

## OPTIMALIZACE PROCESU PÁJENÍ MĚDĚNÝCH KOMPONENT GENERÁTORU

Danuše Klauberová

### ABSTRAKT

Diplomová práce řeší problematiku technologie tvrdého ručního pájení plamenem a indukčního pájení u pájených spojů dvou různých typů generátorových komponent tzv. průchodek. Oba typy generátorových komponent jsou součástí statorového vinutí generátoru, určeného pro jadernou elektrárnu. Průchodkami prochází chladicí médium, z toho důvodu je kvalita (těsnost) pájených spojů velmi důležitá. Jedná se o pájení mosazných hrdel ČSN 42 3223 a také měděných trubek ČSN 42 3001 vsazených do otvorů v mědi ČSN 42 3001. Proces se musí řídit normami ČSN EN 13 133 - Tvrdé pájení – Zkouška postupu páječe a ČSN EN 13 134 - Tvrdé pájení – Zkouška postupu pájení. Pro všechny pájené spoje se používá jako přídatný materiál stříbrná pájka Ag45CuZn, která pro pájení mědi a jejich slitin zcela vyhovuje. Pájené spoje jsou pájeny různými tavidly určené pro tvrdé pájení, které se následně vyhodnocují. Vyhodnocuje se pomocí výsledků vizuální kontroly podle normy ČSN EN ISO 18 279 – Tvrdé pájení – Vady v pájených spojích, metalografie, měření tloušťky difúzní oblasti a mikrotvrdot dle Vickerse. Cílem diplomové práce je zhodnocení a porovnání pájených spojů zhotovené různými tavidly, popřípadě návrh nových technologií.

### KLÍČOVÁ SLOVA

Tvrdé pájení, indukční pájení, induktor, pájení plamenem, generátor, měď, mosazná hrdla, stříbrná pájka, tavidlo, difúzní oblast, rovnoměrný ohřev, pájecí mezerka.

### 1. ÚVOD

V diplomové práci je řešena problematika pájených spojů dvou různých typů generátorových komponentů a to:

1. Nulová průchodka - pájení spoje se provádí indukčním ohřevem;
2. Fázová průchodka – pájení spoje se provádí ohřevem kyslíkoacetylenovým plamenem.

Oba typy generátorových komponentů jsou součástí statorového vinutí generátoru, určeného pro jadernou elektrárnu. Generátor má kombinované chlazení vodou a vodíkem. Z toho důvodu je kvalita (těsnost) pájených spojů velmi významná. Statorové vinutí je napojeno trubkami na průchodky, které jsou umístěny na výstupu generátoru.

Fázová průchodka je pod napětím a je umístěna v horní části na boční stěně kostry generátoru a má dvě funkce: elektrické spojení výstupu generátoru do sítě a současně izolaci od kostry generátoru tj. těsnost mezi vnějším a vnitřním prostředím kostry statoru. Pokud je stator chlazen vodíkem, průchodka musí zabránit průniku vodíku ven z kostry a naopak průniku vzduchu do kostry do chladicího systému. Těsnící funkce průchodky závisí na kvalitě pájeného spoje a je velice důležitá z bezpečnostního hlediska provozu stroje. V případě úniku vodíku ze stroje, dojde k poklesu tlaku vodíku. Tento stav je při stanoveném limitu signalizován a dochází k automatickému odpojení generátoru. Nulová průchodka se liší od fázové průchodky pouze tím, že přes ni prochází proud a je umístěna ve spodní části na boční stěně kostry generátoru. V nulové průchodce protéká voda jako chladicí médium.

Spoje obou průchodek jsou mechanicky namáhané, jednak v oblasti vysokocyklové únavy v důsledku vibrací čel vinutí (frekvence 100Hz) a jednak v oblasti nízkocyklové únavy v důsledku dilatačních posuvů celého vinutí tj. rozběh a odstavení generátoru. Těsnost pájených spojů komponent je podrobena tlakové zkoušce vodou. Průchodka se následně izoluje.

