslední zónou pece je chladicí zóna s teplotou v rozmezí 30 až 100 °C. Teplota v této části pece je důležitá pro zabránění teplotnímu šoku součástek a vytvoření správné struktury ztuhlé pájky. Použití ohřevu infrazářičem je zpravidla využíváno pro sériovou výrobu osazených desek. Nevýhodou této metody je intenzivní pohlcování vyzářené energie tmavými povrchy součástek a následně možnost lokálního přehřátí pájené desky. [2]

### **2.11.4 Konvekci**

Tento pájecí postup je analogický k pájení infrazářičem, pouze místo zdroje záření je zde ohřátý vzduch pomocí trysek rozváděn přímo na místo pájení, čímž se docílí mnohem rovnoměrnějšího rozvodu tepla. [2]

### **2.11.5 Kondenzační pájení**

Metoda kondenzačního pájení užívá k ohřevu součástek teplo uvolněné fázovým přechodem média z plynného do kapalného stavu. Kondenzace média probíhá, dokud má pájená součást teplotu nižší než je kondenzační teplota média. [2]

Díky přesnému dodržení teploty pájení a rovnoměrného zahřívání nedochází k přehřátí součástek. Tím je umožněno používání jen lehce aktivovaných tavidel. Díky nižším požadavkům na velikost vycházejí kondenzační pájecí zařízení kompaktnější než zařízení pro pájení infrazářičem. Hlavní obor využití je sériová výroba elektronických přístrojů. [2]

### 2.11.6 Pájení laserovým paprskem

Při této metodě jsou pájecí plošky ohřaty paprskem laseru, kterým je dávkováno potřebné množství energie na přesné místo. Pájecí plošky se zahřívají na velmi krátkou dobu a také jen bodově. Díky tomu nedochází k ohřívání součástek. Vzhledem k vysokým nákladům je používána pouze u vysoce choulostivých součástek. [2]

### 2.12 Pájení vlnou

Pájení vlnou je tradiční metoda hromadného pájení v elektronice. Používá se zejména pro pájení desek plošných spojů. Součástky se v tomto případě osazují všechny ze stejné strany a jsou zajištěny přetvarováním vývodů proti vypadnutí. [3]

Základem této metody je umístění pájeného materiálu na dopravník desek, který unáší materiál mezi jednotlivými sekcemi stroje. V první sekci je nanášeno tavidlo. Po nanesení tavidla veze dopravník materiál předehřívací zónou. Tady se odpaří část rozpouštědla z tavidla. Materiál i součástky se zahřejí na teplotu blízkou teplotě tekuté pájky. Materiál následně projíždí vlastní cínovou vlnou. Na výstupu vzniká vlna tekutého kovu s klidným povrchem. Vrcholem vlny protahuje dopravník pájené DPS. Dopravník musí být seřízen tak, aby roztavená pájka nenatekla na stranu součástek. Po průjezdu cínovou vlnou pokračuje materiál do zásobníku nebo myčky desek. [3]



*Obr 6: Zařízení na pájení vlnou*

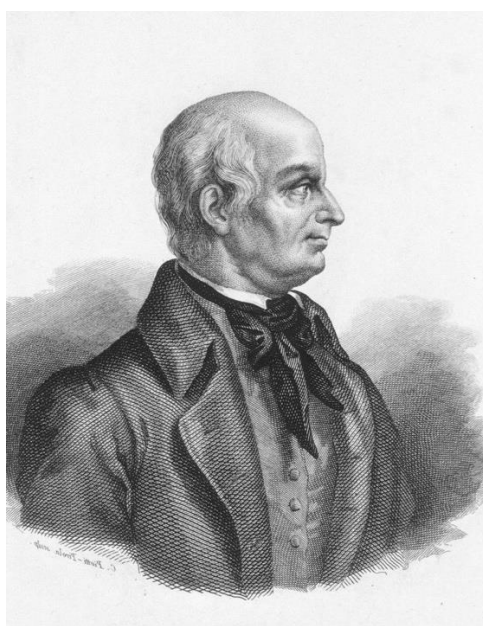
## 3 Úvod do ultrazvuku

V této části práce, bych vás rád krátce seznámil s historií ultrazvuku a objevy vedoucími k jeho současnému stavu.

### 3.1 Historie

Prvním vědcem, který předešel objevu ultrazvuku jako takovém, byl Pythagoras v 6. století před naším letopočtem. [13]

Prvním moderním vědcem, který položil základy modernímu ultrazvuku, byl fyziolog Lazzaro Spallanzani, který jako první studoval echolokaci u netopýrů již kolem roku 1774. [14]



*Obr 7: Lazzaro Spallanzani*

Inspirován katastrofou Titanicu v druhé dekádě dvacátého století, fyzik Paul Langevin dostal za úkol vymyslet zařízení schopné detekovat objekty na dně moře. Langevin využil piezoelektrického efektu objeveného sourozenci Curieovými. [13][14]

Ten byl objeven roku 1880. Piezoelektrický efekt je schopnost krystalu generovat elektrické napětí při deformaci. Jeho výskyt je ale možný pouze u krystalů nemajících střed symetrie. Takzvaný obrácený piezoelektrický jev je působení elektrického pole na krystal. Přímého i obráceného piezoelektrického efektu se využívá v přístrojích generujících ultrazvuk. [20]



*Obr 8: Paul Langevin*

V roce 1934 byla poprvé pozorována sonoluminiscence. Sonoluminiscence je jev, který vzniká při působení zvuku (okolo 110 dB) na vodu, při kterém dojde k záblesku. Tento jev vzniká díky kavitaci a stal se základem pro pozdější průmyslové využití ultrazvukových vln. [21]

Během druhé světové války je ultrazvuk poprvé využit k sonografii pro lékařskou diagnostiku. Neurolog Karl Dussik ho využívá k hledání tumorů v lidské lebce. Z tohoto prvotního medicínského využití se poté dostáváme k modernímu ultrazvuku v lékařství, jak ho známe dnes. [13]

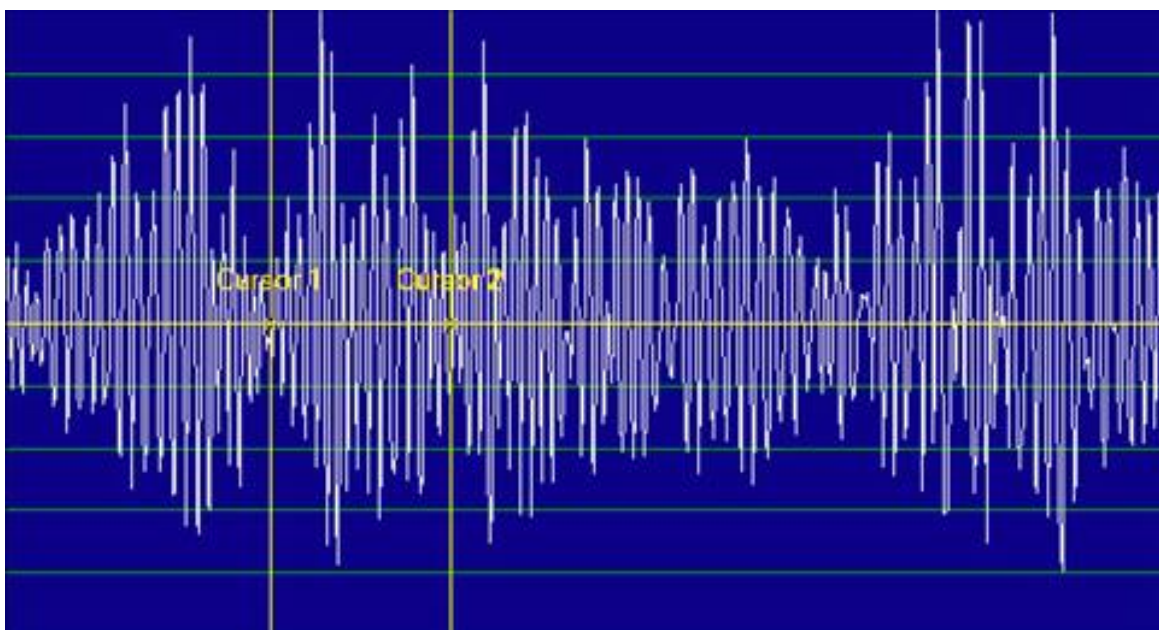


## 4 Ultrazvuk

V této kapitole je mým úkolem definovat ultrazvuk, jeho fyzikální vlastnosti a popsat jeho využití mimo průmysl.

### 4.1 Co je to ultrazvuk?

Ultrazvuk můžeme definovat jako zvukové vlny s frekvencí vyšší než je hladina slyšitelnosti. Ta je ale velice individuální, proto se v průmyslu za ultrazvukové vlnění považuje takové s frekvencí vyšší 20 kHz. Průmyslová zařízení operují s frekvencemi až do několika gigahertzů.  
[13]



*Obr 9: Průběh ultrazvukových kmitů z generátoru zaznamenaných osciloskopem (čas na vodorovné ose, amplituda signálu na svislé ose)*

Ultrazvuk můžeme rozdělit do tří hlavních oblastí

- Nízký výkon, vysoká frekvence (1 MHz – 10 MHz)
- Střední výkon, vysoká frekvence (100 kHz – 1 MHz)
- Vysoký výkon, nízká frekvence (20 kHz – 100 kHz)

Ultrazvuk je používán v širokém rozpětí oborů. Pro běžné lidi je pravděpodobně nejznámější jeho využití medicínské.[12]

### 4.1.1 Akustická kavítace

Proces kavítace je definován jako vznik dutin v kapalině při místním poklesu tlaku, který je následován implozí těchto dutin. Jedním z možných příčin poklesu tlaku může být průchod intenzivní akustické vlny v periodách zředění. Tento jev se nazývá akustická kavítace. [19]



*Obr 10: Kavítace v kapalině*

Máme dvě formy kavítace:

- Stabilní kavítace – bubliny oscilují kolem svých rovnovážných pozic v cyklech rozpínání a komprese [19]
- Přechná kavítace – bubliny rostly pouze v několika akustických cyklech, než znásobily svůj počáteční rozměr a došlo k jejich zborcení [19]

Velikost a životnost kavitačních bublin závisí jak na frekvenci a intenzitě akustického tlaku, ale i na použitém rozpouštědle a externích parametrech jako je teplota nebo tlak. [19]

### 4.1.2 Teorie kavítace

Asi nejpopulárnější teorií je takzvaná „Hot-spot“ teorie. U ní bylo experimentálně dokázáno, že kavitační zborcení vytváří ve svém okolí po extrémně krátkou dobu podmínky s teplotou pohybující se mezi 2000 K až 5000 K a tlakem dosahujícím až 1800 atmosfér uvnitř borbí se kavity. Za specifických podmínek dochází během zborcení kavity k emisi světla (sonoluminiscenci) a kavitační indukované účinky mohou být povahy jak fyzikální, tak ale i chemické nebo biologické. [19]



*Obr 11: Sonoluminescence*

## 5 Ultrazvuk v medicíně

Co se týče využití ultrazvuku v medicíně, nezpochybnitelně nejznámějším příkladem je ultrazuková sonografie. Tato technologie pracuje na principu detekování ultrazvuku odraženého od tkáně. [16][18]



*Obr 12: Sonograf*

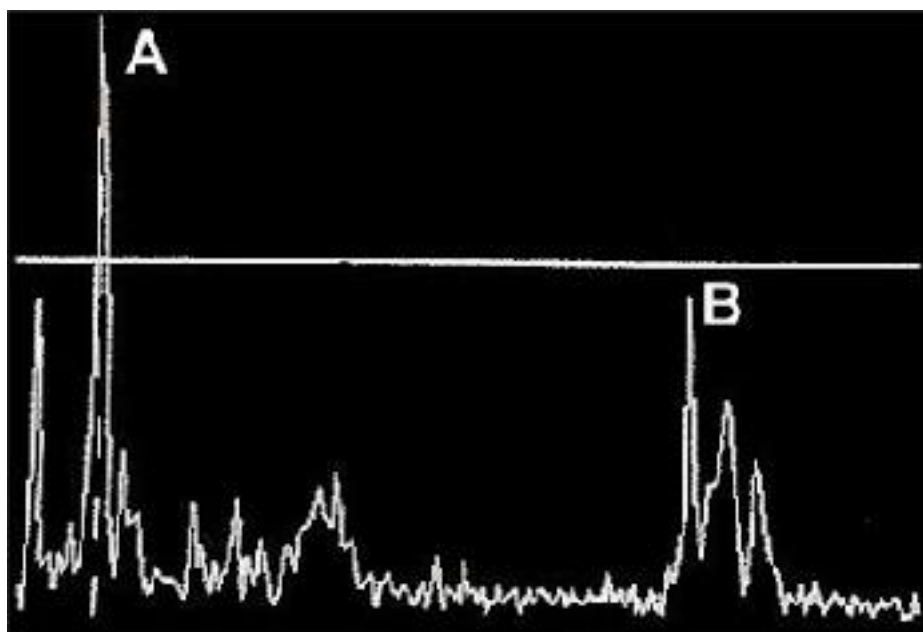
Principem této technologie je, že do těla objektu (pacienta) je vysíláno vlnění o frekvenci mezi 2 a 18 MHz. Měkké tkáně při těchto frekvencích působí jako tekutina a ultrazukové vlnění je pouze podélné. Rychlost toho šíření není ale pro každou tkáň stejná - tkáně mají odlišnou akustickou impedanci. Na rozhraní dvou testovaných tkání jsou tímto vytvořeny vhodné podmínky pro částečný odraz vlnění. V ideálním případě je plocha odrazu kolmá a odražené vlnění může být detekováno. Aby ale odražené vlnění bylo vůbec možno detekovat, vysílá se ultrazvuk v mikrosekundových impulzech s frekvencí okolo 102-103 Hz a zkoumá se doba, za jakou se po vyslání vrátí do senzoru. Z důvodů vysoké akustické impedance vzduchu, je nutné zajistit, aby ultrazvuk procházel pouze kapalným prostředím, toto se obvykle řeší použitím gelu a povrchu sondy. [18]

## 5.1 Způsoby zobrazení obrazu

### 5.1.1 Jednorozměrná zobrazení

#### 5.1.1.1 A mód

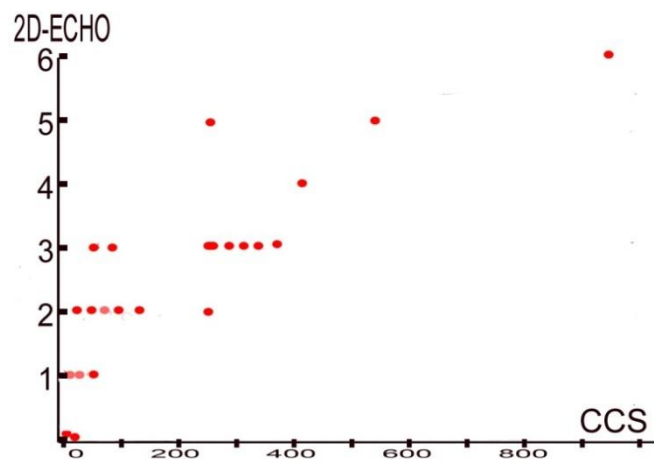
A mód (amplitude mode) je typem jednorozměrného zobrazení, kdy se zobrazují pouze amplitudy odražených signálů a výstupem je křivka zobrazující závislost korigované intenzity odraženého signálu na čase uplynulém od vyslání signálu. Díky tomu máme možnost přesného měření závislostí, bohužel na druhou stranu je velice obtížné se v takovémto obrazu orientovat, a tudíž jeho využití je dost omezeno, například na oční lékařství. [18]



*Obr 13: Zobrazení v A módu*

#### 5.1.1.2 B mód

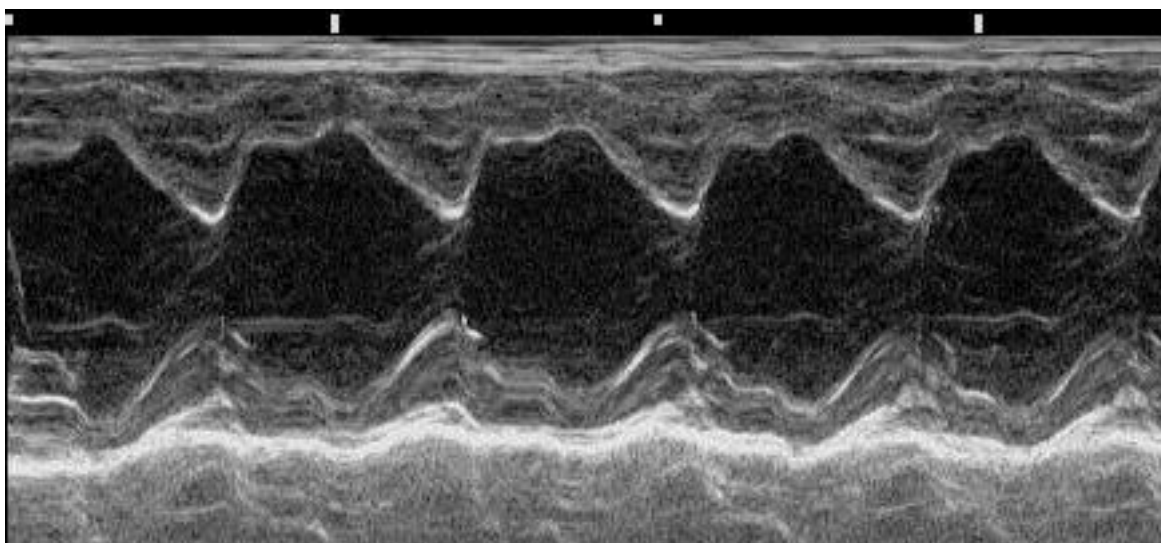
B mód (brightness mode) je druhem jednorozměrného zobrazení, kdy se amplitudy odražených signálů převádějí do odstínů šedé. Výstupem je úsečka složená z částí o různém jasů. [18]



Obr 14: Zobrazení v B módu

### 5.1.1.3 M mód

M mód (Movement mode) je jednorozměrné zobrazení, která nám umožňuje zobrazit pohybující se struktury. Ve své podstatě jde o A mód zobrazený v čase. Jeho typické využití je kardiologii. [18]



Obr 15: Zobrazení v M módu

### 5.1.2 2D zobrazení

Dvojměrné zobrazení je nejtypičtější druhem zobrazení. 2D obraz je získán jako vedle sebe položené 1D obrazy (Módy A a B, nejčastěji ale mód M). Paprsky lze získat vychylováním paprsku jednoho měniče nebo použitím řady měničů zároveň. Podle těchto uspořádání dělíme sondy na: [18]

- lineární – tvořeny řadou rovnoběžných měničů ve tvaru obdélníku [18]
- konvexní – vypouklá sada měničů, tvar kruhové výseče [18]
- sektorové – paprsek mechanicky nebo elektronicky vychylován, tvar větší kruhové výseče [18]

2D zobrazení je asi nejvíce používanou metodou pro vyšetřování interních orgánů, zejména protože je snadno dostupné a neinvazivní. Pro běžnou populaci je nejznámější ultrazvukové vyšetření vyvíjejícího se plodu. Ultrazvuk je také velmi často používán jako prostředek pro navigaci při cílené biopsii podezřelých struktur. [18]



*Obr 16: 2D zobrazení sonogramu*

### 5.1.3 3D zobrazení

Aktuálním trendem v oblasti zobrazování je trojrozměrná rekonstrukce řady za sebou jdoucích dvojrozměrných snímků. Takovéto modely se nejčastěji používají v porodnictví. Jejich využití ale může být nalezeno také například v ortopedii. Trojrozměrný model vzniká jako počítačová rekonstrukce z řady za sebou ležících dvojrozměrných řezů. Pro zkompletování tohoto obrazu je nutno znát přesnou pozici jednotlivých řezů.[18]



*Obr 17: 3D zobrazení sonogramu*



## 6 Ultrazvukové pájení

Ultrazvukové pájení, je proces spojování kovů, technologicky podobný technologii ultrazvukového čištění. Využívá jev vibrace a kavitace v pájce. [12]



*Obr 18: Body napájené na sklo*

### 6.1 Ultrazvukový pájecí systém

Pro ultrazvukové pájení je nutný speciální pájecí systém, jelikož vzhledem k zapojení ultrazvukových vln nelze použít standartní pájedla. Ultrazvukový pájecí systém se skládá z topného elementu, jehož účelem je tavení pájky a dále hrotu, jehož účelem je přenos ultrazvukových vibrací (s frekvencí pohybující se okolo 60 KHz). Díky tomuto ústrojí se na hranici mezi základním materiálem a roztavenou aktivní pájkou vytváří dutiny z kavit ve formě „pěny“. [12]



*Obr 19: Ultrazvuková páječka*

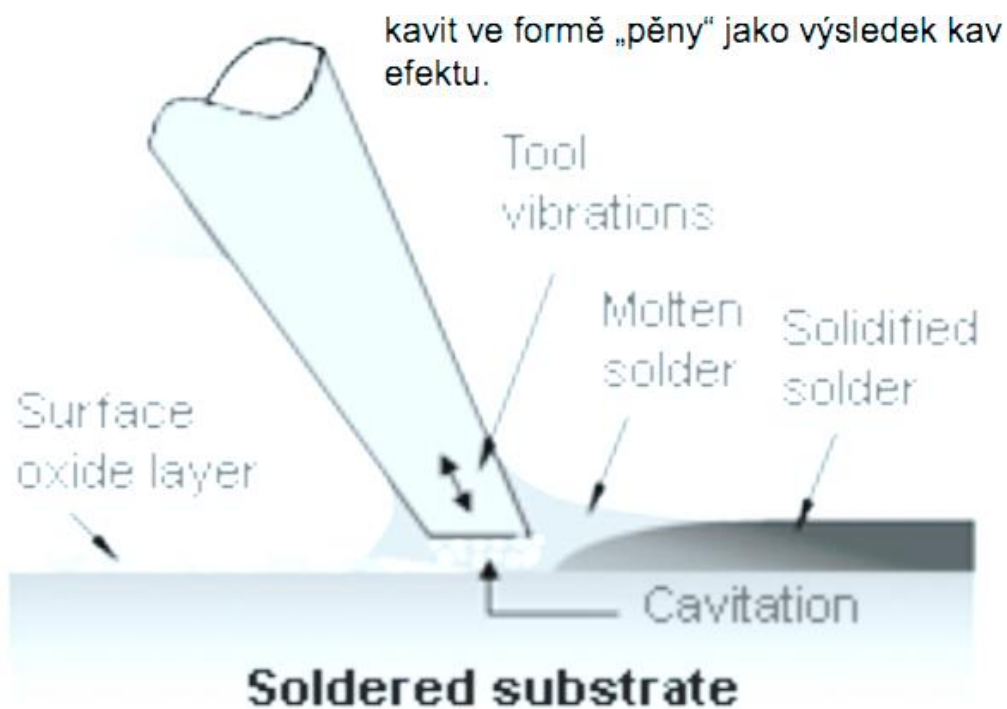
## 6.2 Efekt kavitace v ultrazvukovém pájení

