

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Pájené spoje vinutí elektrických točivých strojů**

**vedoucí práce: Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.  
autor: Bc. Jan Salzman**

**2012**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan SALZMAN**  
Osobní číslo: **E10N0052P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Pájené spoje vinutí elektrických točivých strojů**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte obecné aspekty pájení a pájených spojů v technologii točivých elektrických strojů.
2. Prostudujte a uveďte možnosti pájení vinutí u rotorů točivých elektrických strojů hladkých i s vyniklými póly.
3. Navrhněte diagnostický systém pro kontrolu kvality pájených spojů v točivých elektrických strojích.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

1. Ruža, V.: Pájení, SNTL 1988
2. Elektronické informační zdroje

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 17. října 2011  
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2012

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na principy měkkého a tvrdého pájení na pájených spojích vinutí elektrických točivých strojů. Dále jsou popsány způsoby ohřevu pro dosažení vhodné teploty pro tvrdé pájení. Značná část práce je věnována nedestruktivním metodám se zaměřením na pájené spoje elektrických točivých strojů. Na závěr je doporučení vhodné metody diagnostiky a kontroly kvality pájeného spoje pro výkonové točivé stroje společnosti 1. SERVIS ENERGO, s. r. o.

## **Klíčová slova**

měkké pájení, tvrdé pájení, tvrdá pájka, tavidlo pro tvrdé pájení, odporový ohřev, indukční ohřev, plamenový ohřev, nedestruktivní zkoušení, ultrazvuková defektoskopie

## **Abstract**

The diploma thesis is focused on the principles of soldering and brazing at the soldered winding joints of electrical rotary machines. It also describes the ways of heating up to achieve a suitable temperature for brazing. A significant part of this thesis is aimed at non-destructive methods focusing on the solder joints of electrical rotating machines. In the end of the thesis, the appropriate method of diagnostics and the quality assurance of a soldered joint for electrical rotary machines of the company 1. SERVIS ENERGO Ltd. is recommended.

## **Key words**

soldering, brazing, brazing filler metal, flux for brazing, resistance heating, induction heating, flame heating, non-destructive testing, ultrasonic defectoscopy

## **Prohlášení**

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

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne 10. 05. 2012

Podpis autora

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Václavu Mentlíkovi, CSc. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

Zároveň bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Novákovi za veškerou pomoc při hledání informací a poskytnutí daných materiálů a všem zúčastněným, kteří mi poskytli informace a rady z praxe.

# Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 PÁJENÍ</b> .....	<b>12</b>
1.1 PÁJENÝ SPOJ .....	12
1.2 MĚKKÉ PÁJENÍ .....	12
1.2.1 Pájka pro měkké pájení.....	12
1.2.2 Tavidlo pro měkké pájení.....	13
1.3 TVRDÉ PÁJENÍ .....	13
1.3.1 Pájka pro tvrdé pájení.....	14
1.3.2 Tavidlo pro tvrdé pájení.....	21
<b>2 PÁJENÍ VINUTÍ</b> .....	<b>24</b>
2.1 ODPOROVÝ OHŘEV .....	24
2.2 INDUKČNÍ OHŘEV .....	26
2.3 PLAMENOVÝ OHŘEV .....	30
<b>3 DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM PRO POSOUZENÍ KVALITY PÁJENÉHO SPOJE</b>	<b>31</b>
3.1 VADY V PÁJENÝCH SPOJÍCH .....	31
3.1.1 Destruktivní zkoušení .....	31
3.1.2 Nedestruktivní zkoušení.....	32
3.2 ZKOUŠENÍ POMOCÍ ULTRAZVUKU.....	35
3.2.1 Obecné vlastnosti ultrazvuku .....	36
3.2.2 Ultrazvuk pro nedestruktivní defektoskopii.....	40
3.3 SOUČASNÝ DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM KONTROLY KVALITY PÁJENÝCH SPOJŮ VE SPOLEČNOSTI 1. SERVIS ENERGO A NÁVRH K JEHO ZLEPŠENÍ .....	43
3.3.1 Doporučené doplnění diagnostického systému kontroly kvality pájených spojů.....	43
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>48</b>



<b>LITERATURA.....</b>	<b>49</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>51</b>
<b>PŘÍLOHA Č. 1 – VÝROBA PÁJENÉHO SPOJE PLAMENOVÝM OHŘEVEM .....</b>	<b>I</b>
<b>PŘÍLOHA Č. 2 – UDĚLENÍ SOUHLASU S CITACÍ NOREM.....</b>	<b>IX</b>

## Úvod

Hlavním cílem této diplomové práce je popsat možnosti pájení elektrických točivých strojů a kontrolu jakosti takto spájených spojů.

Z tohoto důvodu práce nejdříve pojednává o základech pájení a jeho hlavním rozdělení na pájení měkké a tvrdé. Hlavní zřetel je zde brán na tvrdou metodu pájení, která se využívá při spojování závitů, cívek, či celého vinutí ve výkonových elektrických točivých strojích. Je zde vysvětleno označování tvrdých pájek podle ČSN EN ISO 17672:2010 a další použité literatury. Následuje členění tvrdých pájek do sedmi hlavních bází, například pájky na bázi mědi či na bázi stříbra. U všech bází jsou popsány hlavní prvky složení, příklady konkrétních pájek, jejich vlastnosti, pracovní teploty, vhodné použití a výhody či nevýhody.