### 2. FYZIKÁLNÍ PODSTATA PÁJENÝCH MATERIÁLŮ [2]

Pájení je definováno jako způsob metalurgického spojování kovových součástí roztavenou pájkou, přičemž pájené plochy nejsou nataveny, ale jen smáčeny použitou pájkou. První podmínkou je dobrá smáčivost spojovaného materiálu tekutou pájkou. Povrchové atomy základního materiálu a tekuté pájky se přitom dostanou do tak malé vzdálenosti, že se vytvoří podmínky pro účinek adhezních a kohezních sil. Nejčastěji přitom dojde i k vzájemnému rozpouštění a difúzi některých prvků spojovaných materiálů. Vlivem kapilárního tlaku, nastává tečení pájky v mezeře spoje všemi směry. Většina technologických postupů pájení využívá k tvorbě spoje působení kapilárních sil.

Základní předpoklady vzniku pájeného spoje:

1. Základní materiál, pájka, tavidlo, musí být ohřáty na pracovní teplotu.
2. Základní materiál a pájka musí mít dobrou smáčivost a vzlinavost.

Podle teploty tavení pájky rozdělujeme pájení na:

1. měkké pájení - teplota tavení pájky pod 450 °C
2. tvrdé pájení - teplota tavení nad 450 °C
3. vysokoteplotní pájení - v ochranném plynu nebo ve vakuu nad 900°C.

## 2.1. Struktura pájeného spoje [2]

Ve většině případů se vytvoří přechodové oblasti, které mají jiné chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti než spojované materiály. Přechodová oblast má rozhodující vliv na vlastnosti a kvalitu pájeného spoje.

Vlastnosti pájeného spoje jsou výrazně ovlivňovány přítomností intermedieálních fází. Jejich vznik na hranici základního materiálu a pájky může probíhat:

- vzájemnou reakcí tekuté pájky a základního materiálu,
- částečným rozpouštěním základního materiálu s následným vyloučením intermedieální fáze na hranici pevného základního materiálu. Primárně vyloučená fáze se může např. změnit v jiný typ,
- ochlazováním pájeného spoje nebo jeho tepelným zpracováním.

Čím je větší vzájemná rozpustnost prvků pájky a základního materiálu, tím je přechodová oblast širší.

Difúze v pájeném spoji mění chemické složení pájky a základního materiálu a vytváří přechodové oblasti. Její tloušťka vzrůstá s teplotou a dobou pájení. Ve srovnání se základním materiálem a pájkou je obvykle křehčí. Je proto žádoucí vytvořit tuto vrstvu jen tak tlustou, aby spoj byl pevný, ale nikoliv křehký.

## 3. SPOJOVANÉ MATERIÁLY

### 3.1. Měď [1]

Měď - ČSN 42 3001 - značka Cu 99,9E, elektrovodná, tab. 1.

MĚĎ ČSN 42 3001		
Cu [hm. %]	Pb [hm. %]	O <sub>2</sub> [hm. %]
99,9	0,05	0,06

Tab. 1.: Chemické složení mědi

Měď má značku Cu, kubickou plošně centrovanou mřížku, teplotu tavení 1083 °C a měrnou hmotnost 9,800kg.dm<sup>-3</sup>. Je načervenalé barvy. Měď je odolná proti oxidaci, reaguje však se sírou. Hlavními nečistotami v mědi je kyslík, fosfor a železo. Měď vyniká elektrickou vodivostí. Zároveň má i velmi dobrou tepelnou vodivost. Elektrická vodivost klesá s množstvím nečistot (zejména P a S) a s rostoucí teplotou a tvářením za studena. Natvrdo lze pájet měď, která obsahuje kyslík O<sub>2</sub> v rozmezí 0,06 - 0,1 hm.%. Při vyšším obsahu kyslíku vzniká ve vodíkovém prostředí tzv. vodíková nemoc (vodní pára narušuje souvislost krystalů, což se projeví tvorbou mikrotrhlin nebo povrchovými prasklinami základního materiálu vedle spoje). Z uvedeného důvodu je nutno použít při pájení plamenem plamen neutrální.