Zásadním přínosem ultrazvuku do pájení je efekt kavitace. Jeho zapojení spočívá v tom, že ultrazvukové vibrace jsou přenášeny do liquidu pájky (pájky v kapalném skupenství). Tím se vytvářejí rozdíly v tlakové amplitudě a začínají vznikat malé kavity ve formě vzduchových bublinek. Ty následně prasknou následkem atmosférického tlaku a tím je uvolněno ohromné množství energie. [12]

Díky tomu, že životnost kavit se pohybuje okolo 1/50 000 vteřiny, základním principem ultrazvukového pájení je okamžité využití energie z kavitačního procesu. [12]

## 6.3 Ultrazvukové pájení kovů

Když se řekne pájení, většině lidí se vybaví kovy, jako měď, olovo, cín nebo třeba stříbro. Jsou ale situace, kdy jsou požadavky na pájení jiných kovů jako třeba hliník nebo nerezové kovy. V těchto případech je klasické pájení obtížné, ne-li nemožné. Dalším problémem pro tato specifická pájení jsou environmentální omezení dle směrnice EU RoHS. Tato směrnice zakazuje nebo alespoň silně omezuje použití vysoce kyselých tavidel. Právě tyto faktory nás nutí k použití ultrazvukového pájení. [12]



Obr 20: Ilustrace pájení na sklo

#### 6.4 Mechanické působení ultrazvuku během pájení

Hlavním a naprosto zásadním faktorem, co se ultrazvukového pájení týká, je kavitační efekt, který má za následek odstranění oxidační vrstvy na povrchu pájeného materiálu. Tím ve své podstatě zcela nahrazuje funkci tavidla, bez nutnosti použít jakoukoliv další látku. Díky tomu, že dojde k erozivnímu působení a k naprosté disperzi oxidů z povrchu pájeného materiálu, dochází k výrazně lepší reakci pájecí slitiny se substrátem a pevnějšímu pájenému spoji. [12]

Dalším faktorem, který napomáhá kvalitě pájeného spoje, při použití ultrazvukového pájení je, že tekutá pájecí slitina je vtlačována do úzkých prostorů, prasklin a mikropórů, čím nejenže utěšňuje povrch, ale i zvětšuje prostor pro vytváření vazeb s pájkou. [12]

Posledním faktorem, ale nikoliv svou důležitostí, je skutečnost, že ultrazvukové vibrace vytěsňují bublinky z pájky v kapalném skupenství a díky tomu vytváří vcelku štíhlý spoj bez bublin. Tato skutečnost dělá ultrazvukové pájení zajímavé pro případné aplikace ve vakuu. [12]

#### 6.5 Chemické působení ultrazvuku během pájení

Zajímavé je také působení ultrazvukových vln na chemické reakce během ultrazvukového pájení. Pájení v tomto případě používá jak tepelnou energii z pájedla, tak i energii uvolněnou

kavitačním efektem. Tyto energie v kombinaci s aktivní pájecí slitinou, o které se zmíním dále, vytvářejí reakční vrstvu, která následně tvoří IMC jako u tradičního pájení. [7]

## **6.6 Úpravy povrchu před ultrazvukovým pájením**

Specifickou vlastností ultrazvukového pájení jsou možnosti úprav povrchu, před samotným aktem pájení. [12]

Jednou z možností jsou různé typy chemické a fyzikální depozice tenkých vrstev, mezi které patří například napařování nebo napařování. Další možností je pokovení mokrou cestou nebo žárové nanášení vodivých materiálů. [12]

V současné době populárním trendem je 2D a 3D tisk vodivého motivu s vytvrzením nebo sinetrací vrstvy. Nelze opomenout také plátování organického substrátu. [12]

Všechny tyto povrchové úpravy lze u ultrazvukového pájení použít a to díky erozivnímu působení pájky. Ultrazvuková pájka částečně rozpouští povrch a díky tomu dojde k smáčení povrchu. [12]

Pokud chceme aplikovat pájku na čistý povrch, je nutno ho očistit od otisků prstů, zbytků pryskyřice, tavidla, přítomnosti kyselin, zásaditých látek, prachu, uhlíku a podobně. Nejlepších výsledků čištění je zpravidla dosahováno chemicky čistým acetonem. [12]

## **6.7 Průběh ultrazvukového pájení**

Pokud je třeba zestručnit princip ultrazvukového pájení, jde to jednoduše vyjádřit jako ultrazvuková energie + tepelná energie + aktivní pájka. [12]

Pokud tuto „relaci“ máme prozkoumat blíže, musíme se na ní podívat s tím, že v aktivní pájce jsou prvky, které chceme, aby reagovaly s povrchem. Jim musíme dodat tepelnou energii. Tímto se tyto takzvaně aktivní prvky koncentrují na rozhraní a díky kavitačnímu efektu formují vazby s deoxidovaným povrchem. [12]

Aktivní pájka má tu neuvěřitelnou výhodu, že díky vzácným prvkům smočí roztavenou pájkou jak kovové, tak i nekovové deoxidované povrchy. [12]

## **6.8 Ultrazvukové pájení nekovů**

Speciální schopností ultrazvukového pájení, která nemá v podobných technologiích obdobu, je schopnost pájet nekovy. Nejběžnějšími příklady jsou keramika, sklo a plasty. Tyto povrchy jsou neschopné klasickou pájkou i v případě dokonale čistých povrchů. To je způsobeno vysokou chemickou stabilitou těchto povrchů a chemickými vazbami atomů. [12]

Pájení na nekovové povrchy je v tomto případě řešeno pájkami obsahujícími takzvané „aktivní prvky“, které jsou schopny reakce se specifickými anionty v nekovovém povrchu. Těmito aktivními prvky je většinou myšlen kyslík, dusík, uhlík a halidové prvky. [12]



*Obr 21: Pájení na keramiku*

## **6.9 Aktivní pájecí slitiny**

Nazývají se aktivní díky tomu, že za pomoci kavitačního efektu se takzvaně zaktivují a stávají se vysoce reaktivními. Těchto aktivních prvků je obvykle v pájce poměrně malé množství. [12]

Výzkum aktivních pájek se v současnosti orientuje i do i oblast bezolovnatých SAC (Sn/Ag/Cu – Cín/Stříbro/Měď) pájek. [12]

Zastoupení aktivačních prvků v pájce a jejich koncentrace se odvíjí od pájených materiálů a podmínek pájecího procesu. Teplota tání u těchto aktivních pájek se pohybuje od přibližně 150°C až do téměř 300°C. [12]

Oblíbeným prvkem v těchto pájkách je titan, chrom i velmi reaktivní hafnium. Poměrně vysoké obsahy lutecia (kolem 2%) pomáhají výrazně redukovat pracovní teploty do oblastí kolem 200°C. [12]

Dále se do aktivních pájecích slitin přidávají i vzácné zeminy, jež modifikují charakteristiky pájek, konkrétně ovlivňují mikrostrukturu, disperzi v pájce, velikost zrn a zvyšují pevnost a pružnost. Ve výjimečných případech se proto používají i nestabilní transurany. [12]



*Obr 22: Aktivní pájka*

## 7 Ultrazvukové čištění

V této kapitole popíšu v průmyslu pravděpodobně nejpoužívanější ultrazvukovou technologii, kterou je ultrazvukové čištění. [22]

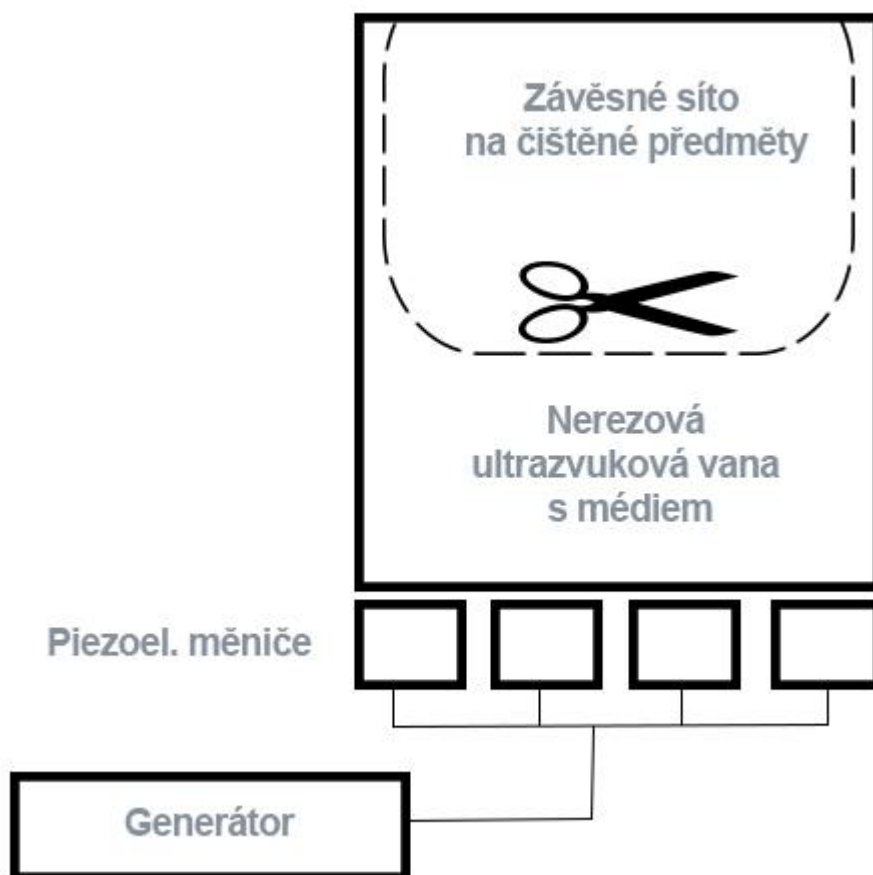


*Obr 23: Ultrazvuková čistička*

### 7.1 Princip UZ čištění

Ultrazvukové čištění je fyzikálně chemický proces, který probíhá na rozhraní čištěného předmětu a tekutého čistícího média. Médium jsou nečistoty narušeny a následně odstraněny za pomoci mechanické energie. Mechanická energie je vytvářena zdrojem ultrazvukového vlnění - ultrazvukovým měničem. Měnič převádí vysokofrekvenční energii z generátoru na mechanicko-akustické kmity, které prostřednictvím tvaru vany vytvoří v kapalině homogenní ultrazvukové pole. [22]

Při průchodu čištěného objektu ultrazvukovým polem způsobuje ultrazvuk intenzivní kmitání molekul, následné zahřívání kapaliny a vznik miniaturních bublinek v místech, kde střídavý akustický tlak dosahuje záporných hodnot. Vlivem podtlaku tyto bublinky postupně expandují a při opačné polaritě se prudce smršťují a zanikají. Díky periodickému střídání akustického tlaku a podtlaku se narušují vazby mezi povrchem a nečistotami. [22]



Obr 24: Schéma ultrazvukové čističky

## 7.2 Výhody ultrazvukového čištění

Mezi hlavní výhody této metody patří kratší doba ve srovnání s jinou čistící metodou (pohybujeme se v řádu minut) a zároveň si zachovává vysokou kvalitu čištění i přes jednoduchost instalace i obsluhy. [22]

Tato metoda se využívá také na čištění otvorů v malých prostorech, slepých otvorů nebo tvarově složitých předmětů. Například při výrobě elektronických zařízení, ať už pro domácí nebo průmyslové zařízení. Velkou výhodou v těchto případech je, že při čištění nehrozí žádné mechanické poškození, čištění je rovnoměrné bez ohledu na složitost a geometrii čištěného předmětu. [22]

## 7.3 Využití ultrazvukového čištění

Ultrazvukové čištění má širokou škálu využití, ať už v lékařství, jako například sterilizace chirurgických nástrojů, nebo ve stomatologii. Další využití je ve zlatnictví a zámečnictví. [22]



Pro elektrotechniku je zásadní zejména využití ve výrobě elektronických zařízení, kdy se pomocí ultrazvukového čištění čistí desky před zalakováním.

## 8 Pájecí slitiny

Je jedním z nejpoužívanějších dělení pájek. Dělí se na pájky tající při nižších teplotách, tedy měkké pájky a pájky tající při vyšších teplotách, takzvané tvrdé pájky. Jako měkké pájky označujeme pájky s teplotou tavení do 400°C. Jako tvrdé pájky myslíme pájky s tavicí teplotou vyšší 400°C. [4]

### 8.1 Měkké pájky

Měkké pájky jsou slitiny takzvaných měkkých kovů s různým poměrem složek, díky kterým se dosahuje jejich požadovaných vlastností, především teploty tavení. Pro pájení elektroniky se dlouhodobě používala slitina s 37 % olova a 63 % cínu. Její teplota tání je 183 °C. Výhodou této slitiny je hlavně její schopnost tuhnutí bez přechodových fází, ve kterých v určitých slitinách v jistém rozmezí teplot vedle sebe existují jak pevná fáze tak i tekutá, což má někdy nežádoucí důsledky. Existuje řada dalších měkkých pájek s jinými kovy, jako je například kadmium nebo zinek, vhodných pro teploty až do 400 °C. Velkou skupinu tvoří tzv. cínové pájky s obsahem více složek jako je cín, olovo, antimon, nebo zinek, které pokrývají rozsah teplot od 185 do asi 260 °C. Takzvaná super měkká slitina Pb+Sn+Cd+Bi (olovo, cín, kadmium, bismut) je vhodná pro pájení s teplotou tání v mezích od 65 do 100 °C. [4]

V České republice platí pro měkké pájky norma: ČSN EN ISO 9453 Slitiny pro měkké pájení – chemické složení a tvary [4]

### 8.2 Tvrdé pájky

Jako tvrdé pájky obvykle označujeme materiály s teplotou tavení nad 400°C. Pro tvrdé pájení existuje velký výběr slitin a čistých kovů, a to jak pro pájení s tavidlem ve vakuu nebo také v redukční atmosféře. [4]

Čisté kovy se z různých důvodů používají jen výjimečně. Většinou jde o stříbro, měď, zlato nebo paladium. Jsou vhodné pro kapilární pájení ve vakuu. [4]

Existuje velký počet slitin různých kovů pro tvrdé pájení. Jde například o slitiny stříbra, mědi, kadmia, niklu a zinku v různých kombinacích. Většina obsahuje zinek, který má vysokou tenzi par a nemůže být proto použit pro pájení ve vakuu z důvodů prudkého odpařování. Používají se také slitiny drahých kovů, například Au (zlato)-Ag (stříbro), Au-Pd (olovo), Au-Cu (měď), Au-Ni (nikl). [4]

Zvláštní skupinu pájek tvoří takzvané aktivní pájky s malým obsahem titanu nebo vanadia, které se používají pro pájení kovů na keramiku nebo grafit. [4]

Zvláštní pájky a tavidla jsou nutná také pro pájení hliníku a jeho slitin. Používají se zde zejména zinkové pájky a složitější slitiny (Al, Cu, Sn, Cd). [4]

## 9 Dělení pájek podle materiálu

V následující kapitole se budu zabývat rozdělením pájení podle materiálu, konkrétně podle přítomnosti cínu. Toto dělení je aktuální zejména od roku 2006, kdy vešla v platnost direktiva Evropské unie známa jako RoHS.

### 9.1 Bezolovnaté pájky

Z důvodů nařízení Evropské unie známého Restriction of Hazardous Substances Directive 2002/95/EC (dále jen RoHS), což je směrnice Evropské unie, která vešla v platnost 1. července 2006, zakazující užití těchto látek při výrobě elektrických a elektronických zařízení: olovo, rtuť, kadmium, šestimocný chróm, polybromované bifenyly a polybromované dynelethery. Omezení se netýká zařízení s dlouhou životností u nichž lze předpokládat, že neskončí na skládce. [5]

Olovnaté pájky jsou po dlouhá desetiletí neodmyslitelnou součástí elektrotechnického průmyslu. Z výše uvedených důvodů bylo nutné nahradit olovnaté pájecí směsi pájkami bezolovnatými, jejichž vlastnosti se v mnoha ohledech liší. [7]

Z důvodů využívání nových materiálů rozmanitých chemických a fyzikálních vlastností, jsou na bezolovnaté pájky kladeny jisté požadavky. Jde zejména o dobrou, jak tepelnou, tak elektrickou, vodivost. Mezi nejdůležitější další parametry patří smáčivost a dostatečná mechanická pevnost. Další důležitý aspekt je teplota tání, která musí být dostatečně nízká, aby při procesu pájení nedošlo k poškození pájené konstrukce nebo součástek. Jako osvědčené se ukázaly slitiny 100Sn, 99Sn1Cu, 97Sn3Cu, 96.5Sn3.5Ag, 95Sn5Sb, 91Sn9Zn a 42Sn58Bi. Tyto jmenované sloučeniny mají vlastnosti srovnatelné s běžnými Sn-Pb pájkami. [7]

V převážné většině bezolovnaté pájky obsahují alespoň 60% cínu a zbytek je obvykle doplňován drahými kovy. Díky tomu jsou jejich ceny vyšší než u klasické olovnaté pájky. Cena bezolovnatých pájek je výrazně závislá na ceně použitých drahých kovů. [7]

Tabulka 1: Příklady používaných bezolovnatých pájek [7]

Pájka	Využití v průmyslu	Oblast tavení (°C)
Sn/Cu	Spotřebitelský/telekomunikační	227
Sn/Ag/Cu	Automobilový/telekomunikační	217
Sn/Ag/Bi/Cu	Vojenský/letecký	-

<b>Sn/Ag/Bi/Cu/Ge</b>	Spotřebitelský	-
<b>Sn/Ag/Bi/X</b>	Spotřebitelský	206-213
<b>Sn/Ag/Bi</b>	Vojenský/letecký/spotřebitelský	206-213
<b>Sn/Zn</b>	Spotřebitelský	199
<b>Sn/Bi</b>	-	138

V tabulce 1 jsou zmíněny příklady některých pájek běžně používaných v různých průmyslových oblastech.

Z důvodů použití jiných materiálů proces přetavení pájky probíhá v mnohem užším rozsahu teplot, je nutno, aby celý proces přenosu tepla pracoval mnohem efektivněji. Řada výrobců také doporučuje použití ochranné atmosféry, která nejen znemožňuje oxidaci spoje, ale také výrazně zlepšuje smáčivost a ve výsledku zvyšuje jakost celého spoje. [7]

Z důvodů vysoké teploty a obsahu kyslíku ve vzduchu dochází v peci k rychlejší oxidaci kovových povrchů než při normálních podmínkách. Běžně se k odstranění tohoto jevu používají tavidla. Ty však mohou negativně ovlivnit celkovou spolehlivost spoje a výrazně zkrátit jeho životnost. Z toho plyne snaha omezit, nebo dokonce vyloučit, použití tavidel při pájení a následné hledání možností, jak zabránit vzniku oxidů v pájeném spoji. Vzhledem k návaznosti vzniku oxidací na přítomnost kyslíku ve vzduchu, je logické, že jedna z cest jak zabránit jeho přístupu, je vytvoření ochranné atmosféry (například dusíku). [7]

Pro bezolovnaté pájení jsou konstruovány speciální pece, typicky s vícesektorovou přetavovací zónou, a zároveň s kratší délkou jednotlivých zón, což přináší mnohem lepší kontrolu celého procesu. Moderní pece mají obvykle přehřívací zónu, několik přetavovacích zón a nakonec jednu chladicí zónu. Délka těchto pecí je obvykle mezi 350 cm až 400 cm. [7]

## 9.2 Olovnaté pájky

Olovnaté pájky byly ještě donedávna suverénně nejrozšířenějším materiálem pro měkké pájení. Nejrozšířenějším materiálem pro vytváření elektrických spojů na osazených deskách byla slitina Sn/Pb.

Olovnaté pájky vytvářejí velmi kvalitní spoje bez zjevných chyb.

# Praktická část

## 10 Úvod

V praktické části se budu zabývat pájenými spoji, konkrétně jejich mechanickými vlastnostmi a nakonec jejich strukturou.

V první části se budu zabývat mechanickými vlastnostmi, konkrétně pevností v tahu. Tu je třeba prakticky otestovat na skupině vzorků s různými povrchovými úpravami, pro jejichž přípravu byly použity různé pájecí technologie, různé typy pájek a jejich kombinace s pájecími pastami. Výsledky je poté nutno porovnat a pokusit se odůvodnit naměřené hodnoty pro jednotlivé vzorky.