Podobně formulované je i popsání tavidel pro tvrdá pájení, která spravuje ČSN EN 1045:1999. Tavidla mají také svá speciální členění podle pracovních teplot a podle možností použití. Dále se mohou lišit ve složení a způsobech odstranění po skončení pájení.

Poté jsou v práci uvedeny tři základní způsoby ohřevu, pomocí kterých lze získat požadovanou teplotu nutnou pro roztavení příslušné tvrdé pájky. Jedná se o odporový ohřev, kde se teplota reguluje zpravidla proudem a časem, dále indukční ohřev, zde je teplota dobře regulována pomocí frekvenčního měniče a času ohřevu, a představitel třetího ohřevu je plamenový ohřev, kde je teplota závislá nejvíce na čase ohřevu a poměru hořlavé směsi. Plamenové pájení je také graficky znázorněno v příloze č. 1. této diplomové práce.

Diagnostickým systémem pro zjišťování vad v pájených spojkách a jejich hledáním se zabývá třetí kapitola této práce. Zde je zjišťování vad rozděleno do dvou hlavních metod zkoušení – na destruktivní a nedestruktivní zkoušení. Práce především popisuje možnosti nedestruktivního zkoušení pájených spojů z důvodu kompletnosti vyráběných zařízení, které mají ve společnosti svůj účel a je nutná jejich vysoká kvalita. Pomocí těchto zkoušek lze posunout kvalitu spojů o úroveň výše a díky tomu snížit podíl zmetkovosti ve výrobě, což má za následek i snížení výrobních ztrát podniku. Tato kapitola se opírá o informace z české technické normy, která popisuje nedestruktivní zkoušení tvrdých pájených spojů - ČSN EN 12799:2002 a také o interní informace společnosti ADVANCED TECHNOLOGY GROUP, s. r. o. V kapitole je popsáno několik metod nedestruktivního zkoušení a z těch jsou vybrány ty metody, které se jeví pro kontrolu kvality pájených spojů sloužících k elektrickým účelům jako nejvhodnější. Nejvíce je zde rozebrána metoda ultrazvukové defektoskopie, která je

relativně jednoduchá, časově nenáročná, poskytuje poměrně dobrý přehled o vadách a hlavně zjišťuje vady vnitřní, které jsou pro kvalitu pájených spojů zásadní.

# 1 Pájení

Pod termínem pájení si lze představit druh spojování součástí, tzv. metalurgické spojování. Cílem pájení je nerozebíratelný spoj. Ten slouží k mechanickému spojení nebo hlavně k průchodu elektrického proudu, který je ideálně v příslušném místě bezztrátový. Při teplotách do 450 °C se hovoří o měkkém pájení, při vyšších teplotách o pájení tvrdém. [1] Mezník 450 °C není jednoznačný, v některé literatuře se také hovoří o teplotě 400 °C [2], v další například i o 350 °C [3].

Výhody pájení spočívají v ohřevu spojovaného materiálu na nižší úroveň než u svařování a díky tomu je pájení ekonomické z hlediska spotřebovaného času a energie pro výrobu spoje. Navíc při správném postupu pájení je spoj vysoce kvalitní a jeho následné opracování nevyžaduje oproti svařování tolik úsilí (záleží na druhu tavidla, pájky a teploty pájení - popsáno níže).

## 1.1 Pájený spoj

Pájený spoj vzniká pomocí roztavení přidaného materiálu – tzv. pájky. Na rozdíl od svařování se spojovaný materiál netaví, taví se jen pájka. Před vytvořením pájeného spoje musí být místo opatřeno příslušným tavidlem, které slouží k odstranění nečistot. Poté pájka, která se pomocí tepelných účinků roztaví, vyplní mezeru mezi součástmi a navzájem je propojí. Vzniká zde jistá nehomogenita mezi materiály – vlastnosti pájky a základního materiálu nejsou stejné. Dále vzniká riziko špatně zkonstruovaného spoje, které je závislé na nespočet faktorů (přechodové děje, vodivost, pevnost, korozivzdornost, aj.).

## 1.2 Měkké pájení

Toto pájení využívá nízkou teplotu tavení pájky. Teplota nepřesahuje hodnotu 450 °C. Hlavní využití této metody je ve spojování elektronických obvodů. Spojování lze provést manuálně (pomocí transformátorové páječky, pájecí stanice) nebo plně automaticky (pájení vlnou, v peci, přetavením). Pájený spoj se vyznačuje oproti tvrdému pájení relativně malou pevností a využívá se u zařízení málo teplotně namáhaných. [1]

### 1.2.1 Pájka pro měkké pájení

Velice hojně se využívá slitina cínu a olova. Pro elektronické účely bývá obsah cínu Sn 61,9 % a olova Pb 38,1 %. Teplota tání této slitiny je při 183 °C. Dále se používají slitiny jiných kovů, např. kadmia, zinku, antimonu, bismutu, které mají různé pracovní teploty.

V současné době je tendence odstranění používání těžkých kovů ve výrobě, kvůli toxickým vlastnostem na životní prostředí. Dochází k využívání tzv. bezolovnatých pájek, které jsou ale dražší – např. slitiny Sn/Ag/Cu s vyšší teplotou tavení (kolem 217 °C), nicméně ekologicky nezávadné. Kadmiové pájky se používají jen ve speciálních případech. [1], [2], [4]

### 1.2.2 Tavidlo pro měkké pájení

Tavidla pro měkké pájení se rozdělují na tavidla s leptacím účinkem a bez leptacího účinku.