### 3.2. Mosaz [1]

Mosaz - ČSN 42 3223, tab. 2.

SLOŽENÍ - MOSAZ ČSN 42 3223					
Cu [hm. %]	Pb [hm. %]	Fe [hm. %]	Sn [hm. %]	Příměsi [hm. %]	Zn [hm. %]
56,5-60	1,0-2,5	Max 0,5	max 0,3	max 1	zbytek

Tabulka 2: Chemické složení mosazi

Základem mosazi je binární soustava Cu-Zn patřící k fázově nejsložitějším. Mosazi se vyrábějí jako slitiny jednoduché nebo speciální, obsahující legury pro dosažení určitých vlastností.

Mosaz pájíme většinou stříbrnými pájkami, neboť je zde zaručená dobrá a rychlá smáčivost. V důsledku vzájemné difúze a rozpustnosti se vytvoří na přechodu vrstva krystalů  $\alpha$ . Při pájení mosazi je důležité zabránit vypařování zinku ze základního materiálu a pájky, neboť vypařování zinku začíná nad teplotou 600 °C a je tím intenzivnější, čím vyšší je pájecí teplota a obsah zinku v mosazi. Poněvadž ohřátý základní materiál a tekutá pájka mají schopnost absorbovat při pájení plyny z redukční atmosféry nebo plamene, vznikne nežádoucí pórovitost spoje. Pokud jde o chemicko-fyzikální vlastnosti pájených se však spojí u mosazí, je korozní odolnost dvoufázových mosazí menší než jednofázových. Fáze tvoří totiž neušlechtilou složku náchylnou k selektivní korozi.

### 3.3. Pájení kombinovaných materiálů [2]

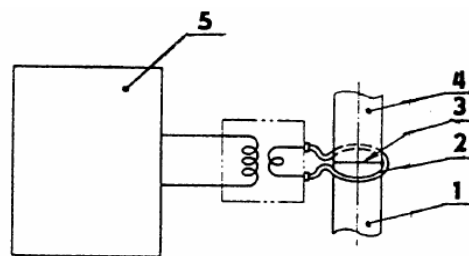
Při pájení dvou různých materiálů vznikají většinou obtíže způsobené jejich rozdílnými fyzikálními, chemickými a mechanickými vlastnostmi. Je to způsobeno neostatečnou smáčivostí použité pájky některého z dvojice spojovaných materiálů ať již v důsledku neúčinné ochranné nebo redukční atmosféry nebo tavidla, nebo nerovnoměrnou teplotou pájení, nebo i důsledkem velké změny šířky mezery ve spoji.

Jestliže mají materiály značně rozdílné součinitele tepelné roztažnosti, vznikají vnitřní pnutí, deformace, v některých případech i trhliny. Při ohřevu se oba materiály volně roztahují. Při ochlazování se však materiál s vyšším součinitelem tepelné roztažnosti smršťuje více než materiál s nižším součinitelem tepelné roztažnosti. Při ztuhnutí pájky vznikne určitá soudržnost spoje a tak se zabrání volnému smršťování jednotlivých materiálů.

## 4. POUŽITÉ TECHNOLOGIE

### 4.1. Indukční ohřev

Při indukčním pájení teplo vzniká elektrickou indukcí, která umožňuje bezdotykový elektrický ohřev součásti na teplotu pájení. V oblasti spoje je třeba dosáhnout rovnoměrného ohřevu obou spojovaných součástí na pracovní teplotu pájení. Provádí se pomalý ohřev, aby došlo k rovnoměrnému ohřátí celého průřezu pájeného spoje—obr. 1.