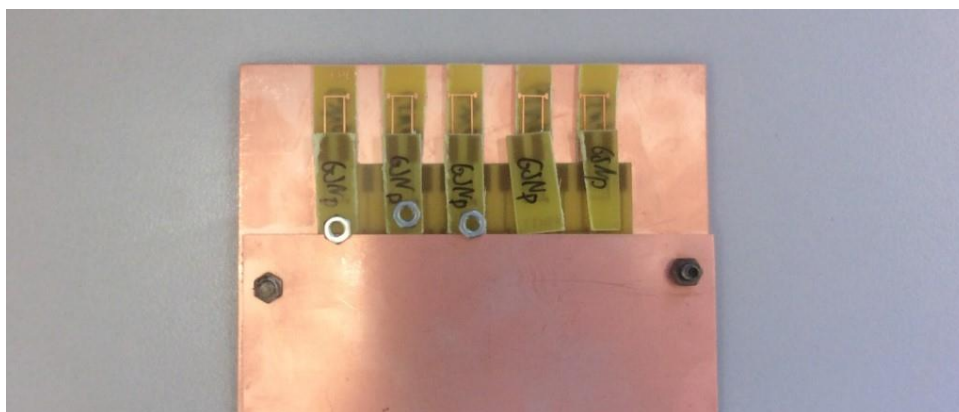
V druhé části se zabývám strukturou pájených spojů a budu se jí snažit prozkoumat pro vybrané vzorky a tím i částečně odpovědět i na otázky vzniklé první částí.

## 11 Porovnání mechanických vlastností pájených spojů

V této části budu porovnávat mechanické vlastnosti (konkrétně sílu v tahu) různých kombinací pájek, pájecích past, metod pájení a povrchových úprav.

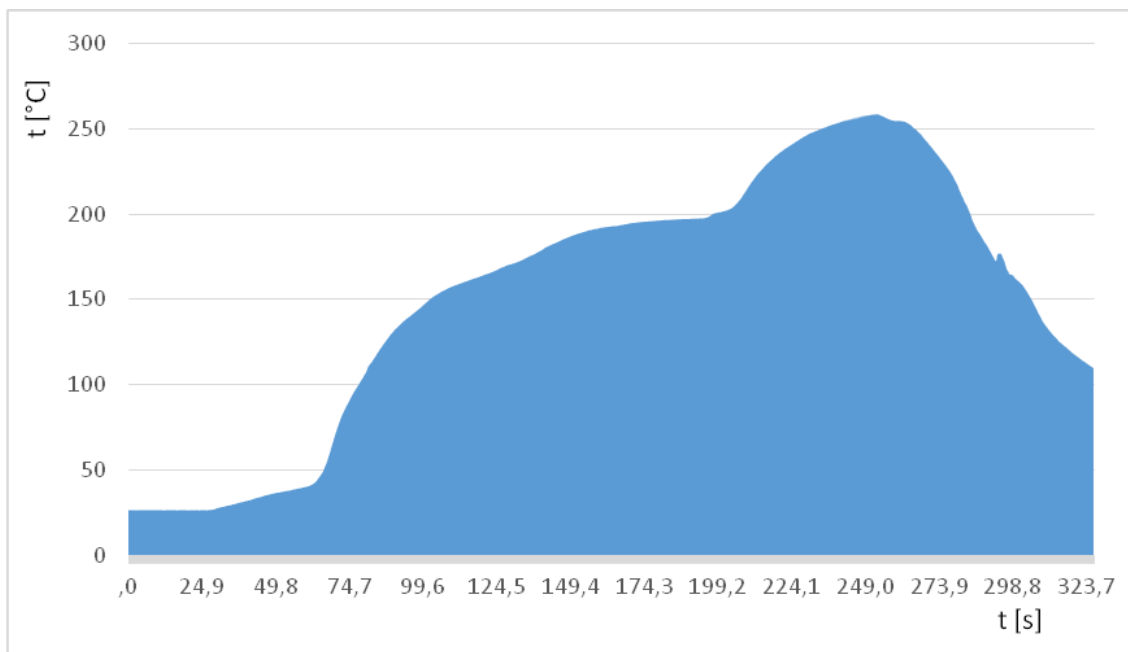
### 11.1 Výroba vzorků

V této části jsem měl za úkol otestovat sílu v tahu u několika vzorků pájených spojů. Pájení bylo provedeno u nastříhaných kusů DPS s několika povrchovými úpravami, u kterých byly buďto ručně pocínované pájecí plošky nebo byla mezi spojované pájecí plošky nanесena pájecí pasta.



Obr. 25: Vzorky připravené na přetavení

Následně byly na sebe DPS položeny a vloženy do přípravku a přepájeny přetavením v průběžné třízónové peci s teplotami 190°C – 210°C – 265°C. Tyto teploty byly zvoleny z důvodů dobrého prohřátí DPS spolu s přípravkem, který pájené vzorky DPS udržoval v rovnovážné poloze – viz obrázek 8. Teplotní profil použité pece je zobrazen na obrázku 9.



Obr. 26: Teplotní profil průběžné pece

## 11.2 Použité slitiny a páječky

Pro testování jsme použili několik různých kombinací pájecích slitin a pájecích zařízení. Zadání operuje s použitím ultrazvukové a běžné ruční páječky, byla tudíž použita ultrazvuková páječka (obr. 10) v kombinaci se speciální, pro ni vyrobenou takzvanou „Aktivní slitinou“. Tuto slitinu jsme měli jak ve variantě bezolovnaté, tak ve speciální variantě olovnaté. Aktivní pájka se od klasické bezolovnaté pájky liší příměsí vzácných prvků jako třeba vanadium nebo cerium a silně reaktivních prvků jako titan. Tyto prvky se starají o tvorbu oxidů na přechodu mezi pájkou a pájeným materiálem.

Pro měděnou povrchovou úpravu jsme experiment provedli s kombinacemi ultrazvukových pájek, klasické pájecí pasty SAC 305 a bezolovnaté pájky SAC 305. Pro zbylé dvě povrchové úpravy (HAL a ENIG) jsme pouze mechanicky testovali spoje spojené buďto ultrazvukovou olovnatou, bezolovnatou nebo klasickou bezolovnatou pájkou (Sn93Ag6,5Cu0,5). Tato

bezolovnatá pájka má teplotu tání kolem 220°C a běžně se používá v automobilovém a telekomunikačním průmyslu. Je vhodná pro pájení vlnou a ruční pájení. [7]

Pájecí pastu jsem nanášel přes šablonu. K tomuto kroku jsem se rozhodl z důvodu problému s dávkováním pasty, kde jsem nebyl schopen dosáhnout stejných množství jako v případě s klasickou pájkou. Hodnoty pájených spojů s pastou jsou tedy pouze k znázornění vlivu pasty na vybranou pájku.



Obr 27: Ultrazvuková páječka

V tabulce 2 jsou pak uvedené jednotlivé úpravy (nanesení pájecí pasty nebo pocínování pájecí slitinou) pájecích plošek u jedné DPS (značeno DPS-A), u druhé DPS (značeno DPS-B) a povrchovou úpravu než došlo ke vzájemnému spojení pájecích plošek těchto DPS zapájením v průběžné peci.

Tabulka 2: Seznam použitých kombinací pájek, past a povrchových úprav

<b>Seznam použitých kombinací pájecích slitin</b>		
<b>Pájecí ploška DPS-A</b>	<b>Pájecí ploška DPS-B</b>	<b>Povrchová úprava DPS-A/DPS-B</b>
Sn93Ag6,5Cu0,5	Sn93Ag6,5Cu0,5	Cu/Cu
Sn93Ag6,5Cu0,5	pasta	Cu/Cu
Bezolovnatá aktivní slitina s	Aktivní slitina s	Cu/Cu

ultrazvukem	ultrazvukem	
Bezolovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	pasta	Cu/Cu
Bezolovnatá aktivní slitina bez ultrazvuku	Aktivní slitina bez ultrazvuku	Cu/Cu
Bezolovnatá aktivní slitina bez ultrazvuku	pasta	Cu/Cu
Bezolovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	Bezolovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	HAL/HAL
Olovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	Olovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	HAL/HAL
Sn93Ag6,5Cu0,5	Sn93Ag6,5Cu0,5	HAL/HAL
Bezolovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	Bezolovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	ENIG/ENIG
Olovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	Olovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	ENIG/ENIG
Sn93Ag6,5Cu0,5	Sn93Ag6,5Cu0,5	ENIG/ENIG

### 11.3 Testování a výsledky testování

Námi zvolená mechanická vlastnost, kterou jsme se rozhodli testovat, byla pevnost v tahu. Po vytvoření dostatečného množství podařených vzorků (6-5 pro každou z kombinací z tabulky 2), bylo nutno tyto vzorky otestovat. Testování probíhalo na trhačce v laboratoři T2:G1-122b (viz. Obr 28) a také na nové trhačce v laboratoři T2:G1-124 (viz. Obr 29)





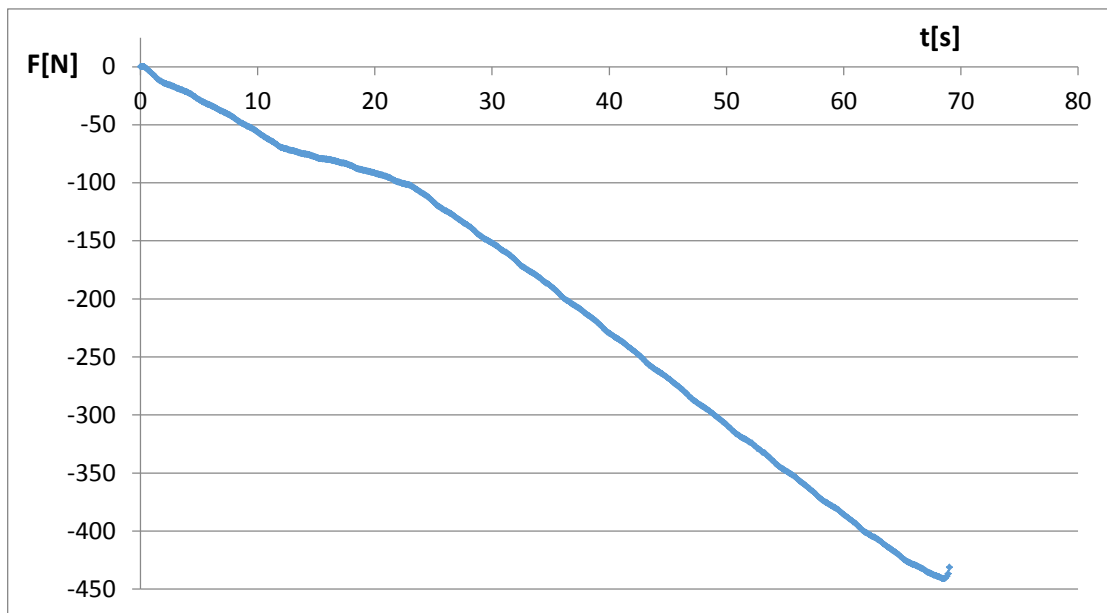
*Obr 28: Trhačka*

V laboratoři 122b jsem do trhačky postupně vkládal jednotlivé vzorky, utáhnul a provedl zkoušku tahem. Zkoušku jsem prováděl na rozsahu 0N – 500N. Zkoušku jsem provedl na všech vytvořených vzorcích a výsledky zadal do tabulky (v přílohách). Naměřené hodnoty jsem potom pro jednotlivé typy vzorků zprůměřňoval. Pro každý typ vzorku jsem provedl alespoň pět pokusů.



*Obr. 29: Trhačka*

V laboratoři 124 probíhalo testování lehce odlišně, vzorky se vkládaly do trhačky dost podobně, ale tah trhačka vykonala automaticky (s rozsahem 1000N) včetně záznamu časové závislosti síly. Hodnoty jsem poté exportoval do textového souboru a vyhodnotil. Příklad údajů z této trhačky je na obr 32.



Obr. 30: Průběh trhání vzorku s SAC305 na ENIG povrchové úpravě

Na grafu v obr. 30 můžeme pozorovat výstupy z trhačky. Bohužel, přístroj nám není schopen určit konkrétní hodnotu síly nutnou k roztržení spoje, proto ji musíme odečíst jako rozdíl nejvyšší a nejnižší hodnoty celého průběhu.

## 11.4 Zhodnocení experimentu

V tabulkách 3,4 a 5 jsou zobrazeny průměrné hodnoty pro jednotlivé typy vzorků. Nutno vzít v úvahu, že při vzájemném porovnávání od sebe je zapotřebí oddělit vzorky kde byla a kde nebyla použita pájecí pasta. Za účelem nanesení stejného množství pájecí pasty byl použit dávkovač. Díky použití šablony bylo použito jiné množství pájecí pasty v porovnání s pocínovanými pájecími ploškami pájkou. Velkým problémem bylo „hrudkovatění“ u spojů vytvořených za pomoci ultrazvukové páječky, to pravděpodobně výrazně ovlivnilo výsledky u spojů zhotovených na povrchové úpravě HALu a ENIG, které byly vytvořeny o přibližně 2 roky později. Na tyto otázky se bude snažit odpovědět kapitola zabývající se strukturou těchto pájených spojů.

Tabulka 3: Hodnoty síly v tahu pro měděnou povrchovou úpravu

Povrchová úprava pájecích plošek - Měď								
Seznam použitých kombinací pájecích slitin		Síla v tahu (N)						Průměrná síla v tahu (N)
Slitina na DPS-A	Slitina na DPS-B							
Sn93Ag6,5Cu0,5	Sn93Ag6,5Cu0,5	150	200	180	170	150	130	163,33
Sn93Ag6,5Cu0,5	pasta	100	135	95	160	220	195	150,83
Bezolovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	Bezolovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	300	270	200	235	400	300	284,16
Bezolovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	pasta	40	50	40	30	40	50	41,66
Bezolovnatá aktivní slitina bez ultrazvuku	Bezolovnatá aktivní slitina bez ultrazvuku	80	75	180	150	110	120	119,16
Bezolovnatá aktivní slitina bez ultrazvuku	pasta	210	220	200	120	240	190	196,66
Olovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	Olovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	20	12	25	120	25	-	40,4

Tabulka 4: Hodnoty síly v tahu pro zlatou povrchovou úpravu

Povrchová úprava pájecích plošek – ENIG								
Seznam použitých kombinací pájecích slitin		Síla v tahu (N)						Průměrná síla v tahu (N)
Slitina A	Slitina B							
Sn93Ag6,5Cu0,5	Sn93Ag6,5Cu0,5	500	310	450	500	610	550	486,67
Olovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	Olovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	15	20	40	25	20	-	24
Bezolovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	Bezolovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	60	45	100	40	25	-	54

Tabulka 5: Hodnoty síly v tahu pro povrchovou úpravu s HALem

Povrchová úprava pájecích plošek – HAL								
Seznam použitých kombinací pájecích slitin		Síla v tahu (N)						Průměrná síla v tahu (N)
Slitina A	Slitina B							
Sn93Ag6,5Cu0,5	Sn93Ag6,5Cu0,5	420	330	850	500	580	190	478,3
Olovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	Olovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	10	15	80	55	40	-	40
Bezolovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	Bezolovnatá aktivní slitina s ultrazvukem	115	55	40	85	70	-	73

Když se podíváme na výsledky, tak můžeme vidět určité trendy. Jedním z nich jsou rozdíly v síle v tahu u spojů vytvořených před 2 roky a teď. Tam na odlišných povrchových úpravách, můžeme pozorovat nepoměr mezi výsledky ultrazvukových pájecích slitin a klasické bezolovnaté pájky.

Bez rozdílu materiálů dosáhla nejhoršího výsledku olovnatá ultrazvuková pájka. Bohužel vzhledem k tomu, že její složení je tajeno výrobcem, v této fázi se můžeme pouze dohadovat,

čím to bylo způsobeno. Je určitě zajímavým jevem, že u mědi bezolovnatá aktivní slitina bez použití ultrazvuku dosáhla více než 3 násobného průměrného výsledku.

Co se týče kombinací pájek a past u měděné povrchové úpravy, tam můžeme pozorovat, že u bezolovnaté aktivní slitiny bez ultrazvuku se v kombinaci s pastou dosáhlo výrazně lepšího výsledku než u varianty s napájenými oběma stranami i přes fakt, že pájecí pasty bylo nanášeno výrazně méně, než pájky jako takové. Tento fakt je způsoben pravděpodobně složením aktivní slitiny, které není vhodné na použití bez aplikace ultrazvuku.

Zajímavým jevem v případě bezolovnaté aktivní pájky je celkem široký rozptyl hodnot. Ten je pravděpodobně způsobem problematičností naší zvolené metody, kdy (jak bude podrobně viděno v další kapitole) vznikaly nerovnosti, prázdné bublinky a podobné jevy. Tyto jevy bych zejména přičítal metodě, kdy při spojování obou destiček do testovacího vzorku již nebyl na zapájení použit ultrazvuk, a tudíž přepájení obou částí vzorku k sobě nebylo dokonalé

Nedokonalé zapájení se projevuje u výsledků klasické bezolovnaté pájky u povrchové úpravy ENIG a HAL. Tam dosáhla několikanásobně lepších výsledků, než aktivní slitiny, což vzhledem k pájecí metodě není překvapující. Překvapující ale je výsledek bezolovnaté pájky na měděné povrchové úpravě, kde dosáhla výrazně horších výsledků než na zbylých dvou povrchových úpravách. To může být způsobeno jinou metodou trhání, kde na rozdíl od počítačem řízené trhačky, nebyl rovnoměrný nárůst trhací síly v čase.

## 10 Porovnání vnitřní struktury pájených spojů

V této části diplomové práce se budu zabývat vnitřní strukturou pájených spojů vytvořených různými kombinacemi použitých pájek, pájecích past, tavidel, povrchových úprav a způsobem zapájení. Struktura bude prozkoumávána jak na fotkách výbrusů, tak pomocí materiálové analýzy za použití elektronového mikroskopu. Na jednotlivé vzorky byly použity výše uvedené kombinace, které částečně vycházejí z předchozího experimentu.

### 10.1 Výroba vzorků

Vzorky bylo nutno vyrobit pro všechny kombinace pájek použitých v minulém experimentu. Jelikož ale nebylo potřeba dodržovat stejné množství, byly použity DPS se třemi povrchovými úpravami: měď, ENIG a HAL.

Tyto povrchové úpravy byly pocínovány, popř. na ně byla nanesena bezolovnatá pájecí pasta. Připravené vzorky byly poté zapájeny v třízónové průběžné peci (obr. 31), při stejném nastavení pece jako tomu bylo u vzorků v předešlém experimentu. Teplotní profil pece pro toto nastavení je vidět na obrázku 26.

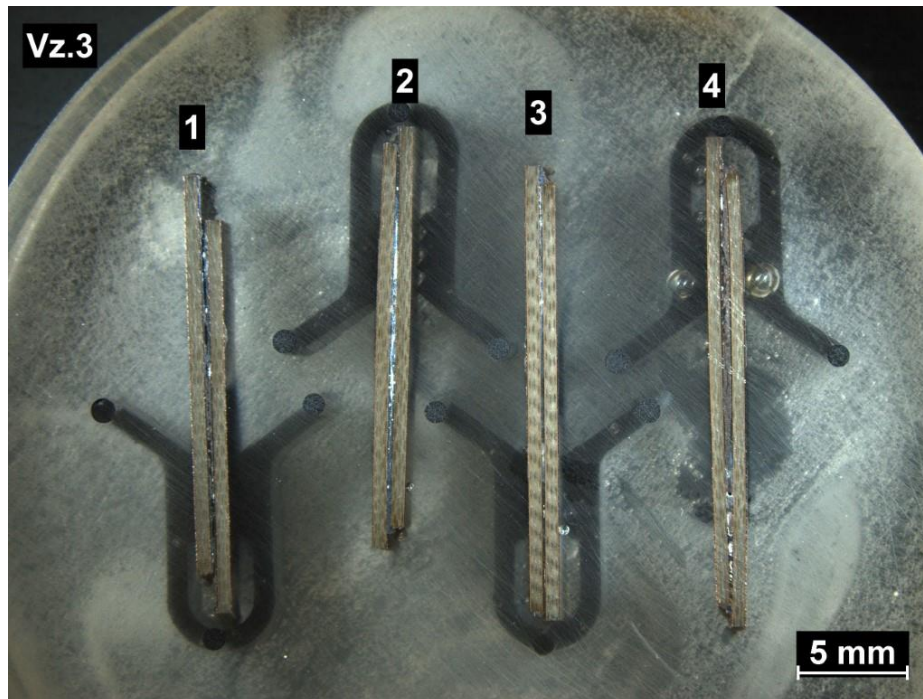


*Obr. 31: Průběžná pec*

Po vytvoření dostatečného počtu vzorků pro všechny kombinace pájek, bylo nutno vzorky označit a poslat na vytvoření výbrusů. Část vzorků byla poté nafocena pod mikroskopem. Jak hotové vzorky vypadají je vidět na obrázku č. 32. Zbylá část vzorků byla analyzována na elektronovém mikroskopu.

Co se týče fotografií z optického mikroskopu, tak vzhledem k velkému množství fotografií pro jednotlivé vzorky, jsem se rozhodl použít v této práci pouze vzorky s největším zvětšením a

pokud možno co nejmenším počtem různých chyb a vad spoje jako takového. U fotografií z elektronového mikroskopu jsem použil pouze ty, u kterých byla provedena materiálová analýza. Zde jsem z prostorových a znalostních zvolil pouze analýzu napříč vzorkem a nikoliv analýzu v jednotlivých bodech.