S leptacím účinkem – tavidla anorganická obsahují zředěnou kyselinu solnou případně fosforečnou, chloridy alkalických kovů a chlorid zinečnatý, který je základní částí tavidla. Teplota tání závisí na chemickém složení tavidla a přísadě dalších složek. Organická tavidla se používají pro pájení mědi a oceli. Zbytky tavidla se musejí odstranit. Např. roztokem kyseliny octové. [1]

Bez leptacího účinku – tavidla organická se používají tam, kde nelze zbytky tavidla odstranit, a tím pádem by anorganická tavidla způsobovala korozi materiálů. Základním prvkem organických tavidel je přírodní pryskyřice – kalafuna. Ta poskytuje ochranu proti korozi, avšak ve vlhkém prostředí se musí zabránit tvorbě plísní na jejím povrchu. Reakční působení tavidla se pohybuje v intervalu od 180 do 250 °C. Při překročení 250 °C kalafuna přestává působit a vypařuje se. Tavidlo je vhodné pro pájení mědi, stříbra, mosazí, nevhodné je však pro ocel. Zbytky se mohou odstranit běžnými rozpouštědly, ale není to nutné. [1]

### 1.3 Tvrdé pájení

Využití tvrdého pájení je především u spojů, které jsou často mechanicky, tepelně a elektricky namáhány. Pájení se může využívat na pouhé mechanické spojení materiálů, např. spojování ocelí, k výrobě tlakových nádob, jemných přístrojů, teplotně namáhaných zařízení do cca 200 °C, v zubním lékařství a zlatnictví. Dále se tvrdá metoda využívá pro pájení okapových systémů, měděných trubek při instalaci teplé a studené vody, rozvodu plynu, apod. V této diplomové práci je brán hlavní zřetel na pájení mědi, jakožto vodivého prvku pro výrobu vinutí v elektrických točivých strojích. [1]

Teplota, kdy se hovoří o tvrdém pájení, se pohybuje přibližně od hodnoty 450 °C, teoreticky až do hodnoty, dokud se nezačne tavit spojovaný materiál. Teplota pájení je závislá především na teplotě tavení dané pájky.

### 1.3.1 Pájka pro tvrdé pájení

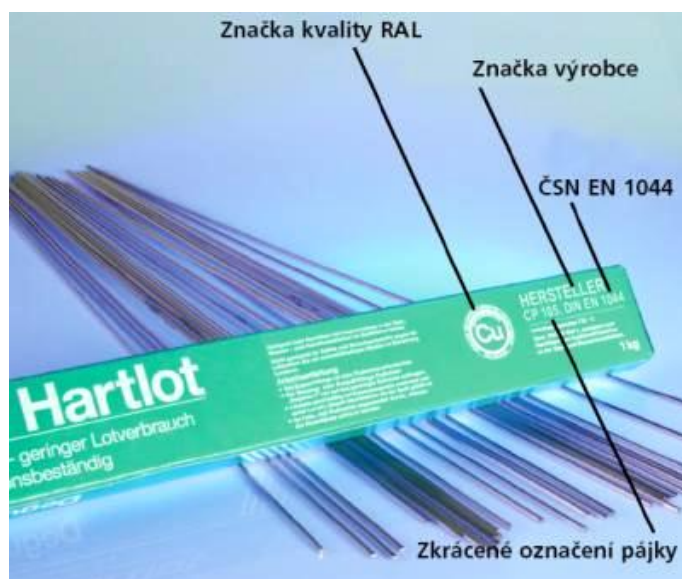
Pájky pro tvrdé pájení můžeme všeobecně rozdělit na pájky na bázi mědi, stříbra, niklu, palladia, hliníku, a pájky z drahých kovů. Některé pájky se využívají spíše na spojování ocelí, pro mechanické a jiné účely (např. B - Cu - 1085, B - Ni76CrP - 888/890, B - Pd60Ni - 1235). Některé se používají především pro spojování mědi a také vinutí elektrických točivých strojů (např. B - CuP10 - 710/770, B - Cu60ZnAg - 880/900, B - Ag45CuZn - 680/740). [1]

#### Značení pájek

Značení může být pomocí dvou základních systémů. Při úplném značení podle ČSN EN ISO 17672:2010 (náhrada normy ČSN EN 1044) se nejprve uvádí, že se jedná o pájku, následně číslo normy a poté se značení liší.

**První systém** je podle normy členěn do sedmi skupin na:

- měděné tvrdé pájky (Cu),
- pájky měď s fosforem (CuP),
- stříbrné tvrdé pájky (Ag),
- niklové a kobaltové tvrdé pájky (Ni),
- palladiové tvrdé pájky (Pd),
- hliníkové tvrdé pájky (Al),
- tvrdé pájky se zlatem (Au). [5]



Obr. 1: Konkrétní značení pájky na výrobku – podle zastaralé normy ČSN EN 1044 (převzato z: [13])

Ke každé skupině přísluší 3 číslice, které představují kód konkrétní pájky. Celé označení je například:

Pájka ISO 17672 – Ag 245

[5]

Oproti původnímu značení podle zrušené normy ČSN EN 1044, které udávalo pouze nic neříkající kód (AG 104 – staré označení), první číslice normy ČSN EN ISO 17627 udává podskupinu slitin.