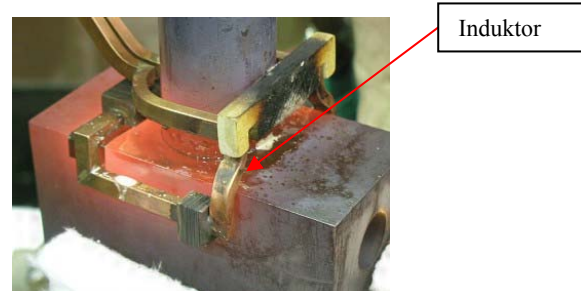
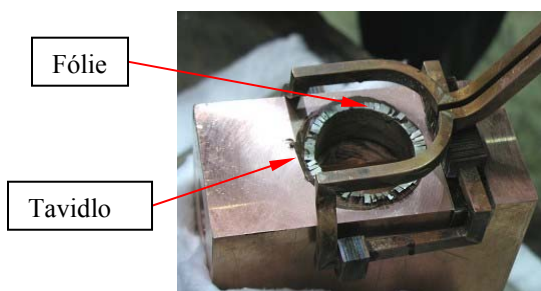
1. Pájený materiál, 2. Induktor, 3. Pájený spoj, 4. Pájený materiál, 5. Generátor

**Obrázek 1: Indukční tvrdé pájení**

Indukční ohřev je založen na principu transformátoru. Indukční cívkou (induktorem) protéká elektrický proud  $I$  o napětí  $U$ . Tím se vytvoří střídavé magnetické pole, které je uvnitř cívky silnější než na její vnější straně. Jestliže se vloží do vnitřního prostoru cívky (induktoru) elektricky vodivá součást, potom působí cívka (induktor) jako primární vinutí a vložená součást jako sekundární vinutí spojené nakrátko. Cívka indukuje ve vložené součásti vířivé proudy, jejichž působením vzniká teplo. Tímto teplem se ohřívá vložená součást. Cívka je většinou z měděné trubky, v níž cirkuluje voda, která ji ochlazuje.

Účinnost indukčního ohřevu závisí na použitém generátoru a na druhu ohřívaného materiálu. Je-li ohřívána součást magnetická, je ohřev rychlejší, protože zde působí kromě vířivých proudů ještě magnetická hystereze. Naproti tomu při indukčním ohřevu nemagnetických kovů (Cu, Al,...) je ohřev pomalejší, protože ho vyvolávají pouze vířivé proudy.

Indukční pájení se provádí ve dvou krocích. Nejprve se zapájí měděná trubka do tělesa z mědi a pak následuje zapájení mosazného hrdla. Před pájením se provádí rozměrová kontrola průměru otvoru a průměru trubky pro dodržení předepsané vůle (pájecí mezery). Po očištění povrchu se na povrch natře tavidlo BrazeTec h, do pájecí mezery se vloží folie B-Ag60CuZn o tloušťce 0,1mm po celém obvodu – obr. 2. Folie je z jedné strany nastříhnutá, aby lépe po celé kruhové délce otvoru přiléhala na stěnu. Na generátoru Elva se nastaví teplota 700 °C a zahájí se ohřev obr. 3. Po dosažení pracovní teploty pájky 750/790 °C v místě spoje se přiloží pájka, která se začne smáčet a vyplňovat pájený spoj. Ohřev trvá pro zapájení měděné trubky cca 15 minut a pro pájení mosazného hrdla cca 8 minut. Po zapájení následuje očištění ponorem do lázně pokojové teploty voda + líh v poměru 2:1.