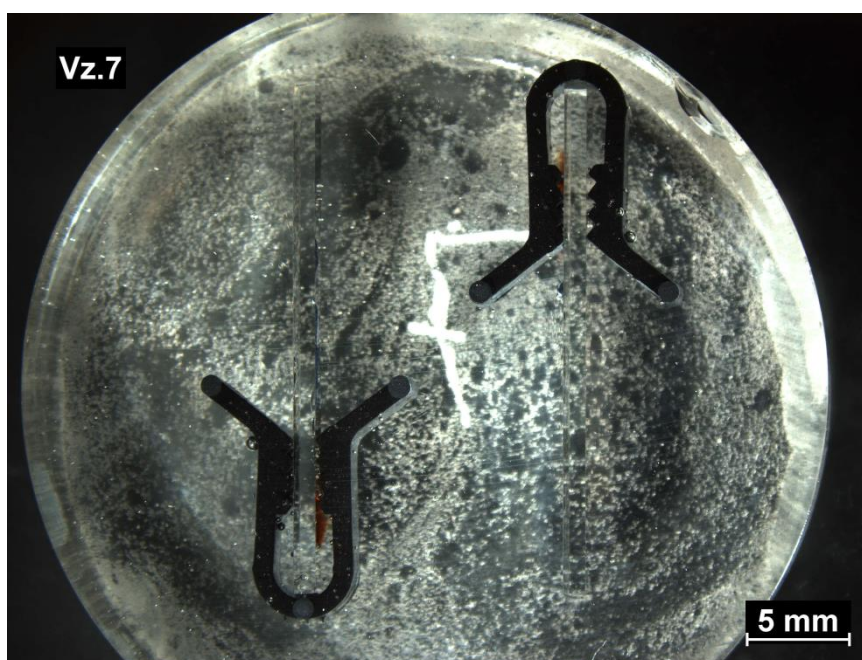
*Obr. 32: Výbrus ze vzorku na měděném substrátu*

## 11 Vyhodnocení vzorků

V této části se pokusím podrobněji popsat jednotlivou strukturu konkrétních pájených spojů vyhotovených vzorků. Strukturu se pokusím prozkoumat pomocí fotografií výbrusů nebo pomocí fotografií a materiálové analýzy vytvořené za pomoci elektronového mikroskopu.

### 11.1 Podklad: Sklo

V této kapitole se zaměřím na velmi specifický případ, kterým je pájení na sklo. V tomto případě budeme pouze prozkoumávat fotografie pořízené optickým mikroskopem.

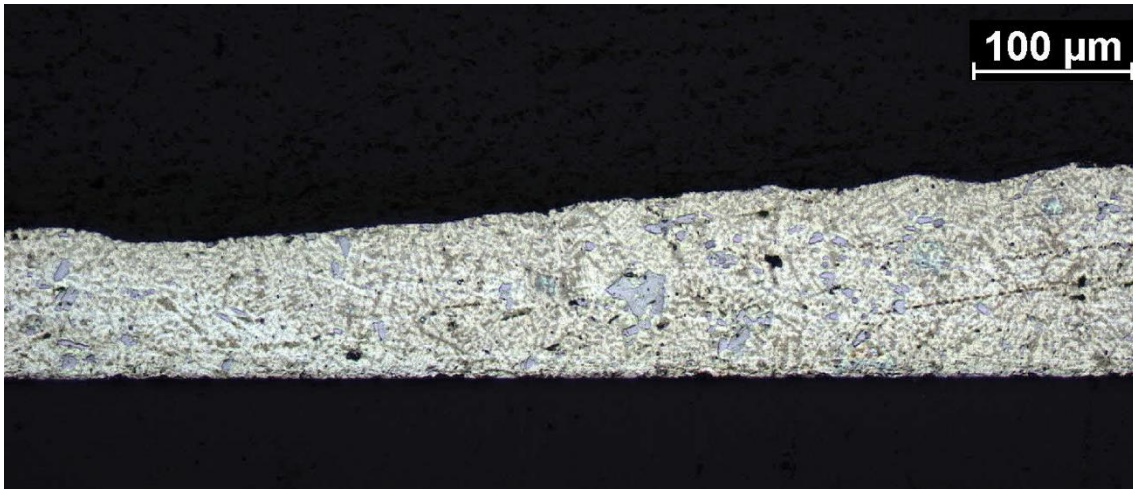


*Obr. 33: Výbrus ze vzorku na skle*

#### 11.1.1 Aktivní pájecí olovnatá slitina na sklo

Níže, na obr. 35, můžeme pozorovat strukturu pájeného spoje vytvořeného olovnatou aktivní pájkou. Bohužel, pájení na sklo by šlo už ze své podstaty mechanicky otestovat pouze velice obtížně.

Na výbrusu můžeme pozorovat neexistenci intermetalické vrstvy, což je pro pájení netypické, ale v tomto případě nepřekvapující. O vazbu na skleněný podklad se starají aktivní prvky, které jsou pro tyto pájky specifické. Bohužel, vzhledem k tomu, že jejich složení výrobci neuvádějí a nepodařilo se nám je ani zjistit při analýze elektronovým mikroskopem, nejsme se zcela jisti, o jaké prvky se jedná.



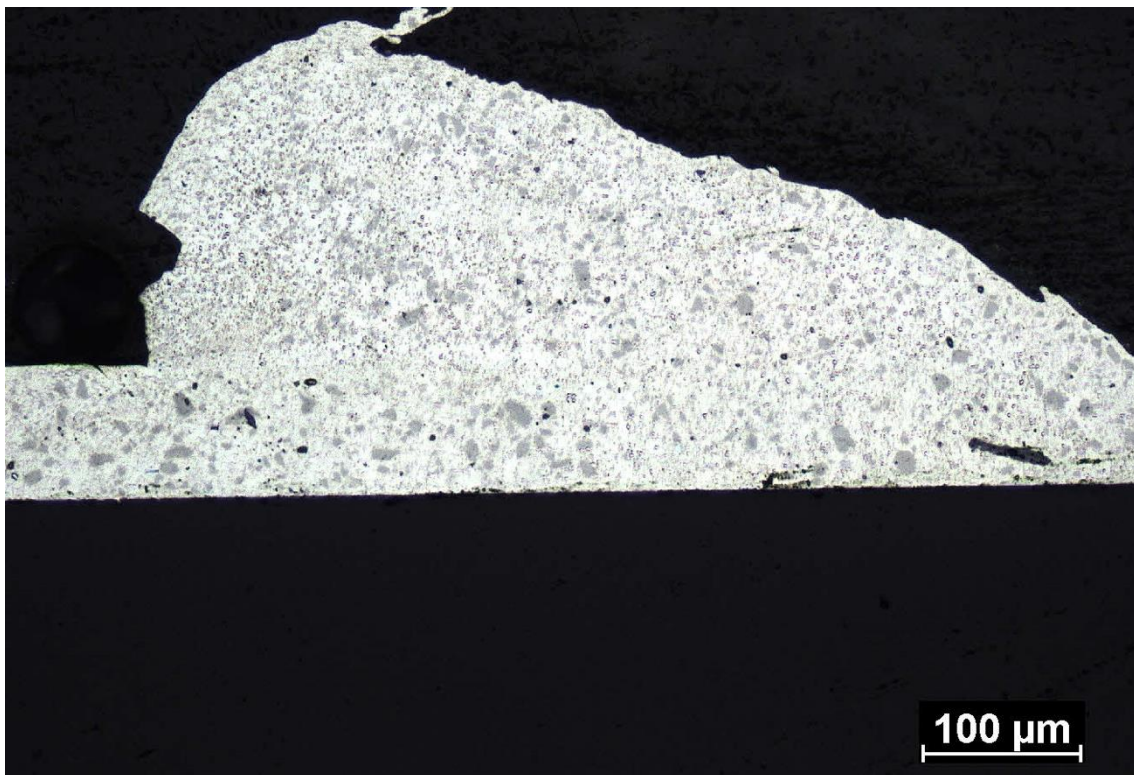
*Obr. 34: Výbrus pájeného spoje s aktivní pájecí olovnatou slitinou na skle*



### 11.1.2 Aktivní pájecí bezolovnatá slitina na sklo

Níže, na obr. 36, můžeme pozorovat strukturu pájeného spoje vytvořeného bezolovnatou aktivní pájkou. Stejně, jako v minulém případě, pájení na sklo jde mechanicky otestovat pouze velice těžko.

Na výbrusu opět můžeme pozorovat neexistenci intermetalické vrstvy. Zde je situace se složením stejná jako u olovnaté pájky. Když se podíváme na strukturu vizuálně, je na první pohled velice odlišná. Čím je toto způsobeno, se pokusím odhalit u vzorků zkoumaných elektronovým mikroskopem.



*Obr. 35: Výbrus pájeného spoje s aktivní pájecí bezolovnatou slitinou na skle*

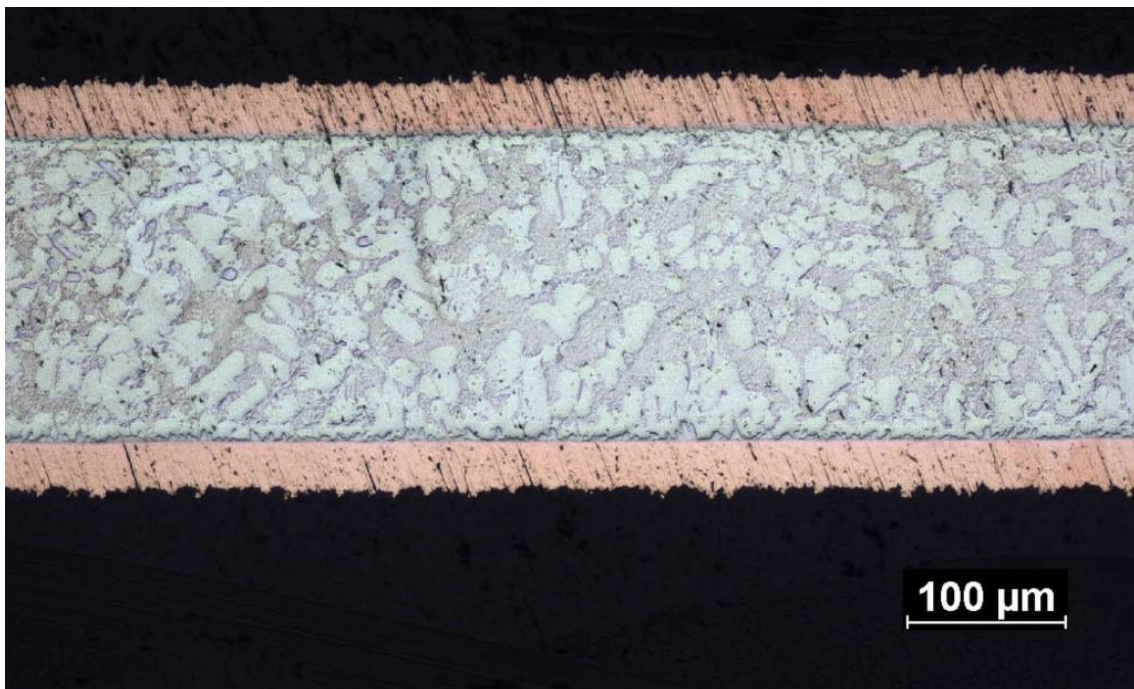
## 11.2 Podklad: Měď

V této kapitole se budu věnovat vzorkům napájeným na měděný podklad. Ve většině případů se bude jednat o rozbor na základě fotografií z mikroskopu, ale v případě spojů vytvořených za pomoci olovnaté aktivní slitiny máme k dispozici i materiálovou analýzu, na které se zkusíme alespoň částečně dobrat složení aktivní pájecí slitiny.

### 11.2.1 Sn93Ag6,5Cu0,5 + Sn93Ag6,5Cu0,5

Níže, na obr. TBA, můžeme pozorovat strukturu pájeného spoje vytvořeného pájkou Sn93Ag6,5Cu0,5 z obou stran pájeného spoje.

Na výbrusu můžeme pozorovat vrstvu intermetalik na rozhraní pájka – materiál. Intermetalická vrstva poměrně výrazně ovlivňuje pevnost pájeného spoje. V tomto případě je tato vrstva srovnatelná s vrstvou u spoje pájeného pomocí Sn93Ag6,5Cu0,5 a bezolvnaté pájecí pasty, což by vysvětlovalo jejich srovnatelný výsledek v testu.



Obr. 36: Výbrus pájeného spoje s Sn93Ag6,5Cu0,5

### 11.2.2 Sn93Ag6,5Cu0,5 + bezolovnatá pájecí pasta

Na obrázku číslo 16 je zobrazena fotografie výbrusu pájeného spoje vytvořeného pomocí pájky Sn93Ag6,5Cu0,5 a bezolovnaté pájecí pasty.

Jako u výše uvedeného spoje, který byl vytvořen pouze pomocí pájecí slitiny Sn93Ag6,5Cu0,5, lze pozorovat intermetalickou vrstvu na rozhraní pájky a mědi. Vizuálně tato vrstva působí jako srovnatelná, možná o něco větší, než u spoje vytvořeného pouze pomocí Sn93Ag6,5Cu0,5. To by vysvětlovalo výsledek v testu, kdy tato kombinace slitin dosáhla na této povrchové úpravě v mechanickém testování pouze o několik jednotek newtona nižšího výsledku, ačkoliv bylo použito méně pájecí pasty, než pájky z důvodů dávkování.



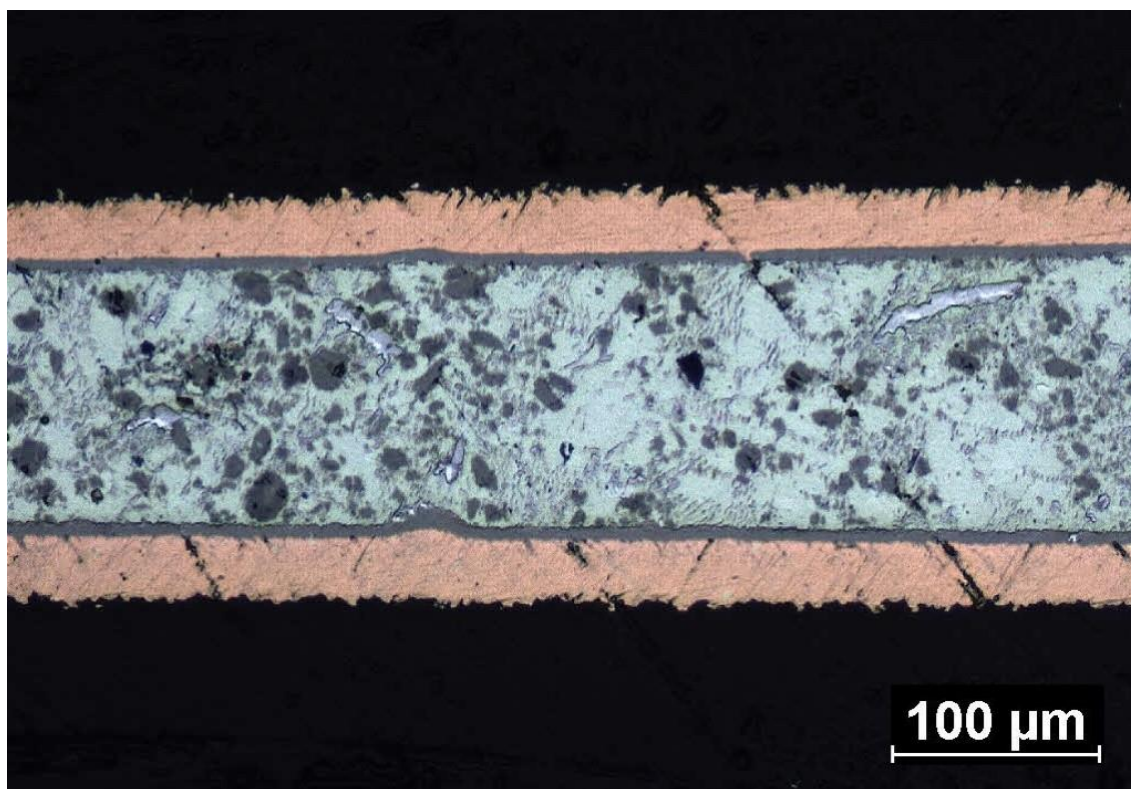
Obr. 37: Výbrus pájeného spoje s Sn93Ag6,5Cu0,5 a bezolovnatou pastou

### 11.2.3 Bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku

Nejzajímavější je zřejmě níže uvedený výbrus pájeného spoje s aktivní slitinou pod působením ultrazvuku. Jedním z důvodů jeho zajímavosti je skutečnost, že naprosto neznáme jeho složení, jenž si výrobce přísně chrání. Na obrázku číslo 38 můžeme také pozorovat poměrně vysokou koncentraci skvrn stejného odstínu jako na přechodu. Vzhledem k tomu, že na výbrusu u nezaktivované slitiny téměř nejsou, předpokládám, že vznikly díky aktivaci vzácných prvků v pájce.

Dalším zajímavým fenoménem, který můžeme pozorovat, je občasný výskyt různých krystalů. Ten, vzhledem k neznalosti složení této pájecí slitiny, bohužel můžeme vysvětlit jen s velkými obtížemi.

Nejzajímavějším faktem ale je velice silná intermetalická vrstva na přechodu pájecí slitiny – měď. V případě ultrazvukového pájení vzniká tato vrstva navázáním oxidů zaktivovaných vzácných prvků na ultrazvukem deoxidovaný povrch pájeného materiálu. Tato vrstva je ale výrazně větší než u spoje vytvořeného pomocí běžné pájky.

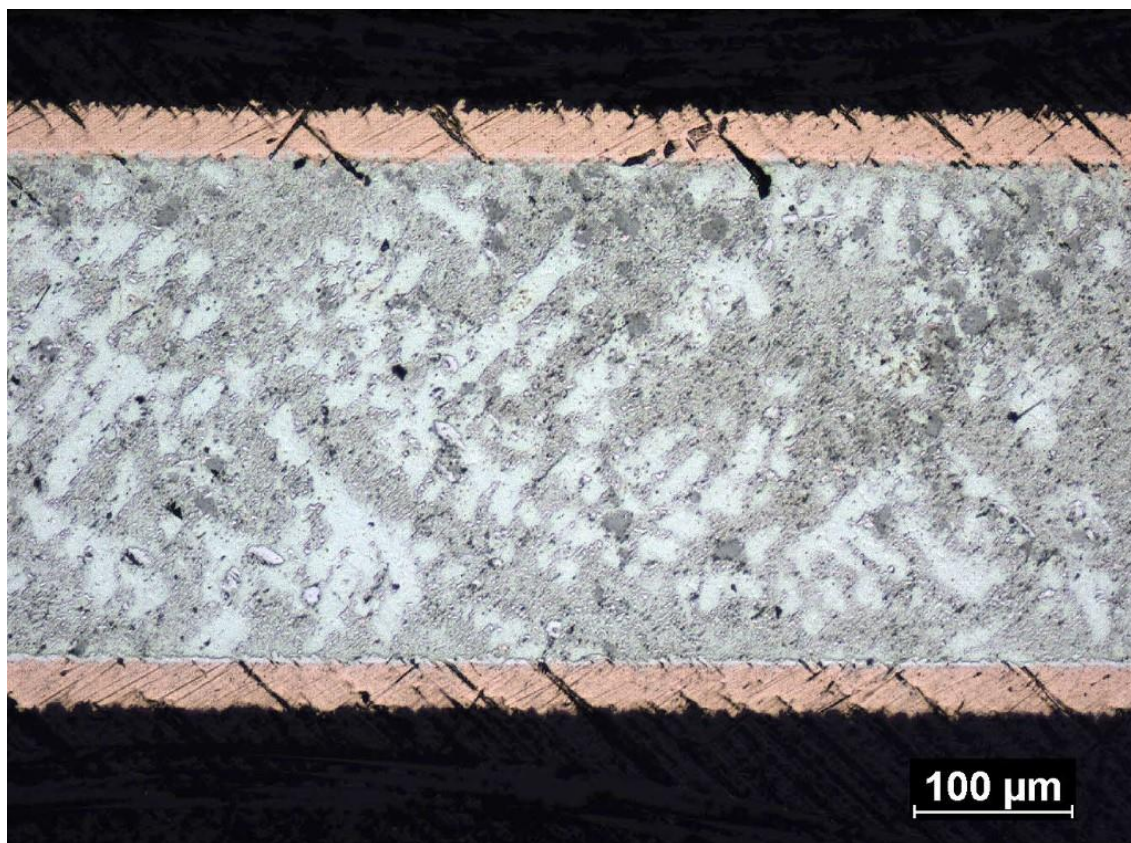


Obr. 38: Výbrus pájeného spoje s aktivní slitinou s ultrazvukem

#### 11.2.4 Bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + bezolovnatá pájecí pasta

Na výbrusu můžeme pozorovat také několik skvrn zaktivovaných vzácných prvků, ale ve výrazně nižší koncentraci než u spoje pouze se zaktivovanou slitinou. Dále lze pozorovat, že struktura se podobá spíše spojům vytvořených pomocí Sn93Ag6,5Cu0,5, případně pomocí Sn93Ag6,5Cu0,5 a bezolovnaté pájecí pasty.

Dále můžeme pozorovat nejmenší vrstvu intermetalik na rozhraní pájený materiál – pájecí slitina. Absence silnější vrstvy jde vysvětlit tím, že valná většina vazeb oxidů vzácných prvků a vyčištěné vrstvy je zničena aplikací bezolovnaté pájecí pasty, která obsahuje tavidlo, jež právě tyto vazby ničí. Z toho důvodu se pájecí pasty a tavidla při ultrazvukovém pájení nepoužívají.