Podskupiny slitin pro Ag:

1. slitiny Ag-Cu-Zn-Sn
2. slitiny Ag-Cu-Zn
3. slitiny Ag-Cu-Zn-Cd
4. slitiny Ag-Cu-Zn-Ni-Mn

Poslední dvojčíslí udává informaci o procentuálním zastoupení jednoho z hlavních prvků.

O zmiňované pájce lze tedy zjistit, že je to stříbrná tvrdá pájka, pochází z 2. podskupiny – tedy obsahuje prvky Ag, Cu, Zn a hlavní prvek, v tomto případě Ag, je zastoupen 45 %, zbytek tvoří Cu a Zn. [6]

**Druhý systém** značení umožňuje v označení nalézt také informace o konkrétní pájce. Nejprve je vyznačeno písmeno „B“<sup>1</sup>, které udává, že se jedná o tvrdé pájení, dále je uveden údaj o hlavním prvku přísady a jeho průměrném procentuálním obsahu, poté následují údaje o dalších hlavních prvcích, které mají větší zastoupení v dané pájce. Poslední část udává solidus<sup>2</sup> a likvidus<sup>3</sup> pájky. Není to ale pracovní teplota, ta musí být o něco vyšší než teplota likvidusu, aby došlo k úplnému roztavení pájky veškeré pájky. Například předchozí pájka je tímto značením uváděna takto:

*Pájka ISO 17672 – B – Ag45CuZn – 680/740*

[1], [5]

---

<sup>1</sup> B - ve smyslu anglického slova brazing, neboli tvrdé pájení.

<sup>2</sup> Solidus - teplota, kdy daná pájka začíná tát (kdy se začíná tavit).

<sup>3</sup> Likvidus - teplota, kdy dochází k úplnému roztání (roztavení) pájky.

### **Dělení pájek podle základního prvku**

Pájky jsou členěny do sedmi hlavních bází. Uváděny jsou pomocí druhého systému označování podle normy ČSN EN ISO 17672:2010. [5]

#### **a) Pájky na bázi mědi**

Jsou vhodné pro pájení železných i neželezných kovů s teplotou tání přesahující 1000 °C. Jedná se o sloučeniny mědi, zinku, křemíku, cínu, fosforu a dalších prvků v různých poměrech, kde zastoupení mědi je 49 až 99,90 %. [1]

##### Pájky z čisté mědi

Označení těchto pájek je B – Cu – 1085, obsah mědi je 99,90 %, zbytek tvoří Cu<sub>2</sub>O - oxid měďný, který vzniká zahříváním mědi. Pracovní teplota je okolo 1150 °C. Spojování mědi je u této pájky logicky nevhodné, porušovalo by to definici pájení v kap. 1.1. Tavitel by se zde i spojovaný materiál, poněvadž teplota tání mědi je při 1 084,62 °C. Používají se pro kapilární pájení vysokotavitelných materiálů, např. niklu a oceli. [1], [7]

##### Pájka B – CuP10

Celé označení B – CuP10 – 710/770 obsahuje 8,6 až 11 % P a kolem 90 % Cu. Pracovní teplota je 750 až 800 °C, aby došlo k úplnému roztavení pájky. Při menším obsahu fosforu 8,6 % je pracovní teplota už 710 °C. Tato pájka tedy splňuje podmínku pro pájení mědi a některých jejích slitin. To je také její velké využití. Při pájení mědi není potřeba použít tavidla. Ohřevem dojde ke shoření části fosforu. Oxid fosforečný reaguje s oxidem měďným a výsledkem je fosforečnan měďný. To je výhoda pro pájení, kde je nemožné nanášení tavidla a jeho čištění. Dále je to výhodné pro snížení finančních nákladů při výrobě velkého množství spojů. Nicméně pro pájení slitin mědi – mosaz a bronz vzniká povrchový oxid zinku, resp. cínu, který se musí vhodným tavidlem odstranit. Tavidla pro tvrdé pájení jsou popsány níže v textu. Pájka se používá pro pájení mědi, tudíž i v elektronice. Pevnost pájených spojů u pájení mědi při použití této pájky bez použití tavidla se pohybuje v tahu kolem 200 MPa, ve smyku okolo 220 MPa. [1]

##### Pájka Cu – Zn

Tzv. mosazná pájka, označení např. B - Cu60ZnAg - 880/900, B - Cu60ZnSi - 880/900. Obsahuje kolem 60 % Cu, 0,3 % Ag, resp. 0,1 % Si, nepatrné množství Sn (kolem 0,2 %),



Mn, Pb, Al či P (řádově 0,05 %) a zbytek slitiny tvoří Zn, jehož obsah by měl být menší než 40 %. Právě na zinku závisí jakost pájky. Při 913 °C zinek vře a už při 650 °C můžeme pozorovat jeho vypařování, které může spolu s vodíkem způsobovat pórovitost spoje, což je jeho velká nevýhoda. Kvůli tomuto faktu slitina obsahuje křemík, který zmenšuje rozpustnost vodíku, a tím i tedy snižuje možnost vzniku pórů. Jeho podíl by ale neměl překročit 0,25 %, po překročení této hranice vytváří křemík křehkou přechodovou oblast. Pomocí stříbra se zlepšuje tekutost pájky, zvyšuje se elektrická vodivost, snižuje se její pracovní teplota, přičemž nedochází ke křehnutí pájky. Tyto pájky se používají pro pájení mědi, jejích slitin a pro pájení ocelí. Pracovní teplota se pohybuje mezi 920 až 950 °C. [1]