**Obrázek 2: Stav otvoru před zapájením Obrázek 3: Vsazení měděné trubky, ohřev induktorem**

## 4.2. Pájení plamenem

Místo spoje se ohřívá energií spalovaného hořlavého plynu se vzduchem nebo kyslíkem. Pájení plamenem je vhodné pro opravy, údržbu, montáž zejména pro kusovou výrobu tvarově rozměrnějších dílů. V těchto případech převládá ruční způsob. Výhoda pájení plamenem v porovnání s ostatními metodami je především v nízkých investičních nákladech na pájecí zařízení a příslušenství. Aby se při pájení plamenem zabránilo značným ztrátám energie vyzařováním a vedením tepla, je nutno provádět ohřev rychle a rovnoměrně nejlépe několika hořáky. Při nerovnoměrném ohřevu nastane důsledkem vysokého součinitele tepelné roztažnosti mědi zmenšení mezery spoje. Lze tomu zabránit buď pevným upnutím dílů, nebo se pájené díly v ohřátém stavu upraví tak, aby vznikla při pájení optimální mezera 0,1 mm.

Pracovní postup ručního pájení plamenem závisí na typu spoje. Vzorky jsou upraveny pro pájení hrdel z obou stran. Hrdla jsou mosazná, a na hrdlech je vysoustružen závit. Ohřev je zajištěn dvěma hořáky působící na trubku proti sobě - obr.4. Do místa spoje se štětcem nanese tavidlo. U vzorku č.3 je použito tavidlo HF Flux a u vzorku č. 4 je použito Braze Tec Special H. Pak se vloží fólie B-Ag45CuZn (je-li použita) do pájecí mezery a je zahájen ohřev, který trvá cca 5min. Po dosažení pracovní teploty pájky 750/790 °C v místě spoje se přiloží pájka, která se začne smáčet a vyplňovat pájený spoj. Po zapájení následuje očištění ponorem do vodní lázně pokojové teploty.

Cu a slitiny lze pájet pokud Cu má obsah kyslíku O<sub>2</sub> od 0,06 až 0,1 hm.%. Při vyšším obsahu vzniká v redukční atmosféře (plamene) vodíková nemoc proto nelze pájet v redukční atmosféře, ale je nutno použít plamen neutrální s poměrem O<sub>2</sub>:C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 1:1 nebo 1,1:1.



Obrázek 4: Pájení plamenem

## 5. EXPERIMENTÁLNÍ VYHODNOCENÍ

K dispozici jsem dostala 2 průchodky stejného typu zhotoveny plamenovým pájením a jednu průchodku spojovací pas+objímka zhotoveno indukčně – tab. 3.

	Průchodka č.2	Průchodka č. 3	Průchodka č. 5
Metoda pájení	<b>Indukční pájení</b>	<b>Plamenové pájení</b>	<b>Plamenové pájení</b>
Pájka	B-Ag45CuZn	B-Ag45CuZn	B-Ag45CuZn
Tavidlo	Braze Tec h	Braze Tec Special h	HF Flux
Fólie	B-Ag60CuZn	B-Ag60CuZn	B-Ag60CuZn

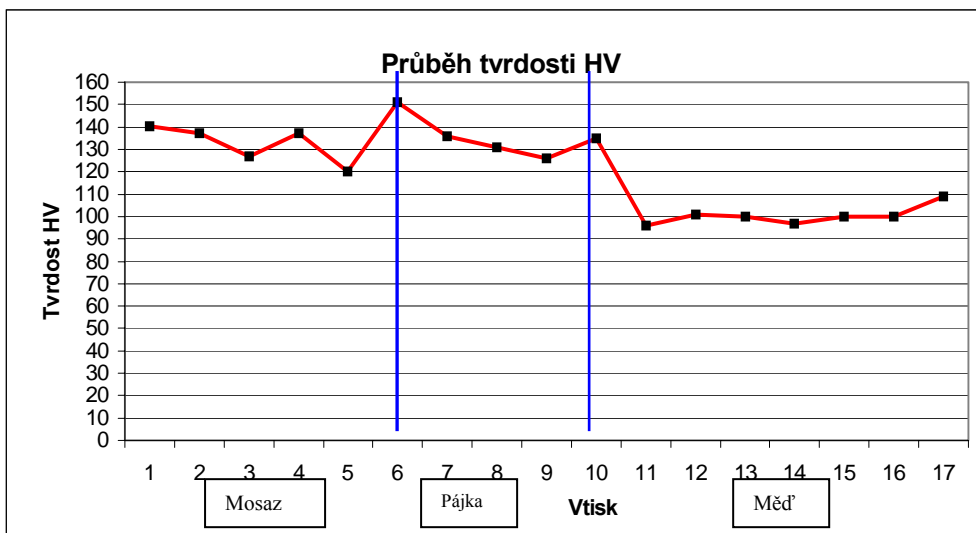
Tabulka 3: Použití technologie, pájek, tavidel, folie