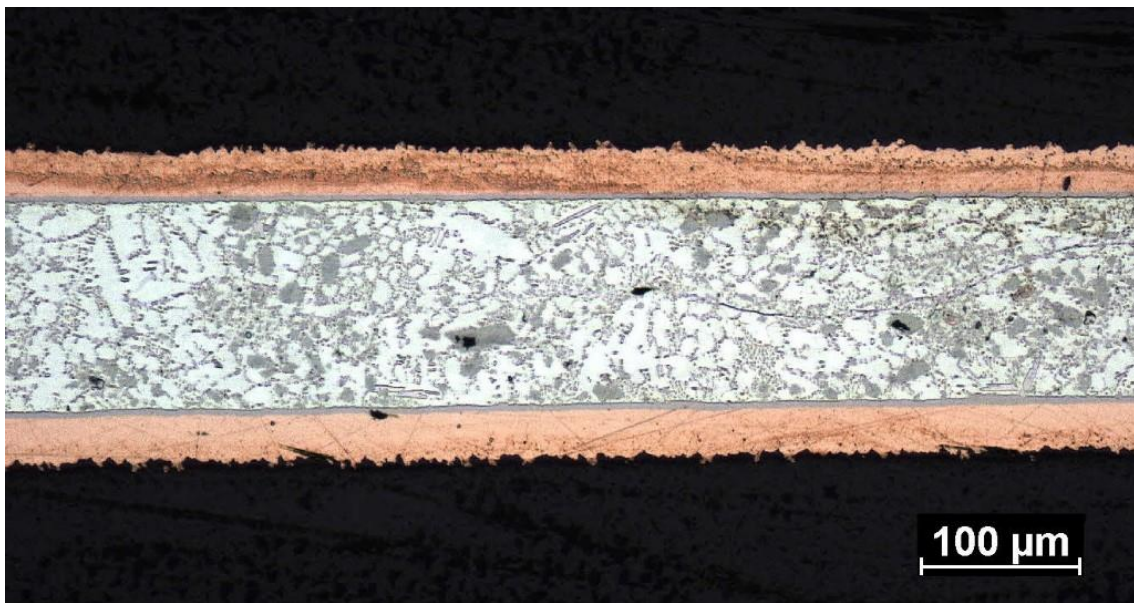
Obr. 39: Výbrus pájeného spoje s aktivní slitinou s ultrazvukem a bezolovnatou pastou

### 11.2.5 Bezolovnatá aktivní pájecí slitina bez použití ultrazvuku + bezolovnatá aktivní pájecí slitina bez použití ultrazvuku

V tomto případě se zaměříme na spoj vytvořený za pomoci aktivní bezolovnaté pájecí slitiny, ale bez použití ultrazvuku. Z obrázku můžeme pozorovat pravděpodobně nejzajímavější strukturu. Můžeme zde pozorovat jak skvrny, pravděpodobně obsahující různé vzácné prvky, tak poměrně velké plochy čiré látky.

Když toto porovnáme s výbrusem u zaktivované sloučeniny, dojdeme k výsledku, že při použití ultrazvuku dojde nejen k zničení oxidů na povrchu pájeného materiálu a vytvoření oxidů vzácných prvků na přechodu mezi pájkou a podkladovým materiálem a vytvořením vrstvy intermetalik, ale také dojde k reakcím uvnitř pájky samotné.

Na obrázku 40 můžeme pozorovat vytvoření mírné vrstvy intermetalik na přechodu mezi pájkou a materiálem. Tato vrstva vznikla spíše díky obecným vlastnostem pájky, než díky jejím specifikám, kvůli kterým se používá v ultrazukovém pájení.

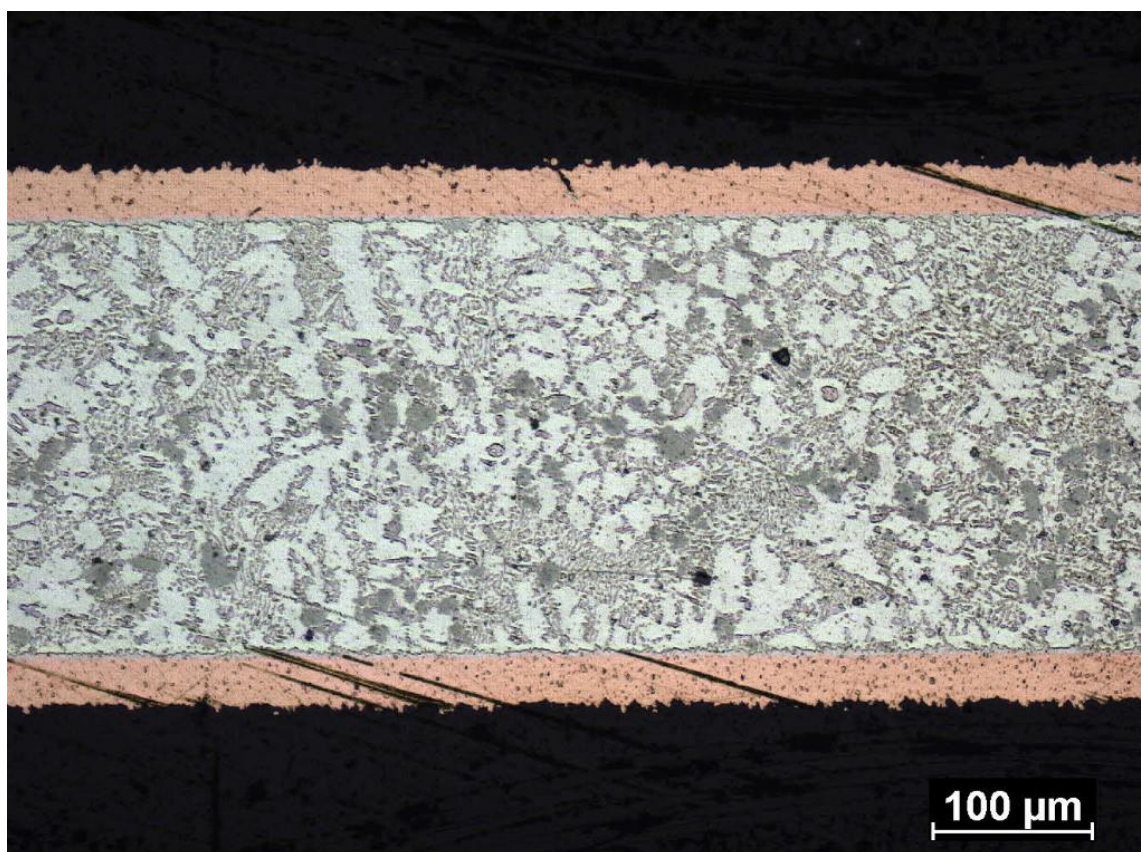


Obr. 40: Výbrus pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou bez ultrazvuku

### 11.2.6 Bezolovnatá aktivní pájecí slitina bez použití ultrazvuku + bezolovnatá pájecí pasta

Na výbrusu lze pozorovat šedé skvrny, pravděpodobně se vzácnými prvky, v koncentraci srovnatelné se spojem vytvořeným pouze pomocí aktivní sloučeniny bez ultrazvuku. Vizuálně struktura není nepodobná struktuře pájeného spoje vytvořeného pomocí Sn93Ag6,5Cu0,5, spíše možná spoje vytvořeného pomocí Sn93Ag6,5Cu0,5 a bezolovnaté pájecí pasty.

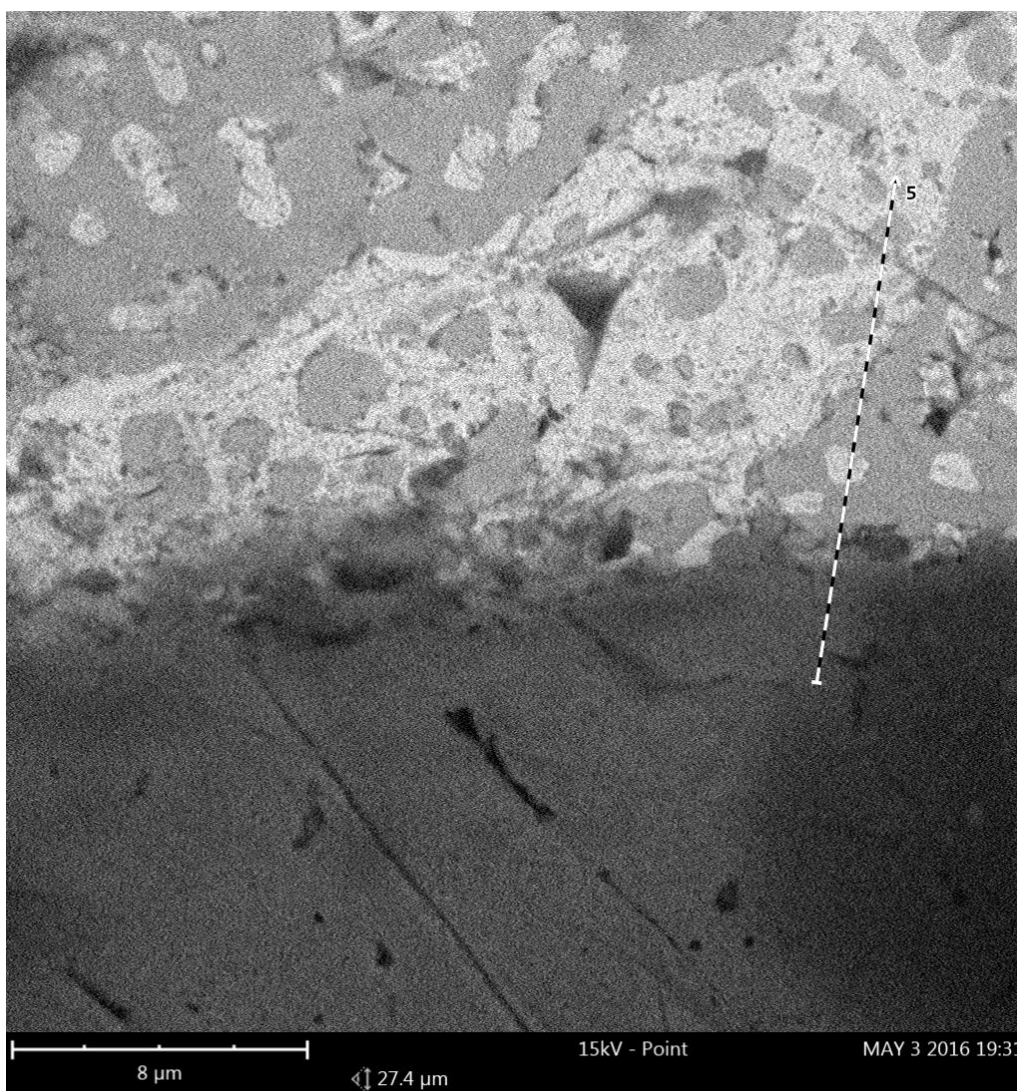
Intermetalická vrstva je srovnatelná s vrstvou u spoje s Sn93Ag6,5Cu0,5, a její vytvoření je z velké části záležitostí aplikace bezolovnaté pájecí pasty, která je pravděpodobně důvodem pro tak vysokou pevnost v tahu ve srovnání se spojem vytvořeným pouze pomocí neaktivované aktivní pájecí slitiny.



Obr. 41: Výbrus pájeného spoje s aktivní slitinou bez ultrazvuku a bezolovnatou pastou

### 11.2.7 Olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + bezolovnatá pájecí pasta

Na tomto výbrusu lze pozorovat tmavší plochy, které by při pohledu na tabulku 6 mohly být z olova a světlejší plochy by naopak mohly být z cínu. To usuzuji z toho, že tyto dva prvky mají z anorganických materiálů největší koncentraci v naší analýze. Pokud se dále budeme věnovat vizuálnímu zhodnocení, zajímavým jevem je rozdělení na 3 oblasti, z nichž ve dvou převládají tmavší plochy na úkor světlých, a v té druhé je to přesně naopak. To může být způsobeno tím, že byly použity dvě pájecí slitiny, které zůstaly svým způsobem separované.



Obr. 42: Výbrus pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pájecí pastou

V naší analýze, kterou můžeme pozorovat v tabulce x, dosáhl největší koncentrace kyslík a uhlík. Tyto dvě látky jsou organické a v pájeném spoji by být neměly. Jejich existence v této analýze je pravděpodobně způsobena nečistotami ať už při pájení nebo při přípravě vzorku.



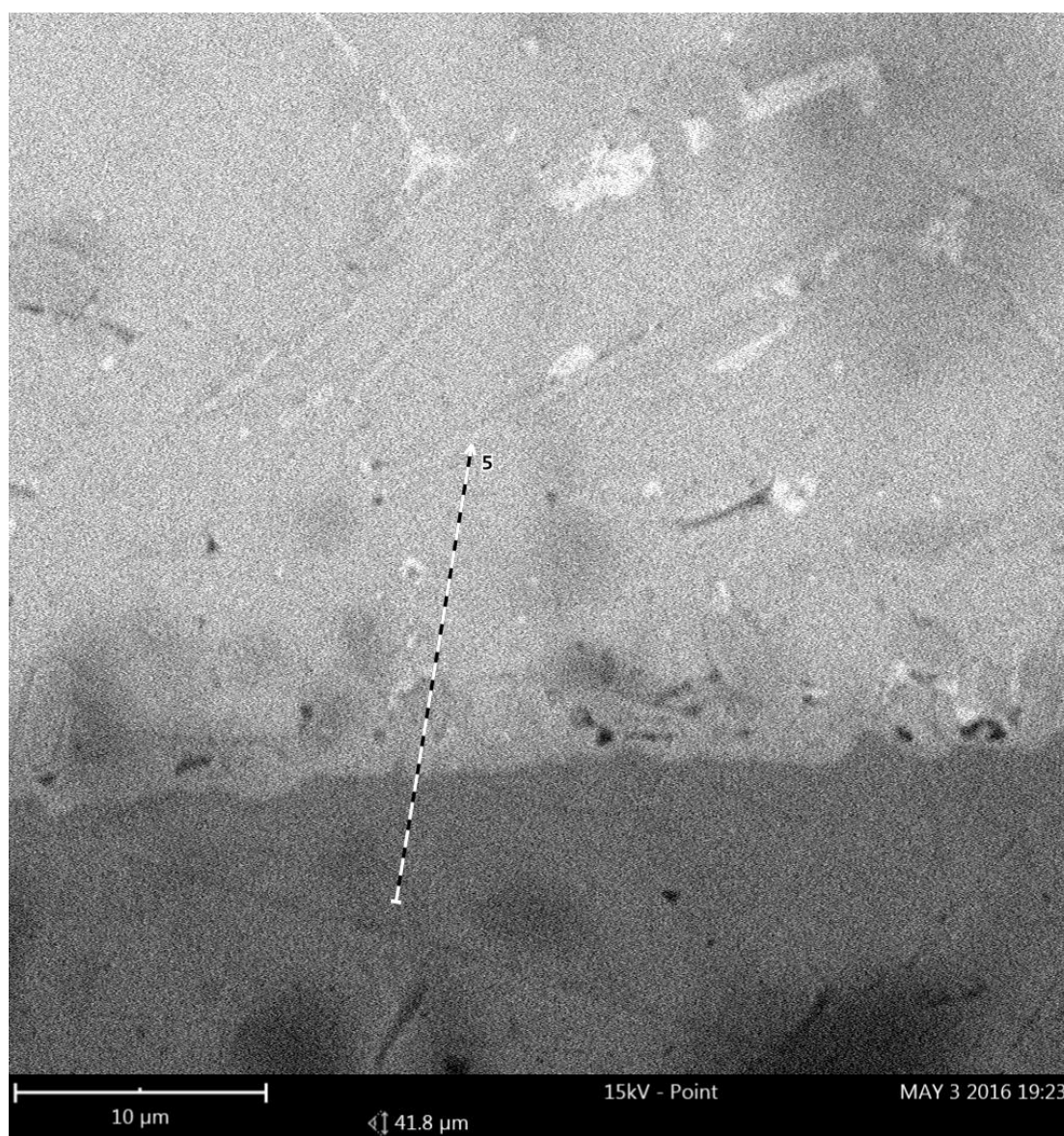
Nebo také mohla být způsobena použitým tavidlem nebo oxidací na povrchu. Přítomnost organických prvků také mohla být způsobena tím, že bylo měřeno na DPS, které se skládá z organických materiálů.

*Tabulka 6: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou a bezolvnatou pájecí pastou*

<b>Protonové číslo</b>	<b>Symbol</b>	<b>Prvek</b>	<b>Koncentrace [%]</b>
82	Pb	Olovo	10.7
83	Bi	Bismut	1.2
50	Sn	Cín	9.2
8	O	Kyslík	35.3
6	C	Uhlík	37.9
14	Si	Křemík	2.2
13	Al	Hliník	1.3
29	Cu	Měď	2.3

## 11.2.8 Olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku

Na následujícím výbrusu můžeme pozorovat v podstatě homogenní strukturu pájeného spoje. To je pravděpodobně zapříčiněno použitím jediné pájecí slitiny. Je zde také vidět poměrně silná intermetalická vrstva, která vznikla deoxidací povrchu a navázáním aktivních prvků, kterou jsou v pájce obsaženy. Dále můžeme pozorovat tmavé podlouhlé skvrny, v tomto případě se může jednat o praskliny. Vyšší počet prasklin uvnitř spoje by mohl vysvětlovat nejmenší sílu v tahu ze všech vzorků.



Obr. 43: Výbrus pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou

V chemické analýze můžeme pozorovat, kromě typického vysokého obsahu kyslíku a uhlíku, také velice nízké procento olova na úkor ostatních kovů. Jak se dozvíme v dalších analýzách,

problémy s identifikací olova u pájek, které by ho měly obsahovat je celkem typickou vlastností. Co se týče ostatních kovů, s výjimkou mědi, která by měla být obsažena kvůli podkladu, tato analýza nám může dát malý vhled do obsahu aktivní slitiny.

*Tabulka 7: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou*

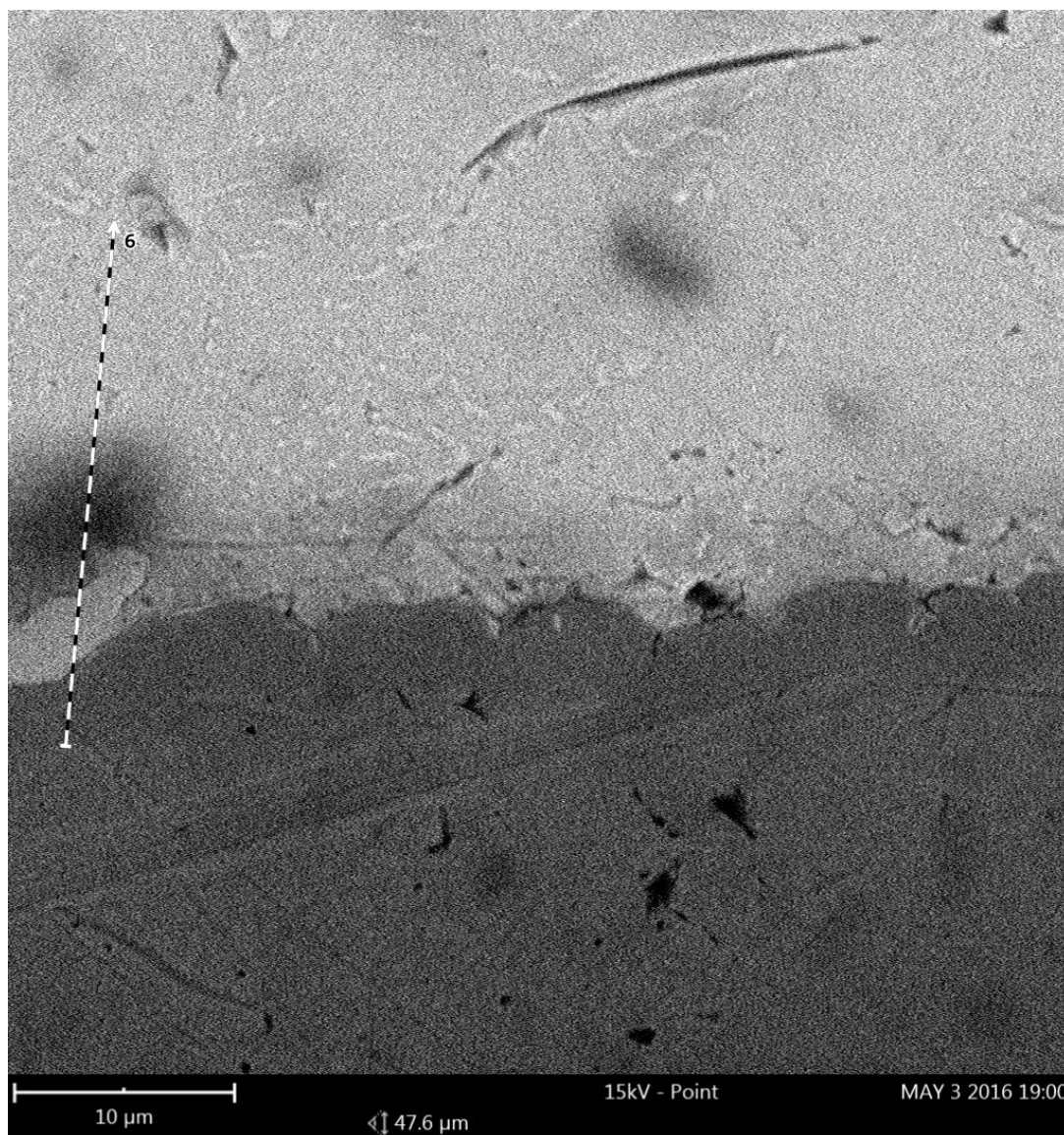
<b>Protonové číslo</b>	<b>Symbol</b>	<b>Prvek</b>	<b>Koncentrace [%]</b>
<b>50</b>	Sn	Cín	16.8
<b>8</b>	O	Kyslík	31.0
<b>6</b>	C	Uhlík	21.3
<b>7</b>	N	Dusík	19.7
<b>14</b>	Si	Křemík	2.1
<b>29</b>	Cu	Měď	6.1
<b>47</b>	Ag	Stříbro	0.9
<b>13</b>	Al	Hliník	1.5
<b>82</b>	Pb	Olovo	0.5

## **11.3 Povrchová úprava: ENIG**

V této kapitole se budu věnovat vzorkům napájeným na povrchovou úpravu ENIG. ENIG (Electroless nickel immersion gold) je povrchová úprava kde je na vrstvu niklu nanесena tenká vrstva zlata. Ve všech případech se bude jednat o analýzu na základě údajů získaných elektronovým mikroskopem.