Pevnost pájených spojů u pájení mědi při použití těchto pájek a tavidla FB 11-31<sup>4</sup> se pohybuje u B – Cu60ZnAg v tahu kolem 150 MPa, ve smyku okolo 170 MPa. U B – Cu60ZnSi v tahu mezi 150 – 220 MPa a ve smyku 100 – 180 MPa. Velký vliv má na mechanické vlastnosti obsah Cu a Zn. [1]

### b) Pájky na bázi stříbra

Tyto pájky mají využití pro spojování železných i neželezných kovů, nesmí jít ale o kovy lehké tavitelné a lehké kovy. Výjimku tvoří titan (popř. jeho sloučeniny), který lze stříbrem také spojovat. Pracovní teplota pájení (teplota tání/tavení pájky) se pohybuje mezi 630 až 850 °C, ta je závislá především na obsahu Ag, Cu a Zn v pájce. Mezi výhody těchto pájek patří jejich vynikající elektrická vodivost<sup>5</sup>, mechanická pevnost spoje a dobrá chemická stálost. Nevýhoda stříbrných pájek je především v jejich vysoké pořizovací ceně. [1]

---

<sup>4</sup> Tavidlo FB 11-31, popř. jiná tavidla označena FB xx-yy, jsou zastaralá označení normy ČSN 05 5770, která skončila svoji účinnost 30. 04. 1999. Tato norma byla částečně nahrazena normou ČSN EN 1045. Nyní je pro tyto pájky Výzkumným ústavem zvářečským (SR) doporučeno tavidlo FH 20. [8], [9], [11]

<sup>5</sup> Měrná el. vodivost stříbra (konduktivita):  $\gamma = 65,78 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  (při 20 °C),

resp. rezistivita:  $\rho = 0,0152 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$  (při 20 °C). [12]

### Pájky Ag – Cu – P

Fosfor představuje v pájce dezoxidační činitel, díky tomuto faktu lze používat pájku i bez tavidla. Pájka je vhodná pro pájení mědi a stříbra. Hlavní použití je při pájení transformátorů, tepelných výměníků, pájení vinutí elektromotorů a jiných elektrických točivých strojů. Nevýhoda fosforu je, že zhoršuje elektrickou vodivost mědi a také při spojování ocelí vznikají křehké přechodové oblasti. Pod označením B - Ag15CuP - 635/700 lze získat informaci, že pájka obsahuje průměrně 15 % Ag. Dále se v literatuře [1] uvádí 4,0 - 6,0 % P a zbytek pájky tvoří Cu, její pracovní teplota je od 710 až do 800 °C. Při pájení touto pájkou bez použití tavidla je pevnost spoje v tahu 160 - 220 MPa a pevnost ve smyku 110 - 160 MPa (při spojování Cu). [1] Tato pájka je tedy výhodná k použití např. u vinutí statorů hydroalternátorů, kde se zbytky tavidla velmi špatně odstraňují. [9]

### Pájky Ag – Cu – Zn

Legováním<sup>6</sup> slitiny Ag - Cu zinkem lze dosáhnout poklesu likvidusu slitiny (1 % Zn představuje pokles o 4,5 °C). Při dosažení 45 % Zn dochází v pájce ke křehkosti spoje. Proto je důležité nepřekračovat tuto hranici. Pájky s vyšším obsahem Ag se hojně využívají pro spojování mědi v elektrotechnice z důvodu velmi dobré vodivosti spoje - čím více je v pájce stříbra, tím lepší je vodivost pájky. Pájky mají navíc dobrou chemickou odolnost. Další využití mají např. ve spojování korozivzdorných ocelí a potravinářském průmyslu. Stříbrné pájky s příměsí zinku dosahují nejvyšších pevnostních charakteristik ze všech pájek na bázi stříbra. Ve společnosti 1. SERVIS – ENERGO, s. r. o. se pro pájení vinutí turboalternátorů a hydroalternátorů používá pájka B - Ag45CuZn - 680/740, která obsahuje 44 - 46 % Ag, 29 - 31 % Cu a zbytek, který se pohybuje od 23 - 27 %, tvoří Zn. Pracovní teplota této pájky je 750 - 790 °C. Pevnost spoje (pájení mědi, použití tavidla FB-11-21) je v tahu 180 – 220 MPa. Pevnost ve smyku je 70 – 160 MPa. Další pájka, např. B - Ag66CuZn - 735/790 (65 - 67 % Ag; 26,5 - 28,5 % Cu; 4,5 - 8,5 % Zn). Pracovní teplota: 800 - 840 °C. Pevnost spoje při stejných podmínkách: v tahu 90 - 160 MPa, ve smyku 100 - 150 MPa. [1]

---

<sup>6</sup> Legování je postup, při kterém dochází k přimísení legujících prvků k slitině kovů za účelem zlepšení jeho mechanických vlastností.