### 5.1. Zkouška mikrotvrdomosti

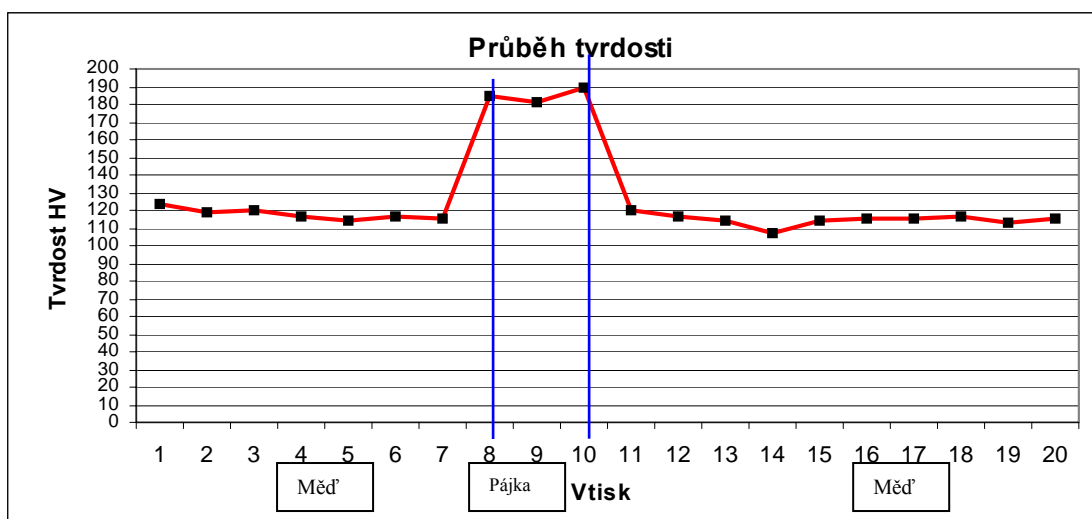
Zkouška mikrotvrdomosti se provádí podle *Vickerse* – EN ISO 6507-1 na tvrdoměru Vickers typu Stuers Duramin. Přesné porovnání hodnot tvrdosti je možné pouze při použití stejné metody a stejného zkušebního zatížení. Tvrdost byla měřena při zatížení 50g a době působení zatížení 15 s na všech vzorcích.

Tvrdost byla změřena celkem na čtyřech zkušebních vzorcích. Ze vzorku průchodka č.2, která je pájena indukčně jsem zhotovila dva zkušební vzorky. Z průchodek č. 3 a č.5 jsem zhotovila po jednom zkušebním vzorku.

Charakter průběhu mikrotvrdomosti ve všech zkušebních vzorcích je podobný. Na obr. 5 je graf průběhu mikrotvrdomosti ve vzorečku 3 spojení mosaz + měď, a na obr. č. 6 je graf průběhu mikrotvrdomosti ve vzorečku č. 2 spojení měď+měď. Z těchto grafů vyplývá, že došlo v obou případech k rovnoměrnému ohřevu, poněvadž průběh tvrdosti v základním materiálu nevykazuje žádné velké skokové změny. V oblasti přechodové tzv. difúzní oblasti je tvrdost vyšší než v základním materiálu a pájce. Je zde nebezpečí vzniku intermediálních křehkých fází.