### **11.3.1 Olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku**

Následující výbrus obsahuje opět spoj vytvořený pouze za pomoci olovnaté aktivní pájecí slitiny, jinak je struktura v podstatě totožná se vzorkem na měděném podkladu. Takže můžeme pozorovat v podstatě homogenní strukturu pájeného spoje. Je zde také opět vidět poměrně silná intermetalická vrstva, která vznikla deoxidací povrchu a navázáním aktivních prvků, kterou jsou v pájce obsaženy. Co se týče pravděpodobných prasklin, i ty zde najdeme, dokonce výrazně větší než u minulého vzorku. Další možností je, že tyto „tvary“ vznikly špatným vybroušením vzorku.



*Obr. 44: Výbrus pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou s ultrazvukem*

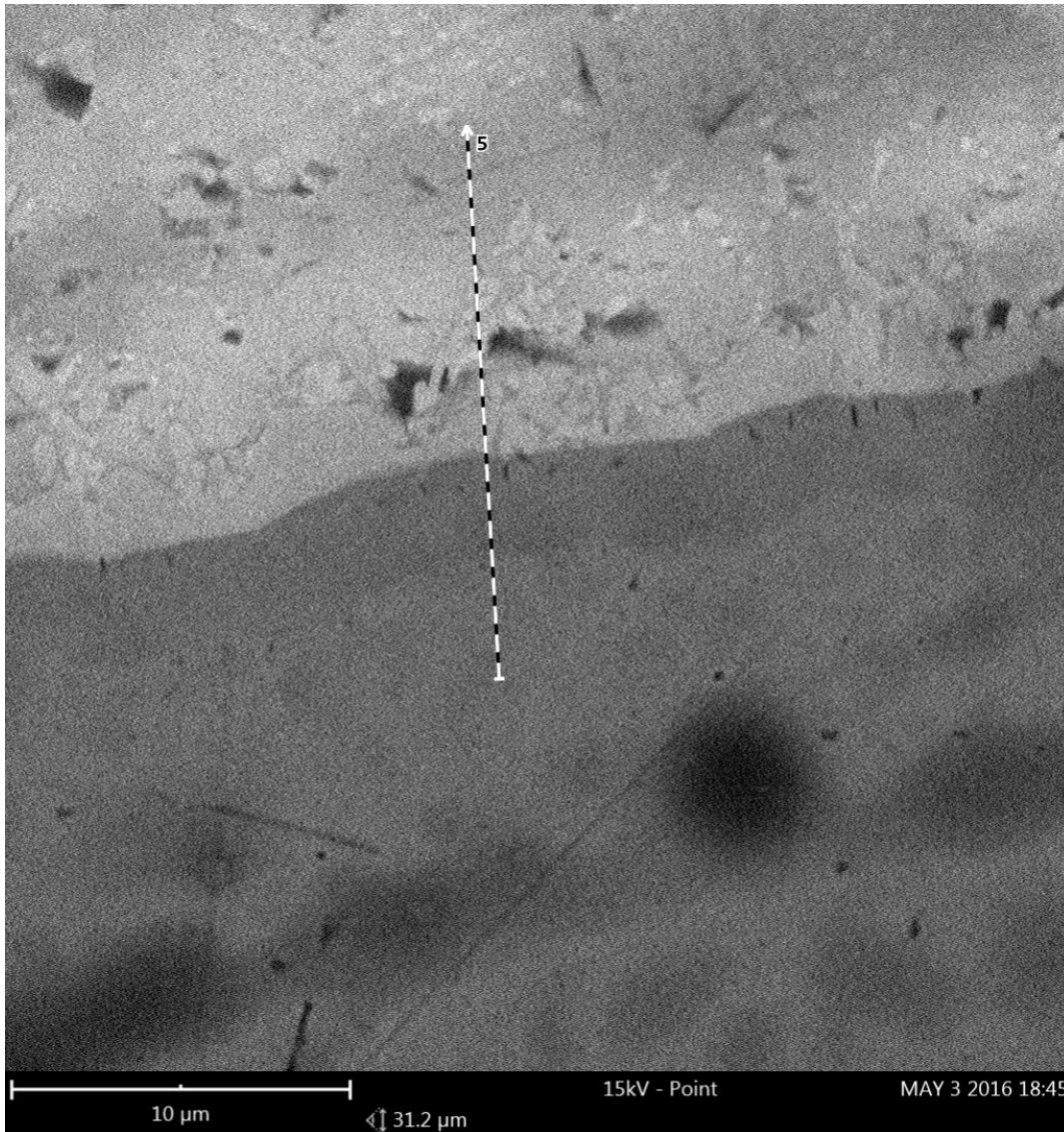
V materiálové analýze si můžeme všimnout toho, že se nám nepodařilo identifikovat olovo, ačkoliv se jedná o olovnatou pájku. Na druhou stranu jsme opět identifikovali křemík, což by mohlo být signálem, že on je jednou z přísad aktivních pájek. Na druhou stranu jeho přítomnost je pravděpodobně způsobena přítomností skelných vláken v DPS.

*Tabulka 8: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou s ultrazvukem*

<b>Protonové číslo</b>	<b>Symbol</b>	<b>Prvek</b>	<b>Koncentrace [%]</b>
50	Sn	Cín	13.9
6	C	Uhlík	44.9
14	Si	Křemík	3.8
28	Ni	Nikl	5.2
29	Cu	Měď	6.0
8	O	Kyslík	22.8
13	Al	Hliník	2.5
15	P	Fosfor	1.0

### 11.3.2 Sn93Ag6,5Cu0,5 + Sn93Ag6,5Cu0,5

Následující výbrus obsahuje klasickou bezolovnatou SAC 305 pájku na obou částech pájeného spoje. Zde můžeme pozorovat v podstatě homogenní strukturu celého spoje, ale také určité množství podlouhlých čar. To by sice mohly být praskliny, více pravděpodobné je, že se jedná o rýhy vytvořené při vybrušování.



Obr. 45: Výbrus pájeného spoje s Sn93Ag6,5Cu0,5

Když se podíváme na údaje získané z materiálové analýzy, jediným překvapením je přítomnost niklu a křemíku v hodnotách, kde bychom čekali spíše stříbro. Přítomnost křemíku byla pravděpodobně opět způsobena skleněnými vlákny. Nikl je přítomen díky povrchové úpravě ENIG, kde je na vrstvě mědi vytvořena vrstva niklu a až na něm je vytvořena finální vrstva zlata.

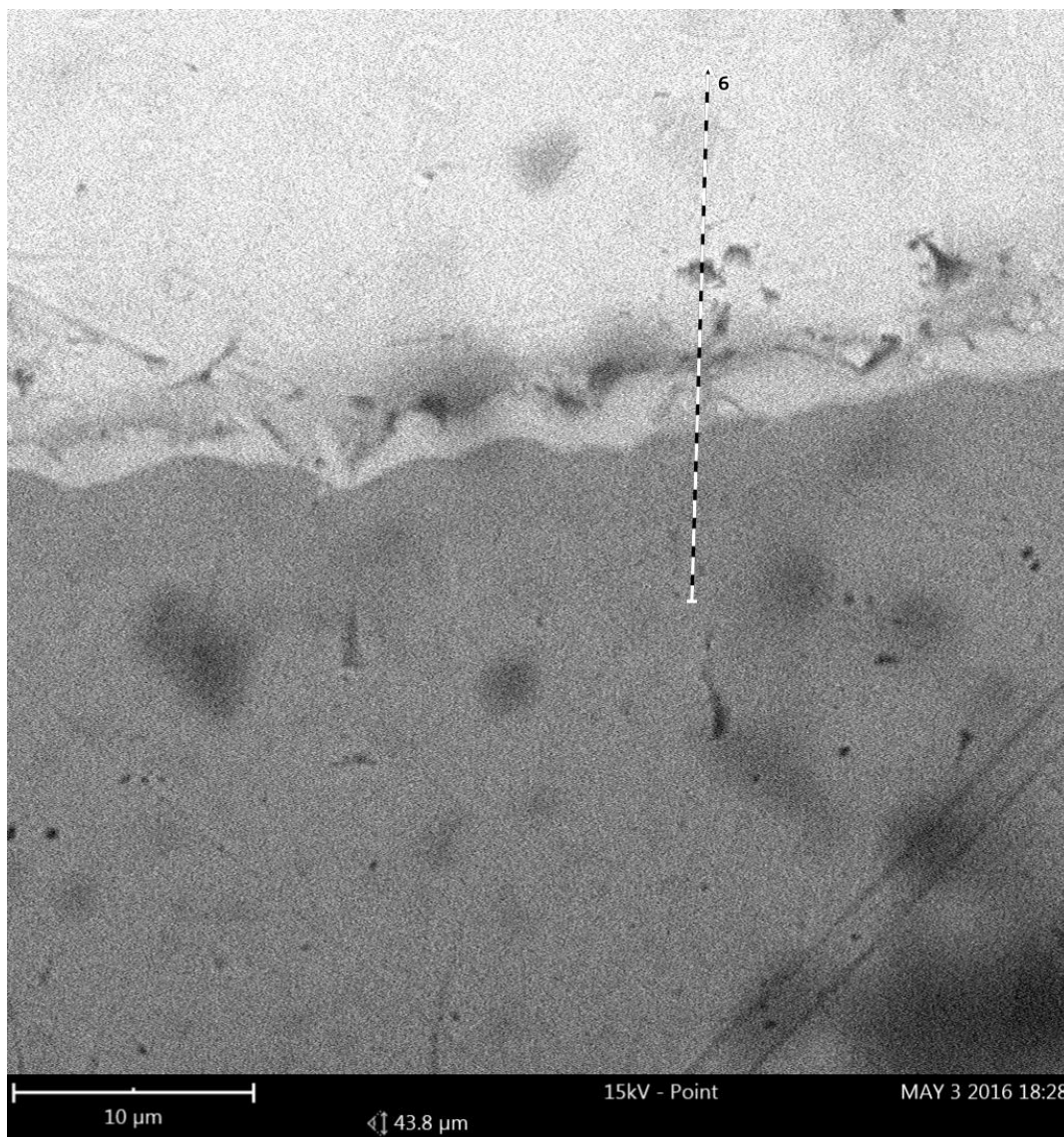
Tabulka 9: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s  
*Sn93Ag6,5Cu0,5*

<b>Protonové číslo</b>	<b>Symbol</b>	<b>Prvek</b>	<b>Koncentrace [%]</b>
<b>50</b>	Sn	Cín	14.8
<b>29</b>	Cu	Měď	15.6
<b>6</b>	C	Uhlík	57.4
<b>14</b>	Si	Křemík	4.4
<b>28</b>	Ni	Nikl	7.8



### 11.3.3 Bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku

V následujícím výbrusu máme spoj vytvořený pomocí bezolovnaté pájecí slitiny. Na něm můžeme pozorovat pro tyto spoje typickou silnou intermetalickou vrstvu, která vzniká navázáním aktivních prvků. Jinak je tento spoj ve své podstatě dost homogenní.



Obr. 46: Výbrus pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou

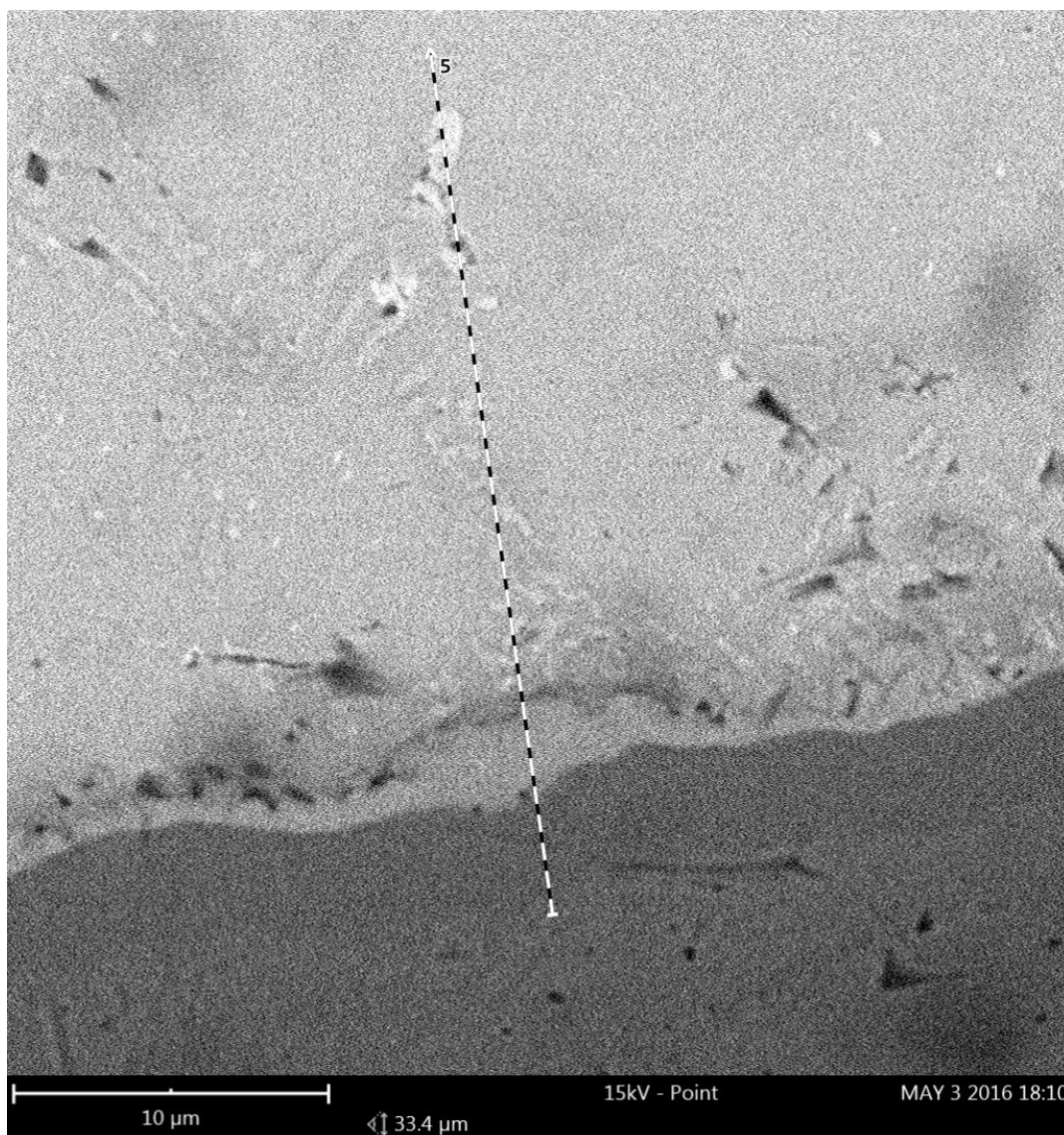
V materiálové analýze se můžeme pozastavit nad tím, že kyslík se zatím pouze vyskytuje pouze ve spojích vytvořených za pomoci ultrazvuku. Tento jev by mohl být způsoben tím, že intermetalická vrstva je tvořena oxidy aktivních látek.

*Tabulka 10: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou*

<b>Protonové číslo</b>	<b>Symbol</b>	<b>Prvek</b>	<b>Koncentrace [%]</b>
<b>50</b>	Sn	Cín	17.2
<b>6</b>	C	Uhlík	35.7
<b>8</b>	O	Kyslík	33.9
<b>29</b>	Cu	Měď	6.2
<b>15</b>	P	Fosfor	1.5
<b>13</b>	Al	Hliník	2.2
<b>28</b>	Ni	Nikl	3.3

### 11.3.4 Olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + bezolovnatá pájecí pasta

Následující spoj je vytvořen za pomoci olovnaté pájecí slitiny a bezolovnaté pájecí pasty. Zde můžeme pozorovat, že struktura je víceméně homogenní, což je v porovnání s tím samým spojem na měděném podkladu rozdíl. Tento rozdíl může být způsoben lepším přepájením a lepším napájením aktivní vrstvy.



Obr. 47: Výbrus pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pastou

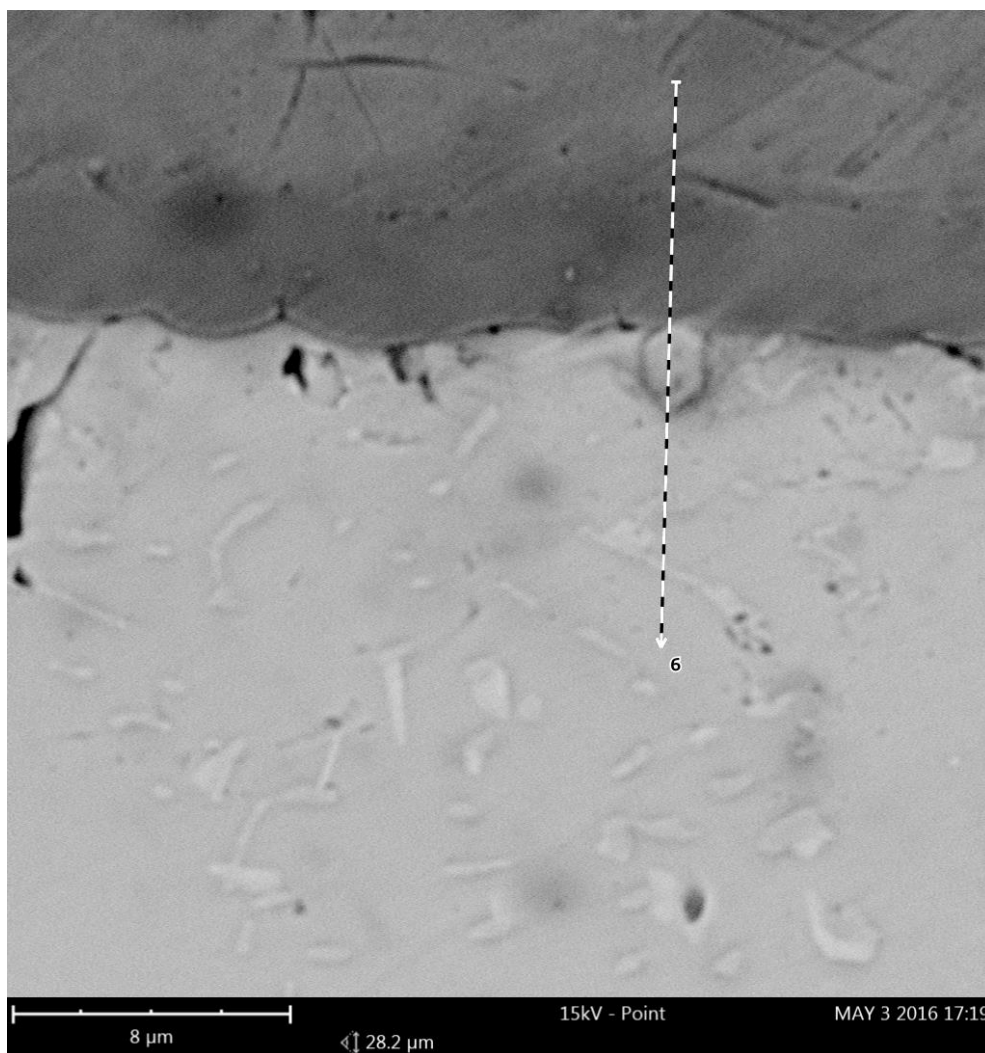
Když se podíváme na údaje z materiálové analýzy, tak se zde opět vyskytuje kyslík ve vysoké koncentraci a také křemík, který je obsažen v DPS. Co se týče ostatních prvků, tak měď je obsažena ve spodní vrstvě ENIG povrchové úpravy a stříbro je běžnou součástí pájecích slitin.

*Tabulka 11: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pastou*

<b>Protonové číslo</b>	<b>Symbol</b>	<b>Prvek</b>	<b>Koncentrace [%]</b>
<b>29</b>	Cu	Měď	6.1
<b>50</b>	Sn	Cín	18.6
<b>28</b>	Ni	Nikl	3.9
<b>14</b>	Si	Křemík	3.1
<b>8</b>	O	Kyslík	37.0
<b>6</b>	C	Uhlík	30.1
<b>13</b>	Ag	Stříbro	1.2

### 11.3.5 Bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + bezolovnatá pájecí pasta

Následující výbrus spoje vytvořeného za pomoci bezolovnaté aktivní slitiny a bezolovnaté pájecí pasty. Struktura je v tomto případě, jako v mnoha dalších, homogenní. V tomto případě je zajímavým jevem, kromě prasklin, přítomnost světlých struktur. Vzhledem k jejich tvaru a poměrnému zbarvení, si trůufám odhadovat, že se jedná o krystalky.



Obr. 48: Výbrus pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pastou

Chemická analýza v tomto případě stejně jako u ostatních vzorků vyrobených za pomoci ultrazvukové aktivní slitiny obsahuje kyslík a křemík. Co se týče niklu a mědi, ty jsou součástmi povrchové úpravy ENIG. Zlato, které je ve svrchní vrstvě této povrchové úpravy se rozpustilo do pájecí slitiny a proto nebylo identifikováno. Fosfor se někdy do povrchové úpravy ENIG přidává, ale obvykle to bývá ve výrazně nižší koncentraci, než jaká se vyskytla v naší materiálové analýze.