**c) Pájky na bázi niklu**

Nikl má příznivé vlastnosti proti korozi a oxidaci. Tyto pájky mají využití pro pájení u žáruvzdorných a korozivzdorných ocelí, v letectví, v automobilovém a jaderném průmyslu. Pro pájení v elektrických točivých strojích se tato pájka nevyužívá. Kvůli špatné tváritelnosti se vyrábějí pouze ve formě prášku, pasty nebo folie. Např. pájka B - Ni76CrP - 888/890 (76 % Ni; 14 % Cr; 10 % P; pracovní teplota nad 900 °C) byla vyvinuta pro pájení dílů jaderných reaktorů. Používá se také pro pájení topných těles a tenkostěnných trubek. Obsah chromu poskytuje lepší vysokoteplotní vlastnosti a lepší odolnost proti korozi. [1], [10]

**d) Pájky na bázi palladia**

Podobně jako pájky niklové, se tyto pájky používají při spojování korozivzdorných ocelí, v leteckém a jaderném průmyslu, při výrobě proudových motorů, apod. Výhodu oproti niklovým mají, že se vyrábějí ve formě drátů a zmenšují vznik praskavosti ve spoji. Představitel pájky: B - Pd60Ni - 1235 (60 % Pd; 40 % Ni; prac. teplota 1250 °C). [1], [10]

**e) Pájky na bázi hliníku**

Hliníkové pájky pro tvrdé pájení se používají především pro spojování hliníku. Jsou to většinou sloučeniny Al – Si. Příkladem je pájka B – Al88Si – 575/585 (88 % Al; 12 % Si; prac. teplota 595 °C). [1]

**f) Pájky z drahých kovů**

Tyto pájky se rozdělují na pájky zlaté a platinové. Uplatnění mají v průmyslové výrobě, stomatologii a zlatnictví. Pájky Au – Cu mají stejné výhody jako nejlepší pájky na bázi Ag – Cu. Mají velmi dobrou vodivost a chemickou odolnost. Jsou vhodné pro pájení elektroniky, mědi, ale jsou finančně náročnější než stříbrné. Např. pájka B - Cu62Au - 990/1015 (62,5 % Cu; 37,5 % Au; prac. teplota od 1025 °C). Platinová pájka B - Pt85W - 2200 (85 % Pt; 11 % W; 4 % B; prac. teplota od 2210 °C) se používá pro pájení wolframu. Tyto pájky jsou velmi drahé. [1], [10]

### Srovnání pájek pro tvrdé pájení vinutí el. točivých strojů

Na trhu je velice mnoho pájek s různými vlastnostmi. Popsání všech pájek v této práci by vyžadovalo velmi mnoho úsilí. Zde jsou pouze základní a často používané pájky. Velké množství informací - přes 300 různých tvrdých pájek, jejich složení, prac. teploty a použití lze nalézt v odkazu anglické online encyklopedie Wikipedia uvedeného v literatuře v bodu [10].

Lepší přehlednost vlastností pájek pro tvrdé pájení vinutí elektrických točivých strojů znázorňuje následující tabulka.

Označení	Hlavní složky pájky [%]	Prac. teplota [°C]	Pevnost [MPa]		Výhody
			V tahu	Ve smyku	
B - CuP10 - 710/770	zbytek Cu; 0,2 Sn; 0,2 Fe; 8,6 - 11 P;	750 - 800	180 - 220	180 - 220	Možnost použití bez tavidla, pevnost, levnější
B - Cu60ZnAg - 880/900	58 - 60,5 Cu; zbytek Zn; 0,4 Ag; 0,1 - 0,3 Si; 0,15 - 0,35 Sn;	920 - 950	140 - 160	160 - 180	Lepší vodivost, levnější než Ag pájky
B - Cu60ZnSi - 880/900	59 - 61 Cu; zbytek Zn; 0,1 - 0,2 Si; 0,13 - 0,23 Sn;	920 - 950	150 - 220	100 - 180	Menší tvorba pórovitosti, pevnost, levnější
B - Ag15CuP - 635/700	zbytek Cu; 14 - 16 Ag; 4 - 6 P	710 - 800	160 - 220	110 - 160	Možnost použití bez tavidla, pevnost, vodivost
B - Ag45CuZn - 680/740	29 - 31 Cu; 44 - 46 Ag; zbytek Zn	750 - 790	180 - 220	70 - 160	Dobrá vodivost, pevnost, chemická odolnost
B - Ag66CuZn - 735/790	26,5 - 28,5 Cu; 65 - 67 Ag; zbytek Zn	800 - 840	90 - 160	100 - 150	Velmi dobrá vodivost, chemická odolnost
B - Cu62Au - 990/1015	62,5 Cu; 37,5 Au	od 1025	-	-	Dobrá vodivost, velmi dobrá chemická odolnost

Tab. 1: Možné pájky pro pájení v el. točivých strojů (data z: [1], [10])

### 1.3.2 Tavidlo pro tvrdé pájení

Nároky na tyto tavidla jsou značné. Při špatně zvoleném tavidle může celý proces pájení být chybný a spoj nekvalitní. Poskytnutí informací o tavidlech, jejich označování, složení a vlastnostech zajišťuje norma: ČSN EN 1045:1999 Tvrdé pájení - Tavidla pro tvrdé pájení - Klasifikace a technické dodací podmínky, která je udávána v literatuře pod odkazem [8].

#### Značení tavidel

Tavidla pro tvrdé pájení se označují dvěma písmeny a dvěma čísly, např. „FH 11“.