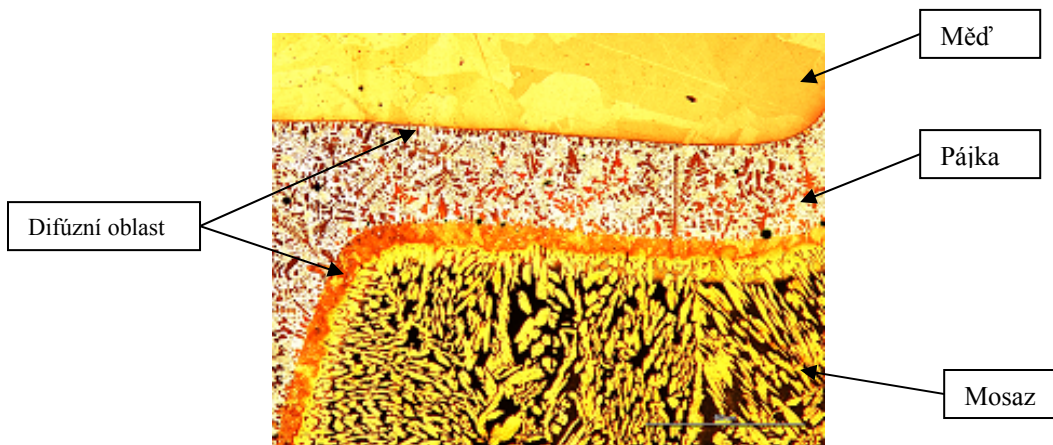
Obrázek 5: Průběh mikrotvrlosti ve zkušební vzorku č. 3, spojení mosaz + měď



Obrázek 6: Průběh mikrotvrlosti ve zkušební vzorku č. 2, spojení měď + měď

## 5.2. Metalografie pájených spojů

Broušením, leštěním a leptáním byl vzorek připraven na metalografické zhodnocení pod světelným mikroskopem. Názorná fotografie je na obr. 7.



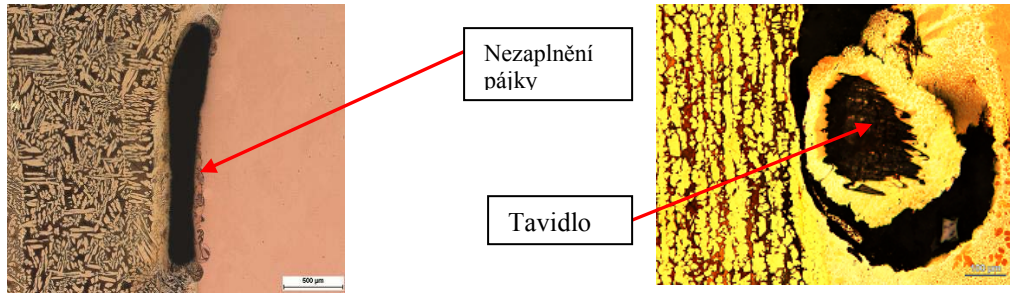
Obrázek 7: Metalografický výbrus, zvětšeno 5x

### 5.3. Vizuální kontrola – Vady pájených spojů

Při hodnocení pájitelnosti materiálů vycházíme z toho, že pájený spoj musí mít takové užité vlastnosti, jež jsou od něho v provozu požadovány. Přítomnost různých vad v pájeném spoji více nebo méně ovlivňuje jeho užité vlastnosti. V praxi není možné dosáhnout dokonalého pájeného spoje bez vad. Jejich povolený rozsah a množství bude různé podle požadavků, které jsou kladeny provozem na pájený spoj.