*Tabulka 12: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pastou*

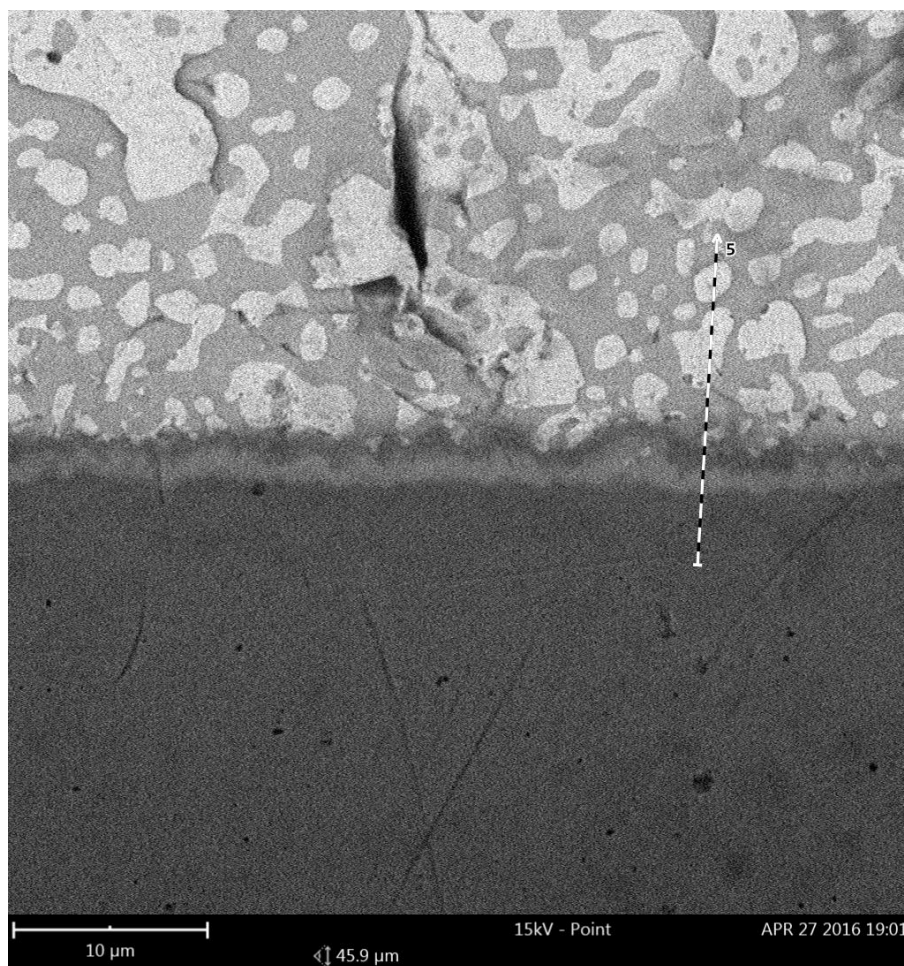
<b>Protonové číslo</b>	<b>Symbol</b>	<b>Prvek</b>	<b>Koncentrace [%]</b>
50	Sn	Cín	20.9
6	C	Uhlík	37.3
28	Ni	Nikl	7.3
47	Ag	Stříbro	1.8
29	Cu	Měď	6.7
8	O	Kyslík	23.0
15	P	Fosfor	1.5
14	Si	Křemík	1.5

## 11.4 Podklad: HAL

V této kapitole se budu věnovat vzorkům napájeným na podklad z HALu. HAL (Hot air leveling) je povrchová úprava, kdy jsou měděné plošky pokryty tenkou vrstvou cínu nebo pájecí slitiny. Ve všech případech se bude jednat o analýzu na základě údajů získaných elektronovým mikroskopem.

### 11.4.1 Olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku

V následujícím výbrusu můžeme pozorovat strukturu velmi podobnou té, která byla se stejnou kombinací pájek vytvořena na měděném podkladu, jen s tím rozdílem, že tady se nejedná o několik rozdílných ploch, kde by převládala světlá nebo tmavší plocha. Nejedná se tedy o plochu výrazně homogenní jako ve většině předchozích případů.



Obr. 49: Výbrus pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou

Když se podíváme na výsledky z materiálové analýzy, tak je zde opět přítomen kyslík, ale na rozdíl od ostatních spojů pájených aktivní pájkou, zde nenalezneme fosfor ani nikl. To je dáno

odlišným druhem povrchové úpravy než je ENIG, která běžně obsahuje nikl a výjimečně i fosfor. Na druhou stranu je zde přítomna měď, která je ale přítomna i v povrchové úpravě.

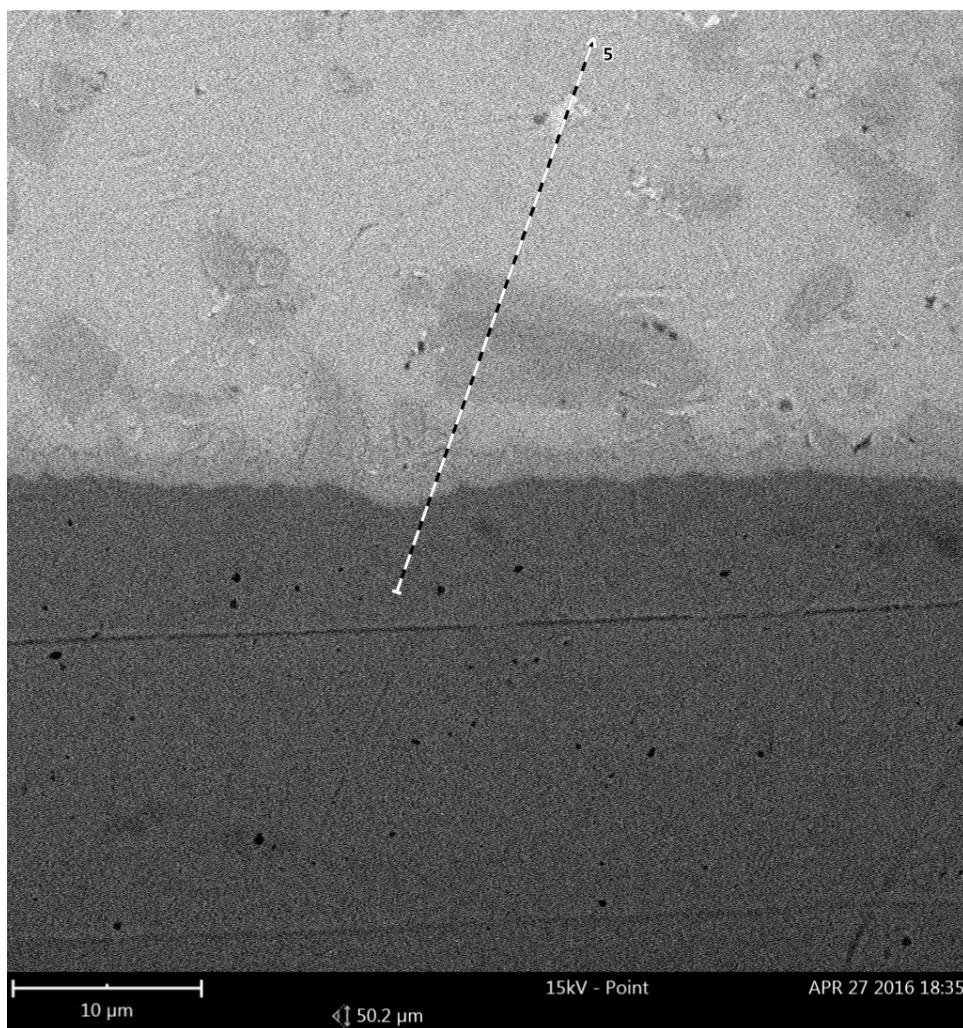
*Tabulka 13: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou*

<b>Protonové číslo</b>	<b>Symbol</b>	<b>Prvek</b>	<b>Koncentrace [%]</b>
<b>82</b>	Pb	Olovo	7.5
<b>50</b>	Sn	Cín	6.9
<b>29</b>	Cu	Měď	18.4
<b>8</b>	O	Kyslík	27.7
<b>6</b>	C	Uhlík	39.6



## 11.4.2 Bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku

V tomto případě byl spoj vytvořen pouze za pomoci aktivní ultrazvukové pájecí slitiny. Na první pohled je naprosto patrná tenčí intermetalická vrstva než obvykle u spojů vytvořených aktivní slitinou. Pro tento vzorek je unikátní množství různých o několik tónů tmavších plošek, většinou blízkých obdélníkovému tvaru.



Obr. 50: Výbrus pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou

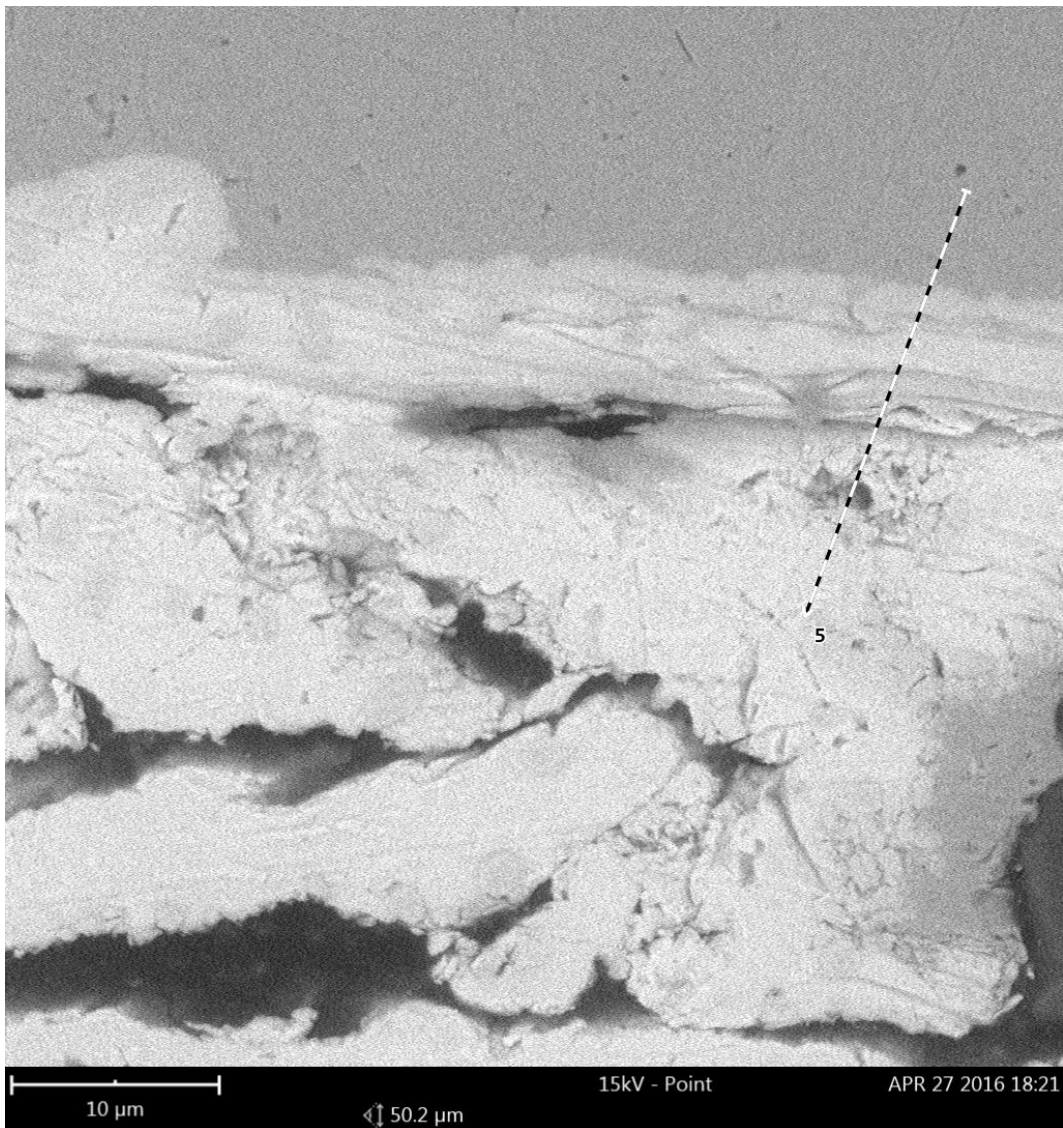
Materiálová analýza v tomto případě jako ve většině ostatních obsahuje křemík, měď a kyslík. Nově se zde objevuje titan a antimon. Výskyt titanu v tomto případě není překvapující, neb se jedná o vysoce reaktivní kov, který za zvýšené teploty (která je pro pájení jako takové typická) reaguje s většinou nekovů, včetně kyslíku, což by mohlo umožňovat vytvoření oxidů v intermetalické vrstvě pájeného spoje.

*Tabulka 14: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou*

<b>Protonové číslo</b>	<b>Symbol</b>	<b>Prvek</b>	<b>Koncentrace [%]</b>
<b>50</b>	Sn	Cín	14.3
<b>14</b>	Si	Křemík	5.3
<b>29</b>	Cu	Měď	13.2
<b>8</b>	O	Kyslík	30.7
<b>6</b>	C	Uhlík	31.6
<b>13</b>	Al	Hliník	2.9
<b>22</b>	Ti	Titan	2.1

### 11.4.3 Sn93Ag6,5Cu0,5 + Sn93Ag6,5Cu0,5

Následující fotka výbrusu je dokonalou ilustrací, jak to vypadá, když se přepájení nepovede. Můžeme tedy pozorovat široké spektrum různých vad. Ještě je třeba upozornit na fakt, že toto je jeden z případů, kdy je substrát, na který byl spoj pájen v horní části fotografie. Těmi největšími a na první pohled patrnými jsou velice časté praskliny, napříč celým zvoleným úsekem. To bylo s největší pravděpodobností způsobeno tím, že oba dva kusy DPS nebyly pocínovány do ideální hladkosti a následně na sebe byly nevhodně položeny. Díky tomu nemohlo dojít k ideálnímu přepájení v peci. Tento jev se většinou vyskytoval u spojů pájených aktivní pájkou, kde bylo dosažení dostatečné hladkosti povrchu pouze ruční páječkou výrazně náročnější.



Obr. 51: Výbrus pájeného spoje s Sn93Ag6,5Cu0,5

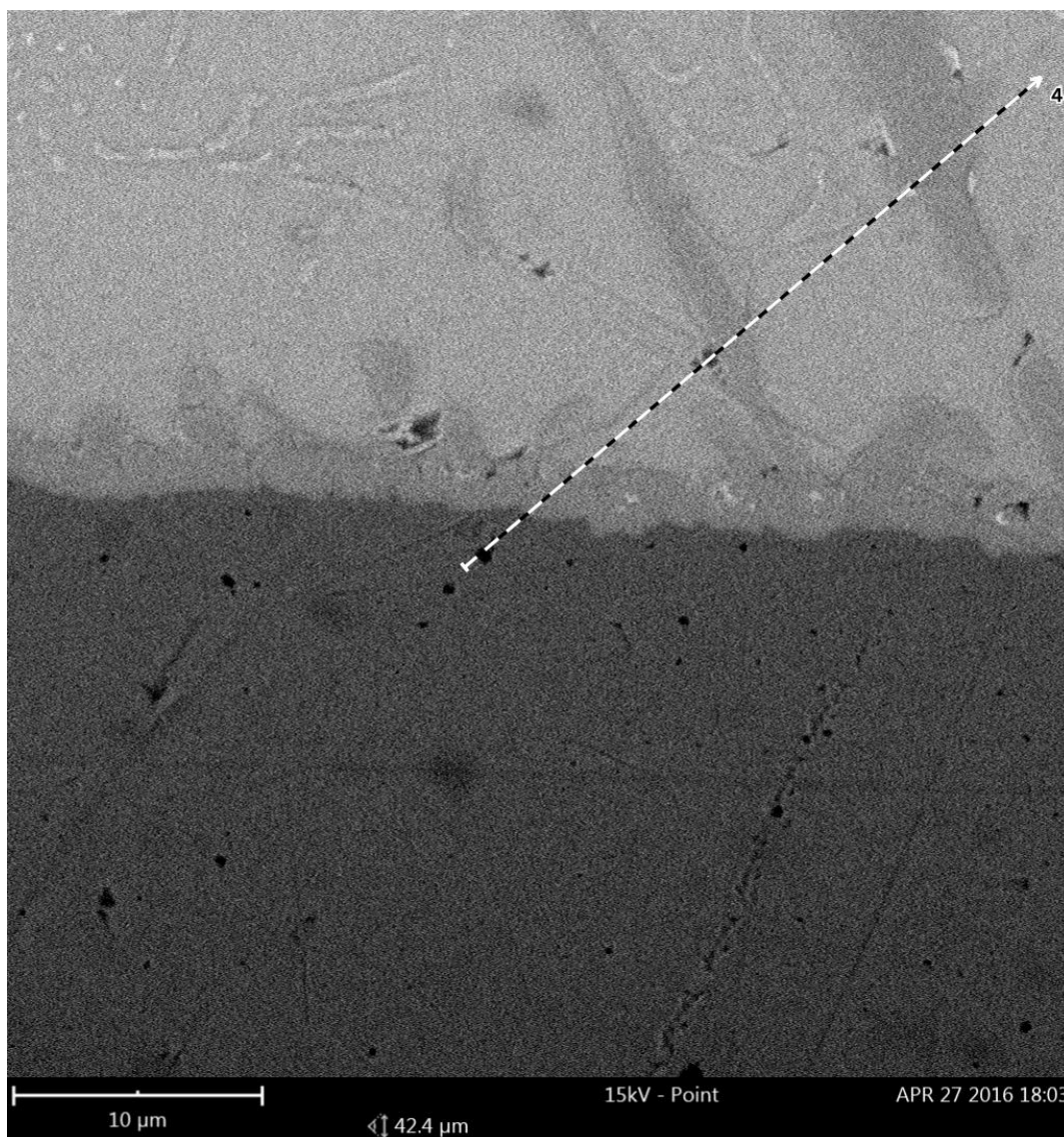
Co se týče materiálové analýzy, tak z anorganických látek zde převládá měď a cín. Cín, vzhledem ke složení pájky (93%) není žádným překvapením, měď vzhledem k použité povrchové úpravě taky ne. Křemík se do této analýzy dostal jako součást DPS:

*Tabulka 15: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s  
Sn93Ag6,5Cu0,5*

<b>Protonové číslo</b>	<b>Symbol</b>	<b>Prvek</b>	<b>Koncentrace [%]</b>
<b>50</b>	Sn	Cín	11.9
<b>29</b>	Cu	Měď	15.7
<b>14</b>	Si	Křemík	5.7
<b>8</b>	O	Kyslík	33.1
<b>6</b>	C	Uhlík	30.7
<b>13</b>	Al	Hliník	2.8

#### 11.4.4 Olovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + bezolovnatá pájecí pasta

V tomto výbrusu můžeme pozorovat poměrně silnou intermetalickou vrstvu, ale také i fakt, že napříč celým našim výbrusem se nacházejí pruhy z látky, která vizuálně působí jako stejná s intermetaliky. A dalším zajímavým faktorem jsou o něco světlejší plochy, u kterých stejně jako v minulých případech je vážně podezření, že se jedná o krystaly.



*Obr. 52: Výbrus pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pastou*

Materiálová analýza nám v tomto případě odhalila, že největší koncentrace anorganik v pájeném spoji je u mědi a cínu. Vzhledem k tomu, že cín je hlavní látkou pro moderní pájení, opět se nejedná o překvapivý fakt. Překvapujícím v tomto případě je přítomnost tantalu. Tantal je vzácný inertní kov, který se vyznačuje velmi vysokou teplotou tání, což je vlastnost pro pájení

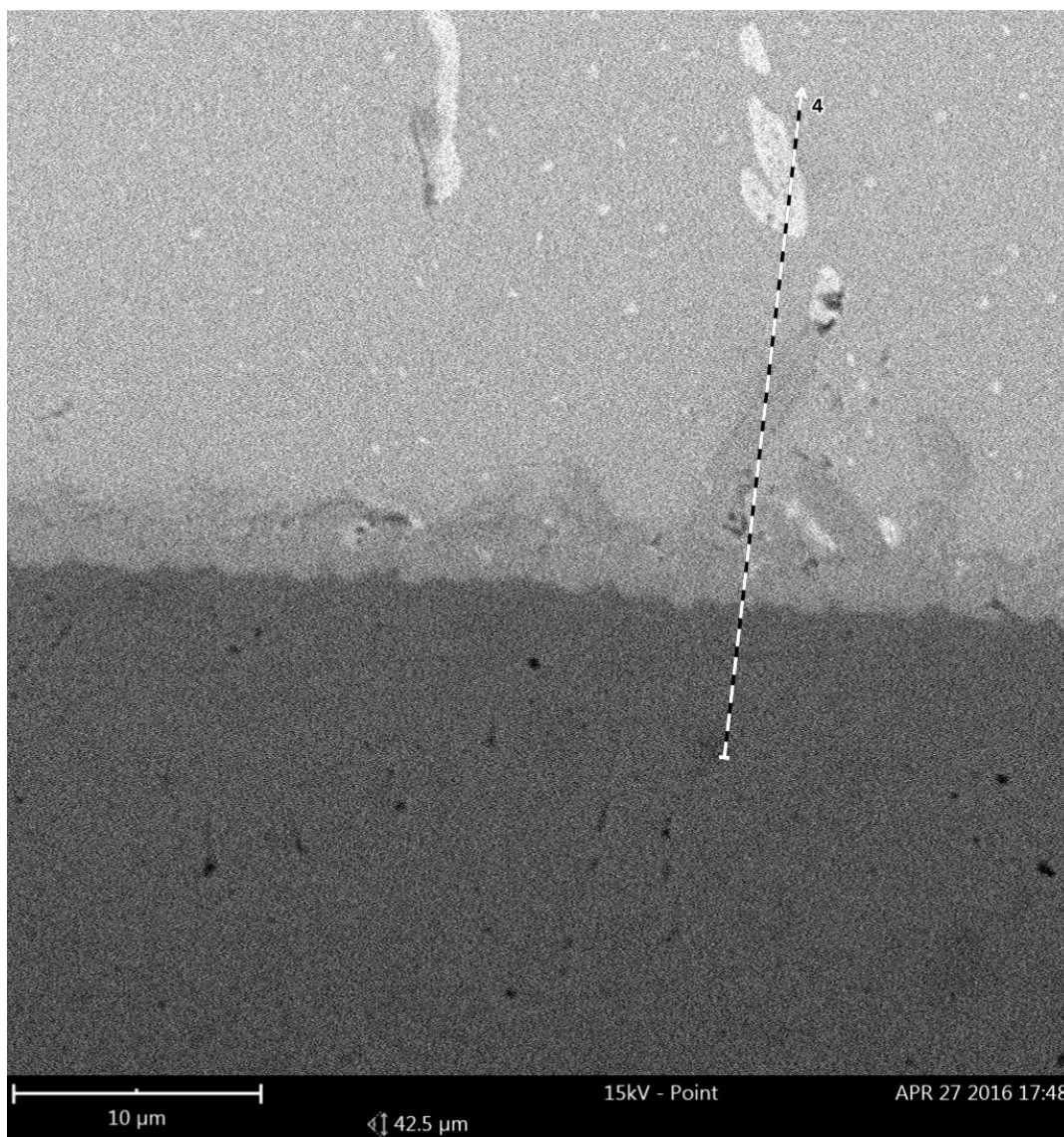
vcelku nevhodná. Jeho reálný výskyt uvnitř aktivní pájky zcela vyloučit nemohu, ale vzhledem k jeho vlastnostem se mi nezdá příliš pravděpodobný a zřejmě došlo při elektronové mikroskopii k chybné interpretaci tohoto prvku.