První písmeno „F“ značí, že jde o tavidlo (angl. flux), druhé písmeno, např. „H“ (angl. heavy) značí, zda jde o pájení těžkých kovů, nebo „L“ (angl. light), že jde o pájení lehkých kovů. Za označením třídy následuje dvojice čísel, které konkretizují, pro jaké teploty je tavidlo určeno. První číslice označuje teplotní účinné pásmo a druhá číslice rozděluje možnosti použití. [8], [14]

Tavidla se tedy dělí na dvě základní třídy:

- Třídy FH – tavidla pro tvrdé pájení těžkých kovů (pro oceli, nerezavějící oceli, měď a její slitiny, nikl a jeho slitiny, drahé kovy, molybden, wolfram)
- Třídy FL – tavidla pro pájení lehkých kovů

Teplotní účinná pásma (údaj první číslice) pro třídu FH jsou přibližně (přesné pásmo udávají výrobci v příbalové informaci výrobku):

1. pásmo: do 800 °C,
2. pásmo: 750 – 1000 °C,
3. pásmo: od 1000 °C,
4. pásmo: 600 – 1000 °C. [14]



Obr. 2: Konkrétní označení tavidla na výrobku (převzato z: [13])

Druhá číslice neuvádí přesnou informaci o tavidle, jedná se pouze o číslovanou položku.

Vyskytují se tato označení: FH10, FH11, FH12, FH20, FH21, FH30, FH40, FL11, FL12.

**FH10** Tavidla pro tvrdé pájení těžkých kovů, s účinným teplotním pásmem 1 - přibližně do 800 °C. Obsahují bór a jeho sloučeniny, fluoridy a chloridy. Tyto tavidla jsou pro všeobecné použití. Po dokončení pájení je nutné odstranění zbytků tavidla – způsobují korozi.

**FH11** Tavidla pro tvrdé pájení těžkých kovů, s účinným teplotním pásmem 1 - přibližně do 800 °C. Obsahují bór a jeho sloučeniny, fluoridy a chloridy. Tyto tavidla se používají pro tvrdé pájení slitin hliník-měď. Po dokončení pájení je nutné odstranění zbytků tavidla – způsobují korozi.

**FH12** Tavidla pro tvrdé pájení těžkých kovů, s účinným teplotním pásmem 1 - přibližně do 800 °C. Obsahují bór a jeho sloučeniny, jednoduché a komplexní fluoridy a chloridy, elementární bór. Tyto tavidla se používají pro tvrdé pájení antikoročních, jiných ocelí a tvrdých kovů. Po dokončení pájení je nutné odstranění zbytků – způsobují korozi.

**FH20** Tavidla pro tvrdé pájení těžkých kovů, s účinným teplotním pásmem 2 - přibližně od 750 °C přibližně do 1000 °C. Obsahují bór a jeho sloučeniny a fluoridy. Tyto tavidla jsou pro všeobecné použití pro teploty nad 600 °C. Po dokončení pájení je nutné odstranění zbytků tavidla – způsobují korozi.

**FH21** Tavidla pro tvrdé pájení těžkých kovů, s účinným teplotním pásmem 2 - přibližně od 750 °C přibližně do 1000 °C. Obsahují bór a jeho sloučeniny. Tyto tavidla jsou pro všeobecné použití pro teploty nad 800 °C. Po dokončení pájení je nutné odstranění zbytků tavidla – způsobují korozi.

**FH30** Tavidla pro tvrdé pájení těžkých kovů, s účinným teplotním pásmem 3 - od 1000 °C. Obsahují bór a jeho sloučeniny, fosforečnany a silikáty. Používají se při pájení měděnou nebo niklovou pájkou. Po dokončení pájení je možné odstranění zbytků tavidla, ale není to nutné – nezpůsobují korozi.

**FH40** Tavidla pro tvrdé pájení těžkých kovů, s účinným teplotním pásmem 4 - od 600 přibližně do 1000. Obsahují chloridy a fluoridy, neobsahují bór. Používají se v případech, kdy je nemožné použití tavidla s bórem. Po dokončení pájení je nutné odstranění zbytků tavidla - způsobují korozi. [8], [14]

**FL10** Tavidla pro tvrdé pájení lehkých kovů. Obsahují hydroskopické chloridy a fluoridy. Po dokončení pájení je nutné odstranění zbytků tavidla – způsobují korozi.

**FL20** Tavidla pro tvrdé pájení lehkých kovů. Obsahují nehydroskopické fluoridy. Není nutné odstranění, nezpůsobují korozi, nutná je však jejich ochrana proti vlhkosti a vodě. [8], [14]

Úplné označení podle normy ČSN EN 1045 vypadá například takto:

*Tavidlo EN 1045 – FH11*

Hlavní složkou tavidel FH jsou boritany, resp. bezvodý borax, který lze rozpouštět v příslušné kapalině (resp. vodě). Díky tomu se tavidla dají distribuovat ve formě prášku, který se před aplikací smíchá s kapalinou a nanese na příslušné místo. Výrobce vždy uvádí poměr ředění, teplotu kapaliny, apod. [1]

Před výběrem vhodného tavidla, je nutné vědět, jaké budou spojované materiály, jaká se použije pájka, její pracovní teplota, způsob ohřevu, okolní podmínky, a zda půjdou zbytky tavidla po zkonstruování spoje odstranit. Pomocí těchto kritérií se určí všeobecné označení normy a hledá se tavidlo v omezeném výběru podle požadavků.