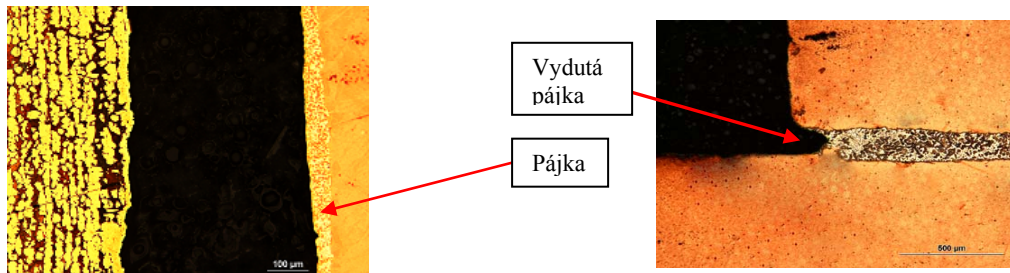
Z hlediska poklesu mechanických vlastností pájeného spoje jsou nejvíce nebezpečné plošné vady, protože vyvolávají velkou koncentraci napětí.

Na obr. 8, 9, 10, 11 jsou vady vyskytující se v pájených spoji zkoumaných průchodek. Tyto vady byly vyhodnoceny podle ČSN EN ISO 18 279 jako vyhovující.



Obrázek 8: Nezaplnění pájky

Obrázek 9: Tavidlo v mezeře pájeného spoje

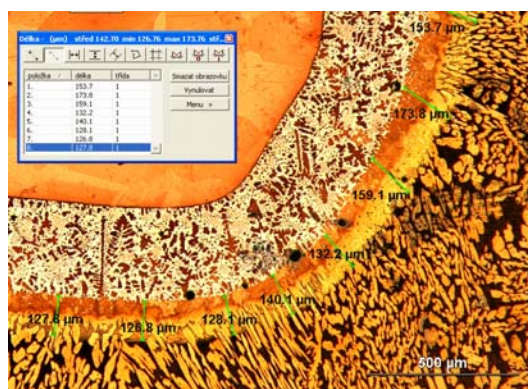


Obrázek 10: Likvace pájky

Obrázek 11: Vydutá pájka

### 5.4. Měření tloušťky difúzní oblasti

Difúzní oblast je nejdůležitější oblast spoje z pevnostního hlediska. Tloušťka vzrůstá s teplotou a dobou pájení. Ve srovnání se základním materiálem i pájkou je obvykle křehčí. Cílem je vytvořit ji jen tak tlustou, aby spoj byl pevný, ne křehký. Předběžné výsledky měření difúzní oblasti ve zkušebním vzorku č. 3 je znázorněno na obr. 12. Tato měření budou ještě předmětem zkoumání.



Obrázek 12: Měření difúzní oblasti v programu Lucie

Difúzní oblast	průměrná šířka
Celková šířka	143 $\mu\text{m}$
Difúzní oblast od pájky	73 $\mu\text{m}$
Difúzní oblast od mosazi	70 $\mu\text{m}$

**Tabulka 4: Hodnoty měření difúzní oblasti**

## 6. ZÁVĚR

V pájených spojích budu ještě zkoumat a měřit difúzní oblast, a následně vyhodnocovat, zda difúzní oblast je či není vadou. Zkušební vzorky budou ještě podrobeny analýze chemického složení. Analýza se zaměří na difúzní oblast a nejbližší okolí. Po provedení těchto kroků mohu pak vyhodnotit které tavidlo je nejvíce vyhovující, popř. na základě těchto poznatků mohu navrhnout novou technologii.

## LITERATURA

- [1] Kříž, A.: Cu a její slitiny (podklady v elektronické verzi)
- [2] Ruža, V.: Pájení: SNTL 1988
- [3] Barták, J.; Kovařík, R. ; Pilous, V. a kol.: Učební texty pro evropské svařečské specialisty, praktiky a inspektory, Ostrava 2006, Zeross
- [4] ČSN EN 13 133 - Tvrde pájení – Zkouška postupu páječe
- [5] ČSN EN 13 134 - Tvrde pájení – Zkouška postupu pájení
- [6] ČSN EN ISO 18 279 – Tvrde pájení – Vady v pájených spojích

Danuše Klauberová, tř. 1. máje 688, 334 01 Přeštice, tel.: +420602260544, email: d.klauberova@seznam.cz