*Tabulka 16: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou a bezolvnatou pastou*

<b>Protonové číslo</b>	<b>Symbol</b>	<b>Prvek</b>	<b>Koncentrace [%]</b>
50	Sn	Cín	19.8
20	Ca	Vápník	1.9
29	Cu	Měď	14.1
13	Al	Hliník	3.7
73	Ta	Tantal	2.7
6	C	Uhlík	29.1
8	O	Kyslík	27.9
27	Co	Kobalt	1.0

### 11.4.5 Bezolovnatá aktivní pájecí slitina s použitím ultrazvuku + bezolovnatá pájecí pasta

Následující výbrus zobrazuje pájený spoj vytvořený pomocí bezolovnaté aktivní pájecí slitiny a bezolovnaté pájecí pasty. Na něm můžeme vidět vysoce homogenní spoj s poměrně tlustou intermetalickou vrstvou. Kromě toho je dalším zajímavým faktem po celém povrchu poměrně rovnoměrně distribuované malé plošky o světlejším tónu než zbylá majorita pájky.



Obr. 53: Výbrus pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pastou

Chemická analýza nám odhalila široké spektrum prvků v této pájce. Kromě obligátních organických látek, typického cínu a mědi, jsme se znovu setkali s tantalem, ale také se zirkoniem, kadmíem a bromem. Zirkonium je lehký kov vyznačující se mimořádnou stálostí, ale také vysokou afinitou ke kyslíku, což by vzhledem k nutnosti vytváření oxidů v ultrazvukovém

pájení byla užitečná vlastnost. Kadmium je velice vzácný kov, který byl ale směrnici RoHS vyloučen z používání v průmyslu, z toho důvodu jeho výskyt uvnitř aktivní pájky nepovažují za velice pravděpodobný. Brom je nekovové oxidační činidlo, což by mohlo vést ke zlepšení oxidačních reakcí v průběhu ultrazvukového pájení, vzhledem k jeho nízké teplotě varu (58,85 °C), ale nepovažují jeho přítomnost v aktivní sloučenině rovněž za příliš pravděpodobnou.

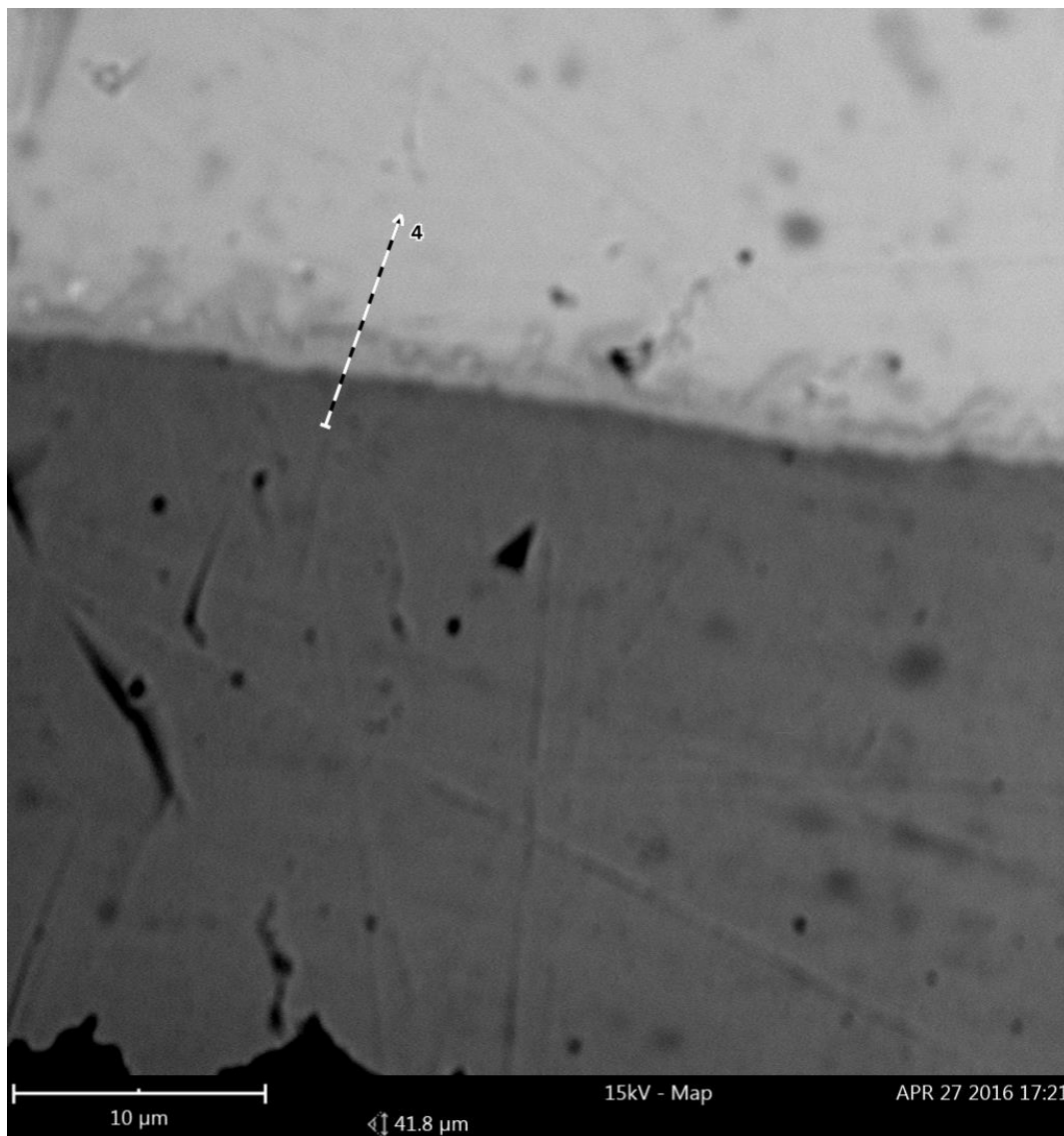
*Tabulka 17: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pastou*

<b>Protonové číslo</b>	<b>Symbol</b>	<b>Prvek</b>	<b>Koncentrace [%]</b>
<b>50</b>	Sn	Cín	22.4
<b>52</b>	Te	Tellur	1.1
<b>29</b>	Cu	Měď	11.8
<b>35</b>	Br	Brom	3.2
<b>8</b>	O	Kyslík	28.5
<b>6</b>	C	Uhlík	29.4
<b>73</b>	Ta	Tantal	1.9
<b>40</b>	Zr	Zirkonium	1.3
<b>48</b>	Cd	Kadmium	0.4



#### 11.4.6 Sn93Ag6,5Cu0,5 + bezolovnatá pájecí pasta

V tomto, pro nás posledním, vzorku se zaměříme na strukturu pájeného spoje vytvořeného pomocí klasické SAC sloučeniny a bezolovnaté pájecí pasty. Zde můžeme, i přes sníženou kvalitu fotografie, pozorovat intermetalickou vrstvu a také vysoce homogenní vrstvu na pájeném spoji.



Obr. 54: Výbrus pájeného spoje s Sn93Ag6,5Cu0,5 s bezolovnatou pastou

V materiálové analýze nás tentokrát kromě klasických organik, jako je kyslík a uhlík a typických pájecích příměsí jako cín a měď překvapí pouze přítomnost fluoru. Fluor je organická látka, jež nemá k pájení žádný vztah a její přítomnost je tedy velice pravděpodobná z pohledu chybné interpretace v rámci elektronové mikroskopie.

*Tabulka 18: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s Sn93Ag6,5Cu0,5 s bezolovnatou pastou*

<b>Protonové číslo</b>	<b>Symbol</b>	<b>Prvek</b>	<b>Koncentrace [%]</b>
50	Sn	Cín	17.0
29	Cu	Měď	14.7
6	C	Uhlík	32.0
8	O	Kyslík	26.6
9	F	Fluor	9.7

## 12 Závěr

Úkolem této diplomové práce bylo seznámit se s různými metodami pájení, prozkoumat mechanické vlastnosti a rozdíly mezi bezolovnatými pájenými spoji vytvořenými pomocí ultrazvukové a běžné páječky a nakonec prozkoumat strukturu mnou zkoumaných pájených spojů.

V teoretické části jsem vybral několik běžně používaných, ale i několik málo, spíše výjimečně používaných metod. Mezi běžnými metodami jsem se zejména zaměřil na pájení přetavením a několik způsobů pájení možných u této metody.

Dále jsem se zaměřil na ultrazvuk, ultrazvukové pájení a další ultrazvukové technologie. Jako první jsem se zaměřil krátce na historii ultrazvuku, počínaje zkoumáním echolokace v 18. století, dále piezoelektrickým jevem a konče objevem sonoluminiscence.

V další kapitole jsem se zaměřil na to, co to vlastně ultrazvuk je, jak je definován a zejména na kavitační jev. Kavitace je jev, při kterém se uvolňuje obrovské množství energie a je základem pro většinu ultrazvukových technologií v průmyslu.

Pátá kapitola se zabývá ultrazvukovým využitím, které sice efektu kavitace nevyužívá, ale je naprosto nejběžnější. Jedná se o lékařskou sonografii. V této kapitole jsem vysvětlil, jaké jsou typy zobrazování sonografů v 1D, ze kterých se pak skládají pro nás typické 2D a 3D sonogramy.

Následující kapitola se zabývá konečně ultrazvukovým pájením jako takovým. V této kapitole se zaměřuji na to, čím se ultrazvukové pájení odlišuje od normálního, jak efekt kavitace ovlivňuje mechanické a chemické vlastnosti, díky kterým jde pájet i na nekovové substráty. Také jsem se v této kapitole zaměřil na tzv. aktivní pájecí slitinu, která se používá při ultrazvukovém pájení. Další kapitola se zabývá typickou ultrazvukovou technologií používanou v elektrotechnickém průmyslu. Touto technologií myslím ultrazvukové čištění. Zaměřil jsem se na princip ultrazvukového čištění, které stejně jako pájení funguje díky efektu akustické kavitace a dále na výhody této technologie a její využití.

Další kapitola se zaměřila na dělení pájek na měkké a tvrdé pájky, na rozdíly mezi těmito pájkami a na některé používané slitiny.

Následovala kapitola zaměřená na olovnaté a bezolovnaté pájecí slitiny. V ní jsem se podíval na problematiku direktivy Evropské unie známé jako RoHS, dále se podíval na typické vlastnosti olovnatých a bezolovnatých pájek.

V praktické části jsem se nejdříve zaměřil na mechanické vlastnosti, konkrétně sílu v tahu. Připravil jsem vzorky pro několik různých variant pájeného spoje. Zkoušel jsem různé

kombinace pájek, jak klasických, tak ultrazvukových, pájecích past a povrchových úprav. Tyto vytvořené vzorky jsem poté testoval na dvou různých trhačkách.

Nezpochybnitelným výsledkem trhání byla skutečnost, že olovnatá aktivní slitina dosáhla nejnižší síly v tahu bez ohledu na povrchovou úpravu. A třeba bezolovnatá aktivní slitina dosáhla na měděné povrchové úpravě výrazně vyšších čísel než v případě povrchové úpravy HAL a ENIG. To by mohlo být způsobeno například stářím pájky, ale i změnou trhačky a tudíž jiným zavěšením vzorku. Pravděpodobně nejdůležitějším faktorem v tomto případě je špatně zvolená metoda na přípravu těchto vzorků, kdy při přetavování nebyl použit ultrazvuk, a tak se pájka při druhém přetavování nechovala přesně tak, jak by měla, a nevznikl dokonalý spoj. Výrazným faktorem v tomto případě by mohla být i náročnost ultrazvukového pájení na ruční vytvoření dostatečně hladké vrstvy.

V poslední části této práce jsem zaměřil na vnitřní strukturu pájených spojů jak z fotografií z optického mikroskopu, tak z fotografií a materiálových analýz vytvořených za pomoci elektronového mikroskopu. Tam jsem se snažil odhalit některé z příměsí v aktivní pájecí slitině. Po analýze několika vzorků jsme objevili nejčastější výskyt cínu a mědi, které ale pravděpodobně patří do jednotlivých povrchových úprav. Dále vzhledem ke svým vlastnostem by do aktivní slitiny mohl patřit i titan. Další podezřelé prvky jsou hliník, tantal, brom, vápník a kobalt. U nich ale mohlo dojít při analýze k chybné interpretaci a jejich výskyt v našich aktivních pájkách můžeme pouze odhadovat.

Z fotografií se nám podařilo seznámit se standardním vzhledem struktury pájeného spoje, ale díky velkému zvětšení elektronového mikroskopu také s velkým množstvím chyb, které se mohou v pájených spojkách vytvořit, zejména se jedná o praskliny uvnitř struktury pájeného spoje, které v některých případech dosahovaly i desetin milimetru. Tyto chyby mohly být pravděpodobně způsobeny nedokonalým druhým přetavením.

## Přehled použité literatury

- [1] STK PRAHA. Pájení. Spálená 51, 113 02 Praha 01: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988. L13-B3III-31F/22871.
- [2] Pájení přetavením. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Pájení\\_přetavením](http://cs.wikipedia.org/wiki/Pájení_přetavením)
- [3] Pájení vlnou. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Pájení\\_vlnou](http://cs.wikipedia.org/wiki/Pájení_vlnou)
- [4] Pájení. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Pájení>
- [5] Restriction of Hazardous Substances Directive. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Restriction\\_of\\_Hazardous\\_Substances\\_Directive](http://en.wikipedia.org/wiki/Restriction_of_Hazardous_Substances_Directive)
- [6] RoHS. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/RoHS>
- [7] SZENDIUCH, Ivan, Pájení a bezolovnaté pájky, 10 stran, Dostupné z: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>
- [8] DRÁPALA, Jaromír, Žaneta URBANÍKOVÁ, Petr ZLATOHLÁVEK a Jan VŘEŠŤÁL. Materiály pro bezolovnaté pájky. In Metal 05. 1. vyd. Ostrava: Tanger s.r.o., 2005. s. 1-9, 9 s. ISBN 80-86840-13-1.
- [9] RATCHEV, Petar; VANDEVELDE, Bart; DE WOLF, Ingrid, Reliability and Failure Analysis of Sn-Ag-Cu Solder Interconnections for PSGA packages on Ni/Au Surface Finish, 6 stran, Dostupné z: [http://www.elis.ugent.be/ELISgroups/tfcg/projects/imecat/documents/01\\_2003\\_IEEE\\_TMDR\\_Ratchev\\_paper.pdf](http://www.elis.ugent.be/ELISgroups/tfcg/projects/imecat/documents/01_2003_IEEE_TMDR_Ratchev_paper.pdf)
- [10] Ultrasonic Soldering and Active Solders. Dostupné z: <http://www.s-bond.com/blog/2013/04/16/ultrasonic-soldering-and-active-solders/>
- [11] Ultrasonic soldering. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic\\_soldering](http://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_soldering)
- [12] STARÝ, Jiří, Ultrazvukové pájení princip, 34 stran

- [13] Ultrasound. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasound>
- [14] History of ultrasound. Dostupné z: <http://www.ultrasound-schools.info/history/>
- [15] Industrial Applications of Ultrasound. Dostupné z: <http://www.ieee-uffc.org/ultrasonics/teaching/t7520060.pdf>
- [16] CAROVAC, Aladin, SMAJLOVIC, Fahrudin, a JANUZOVIC, Dzelaludin Application of Ultrasound in Medicine. Dostupné z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3564184/>
- [17] Ultrasonics: Applications and Processes. Dostupné z: [http://www.hielscher.com/technolo.htm#Ultrasonic\\_Homogenizing](http://www.hielscher.com/technolo.htm#Ultrasonic_Homogenizing)
- [18] Lékařská ultrasonografie. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Lékařská\\_ultrasonografie](https://cs.wikipedia.org/wiki/Lékařská_ultrasonografie)
- [19] Kavítace. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kavítace>
- [20] Piezoelectricity. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>
- [21] Sonoluminescence. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sonoluminescence>
- [22] Ultrazvuková čistička. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Ultrazvuková\\_čistička](https://cs.wikipedia.org/wiki/Ultrazvuková_čistička)

## Seznam obrázků

Obr. 1: Historická ilustrace pájení.....	8
Obr. 2: Souprava pro ruční pájení (pájení pájedlem) .....	9
Obr. 3: Souprava na pájení ponorem.....	10
Obr. 4: Souprava na indukční pájení .....	11
Obr. 5: Ilustrace 4-zonové průběžné pece .....	12
Obr. 6: Zařízení na pájení vlnou.....	15
Obr. 7: Lazzaro Spallanzani .....	16
Obr. 8: Paul Langevin .....	17
Obr. 9: Průběh ultrazvukových kmitů z generátoru zaznamenaných osciloskopem (čas na vodorovné ose, amplituda signálu na svislé ose) .....	18
Obr. 10: Kavitace v kapalině.....	19
Obr. 11: Sonoluminiscence .....	19
Obr. 12: Sonograf.....	20
Obr. 13: Zobrazení v A módu .....	21
Obr. 14: Zobrazení v B módu.....	22
Obr. 15: Zobrazení v M módu.....	22
Obr. 16: 2D zobrazení sonogramu .....	23
Obr. 17: 3D zobrazení sonogramu .....	24
Obr. 18: Body napájené na sklo .....	25
Obr. 19: Ultrazvuková páječka.....	26
Obr. 20: Ilustrace pájení na sklo.....	27
Obr. 21: Pájení na keramiku.....	29
Obr. 22: Aktivní pájka.....	30
Obr. 23: Ultrazvuková čistička.....	31
Obr. 24: Schéma ultrazvukové čističky.....	32
Obr. 25: Vzorky připravené na přetavení .....	37
Obr. 26: Teplotní profil průběžné pece .....	38
Obr. 27: Ultrazvuková páječka.....	39
Obr. 28: Trhačka .....	41
Obr. 29: Trhačka .....	41
Obr. 30: Průběh trhání vzorku s SAC305 na ENIG povrchové úpravě.....	42
Obr. 31: Průběžná pec .....	45
Obr. 32: Výbrus ze vzorku na měděném substrátu .....	46

Obr. 33: Výbrus ze vzorku na skle.....	47
Obr. 34: Výbrus pájeného spoje s aktivní pájecí olovnatou slitinou na skle.....	48
Obr. 35: Výbrus pájeného spoje s aktivní pájecí bezolovnatou slitinou na skle .....	49
Obr. 36: Výbrus pájeného spoje s Sn93Ag6,5Cu0,5.....	50
Obr. 37: Výbrus pájeného spoje s Sn93Ag6,5Cu0,5 a bezolovnatou pastou .....	51
Obr. 38: Výbrus pájeného spoje s aktivní slitinou s ultrazvukem.....	52
Obr. 39: Výbrus pájeného spoje s aktivní slitinou s ultrazvukem a bezolovnatou pastou .....	53
Obr. 40: Výbrus pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou bez ultrazvuku .....	54
Obr. 41: Výbrus pájeného spoje s aktivní slitinou bez ultrazvuku a bezolovnatou pastou .....	55
Obr. 42: Výbrus pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pájecí pastou .....	56
Obr. 43: Výbrus pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou .....	58
Obr. 44: Výbrus pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou s ultrazvukem.....	61
Obr. 45: Výbrus pájeného spoje s Sn93Ag6,5Cu0,5.....	63
Obr. 46: Výbrus pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou.....	65
Obr. 47: Výbrus pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pastou.....	67
Obr. 48: Výbrus pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pastou .....	69
Obr. 49: Výbrus pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou .....	71
Obr. 50: Výbrus pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou.....	73
Obr. 51: Výbrus pájeného spoje s Sn93Ag6,5Cu0,5.....	75
Obr. 52: Výbrus pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pastou.....	77
Obr. 53: Výbrus pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pastou .....	79
Obr. 54: Výbrus pájeného spoje s Sn93Ag6,5Cu0,5 s bezolovnatou pastou .....	81



## Seznam tabulek

Tabulka 1: Příklady používaných bezolovnatých pájek.....	35
Tabulka 2: Seznam použitých kombinací pájek, past a povrchových úprav.....	39
Tabulka 3: Hodnoty síly v tahu pro měděnou povrchovou úpravu.....	43
Tabulka 4: Hodnoty síly v tahu pro zlatou povrchovou úpravu.....	43
Tabulka 5: Hodnoty síly v tahu pro povrchovou úpravu s HALem.....	43
Tabulka 6: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pájecí pastou.....	57
Tabulka 7: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou.....	59
Tabulka 8: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou s ultrazvukem.....	61
Tabulka 9: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s Sn93Ag6,5Cu0,5.....	64
Tabulka 10: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou.....	66
Tabulka 11: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pastou.....	68
Tabulka 12: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pastou.....	70
Tabulka 13: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou.....	72
Tabulka 14: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou.....	73
Tabulka 15: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s Sn93Ag6,5Cu0,5.....	76
Tabulka 16: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s olovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pastou.....	78
Tabulka 17: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou pájeného spoje s bezolovnatou aktivní slitinou a bezolovnatou pastou.....	80
Tabulka 18: Koncentrace prvků získaná materiálovou analýzou u pájeného spoje s Sn93Ag6,5Cu0,5 s bezolovnatou pastou.....	82