Příkladem může být požadavek pájení mědi tvrdým pájením, pájkou B - Ag45CuZn - 680/740, s pracovní teplotou 750 – 790 °C, indukčním ohřevem, za běžných podmínek, s možností odstraňování zbytků tavidla.

Jedná se tedy např. o tavidlo FH 10 s teplotou do 800 °C a všeobecným použitím tavidla nebo o FH 12, popřípadě i FH 40.

V nabídce slovenského *Výskumného ústavu zvaračského – Priemyselny inštitút SR, z.z.p.o.*, lze nalézt tavidlo řady FH 12, konkrétně BF-201 (zastaralý název Argentol), které se používá pro spojování mědi a jejích slitin, na pájky typu Ag 5 – 50 % s příměsemi Cu, Zn, Sn, Cd, ve formě prášku, či pasty. Toto tavidlo jde odstranit roztokem 5 – 10 % NaOH nebo Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. [11]

## 2 Pájení vinutí

Princip pájení vinutí jak u hladkých rotorů turboalternátorů, tak i u rotorů s vyniklými póly hydroalternátorů, je zpravidla stejný. Pájený spoj je vytvořen metodou tvrdého pájení. Je zde požadavek, aby byl spoj mechanicky odolný, a z hlediska toku vysokých proudů je předpoklad, že spoj bude tepelně namáhaný. Metoda měkkého pájení je zde tedy naprosto vyloučena. Pro dosažení vysoké teploty, která je závislá na druhu pájky, což je zpravidla stříbro, se volí vhodná metoda ohřátí místa spoje. Pro rotory i statory mnoha výkonových zařízení se používají metody odporového, indukčního či plamenového ohřevu, které jsou předmětem této kapitoly. Po pájení musí být spoj dobře mechanicky opracován, případně očištěn od tavidla a nečistot, které se tvoří nejvíce při plamenovém pájení. Spoj nesmí mít ostré hrany, jinak by mohlo dojít k poškození izolace.

### 2.1 Odporový ohřev

Princip odporového ohřevu (obr. 3) je založen na vzniku odporového tepla, který je vyjádřen Jouleovým zákonem následovně:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad [ J; \Omega, A, s ] \quad (1)$$

kde: Q – odporové teplo,

R – celkový odpor při zahřívání,

I – proud,

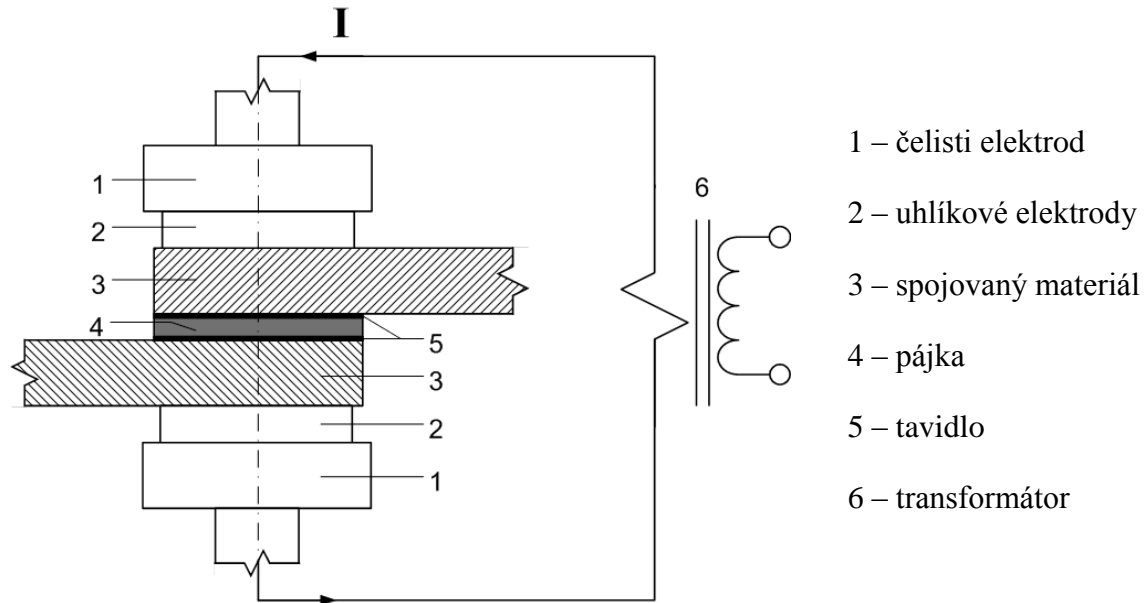
t – doba zahřívání.

[1]

Zjednodušeně řečeno, jedná se o proud tekoucí místem, u kterého je požadován ohřev. Z rovnice je patrné, že pro dosažení vysoké teploty je požadavek na vysoký celkový odpor R. Ten zahrnuje odpor elektrod, odpor ohřívajícího materiálu – u pájení elektrických točivých strojů zpravidla mědi, která má měrný el. odpor minimální, a přechodové odpory v místě styku spojovaných částí. [1]

Pro dosažení vysokého celkového odporu se používají při ohřevu uhlíkové elektrody, které disponují relativně vysokým el. odporem. Měkké uhlíkové elektrody mají elektrický odpor kolem 13  $\Omega$ , tvrdé elektrody mají odpor až 60  $\Omega$ . Další možností je použití elektrod molybdenových. Elektrody musejí být vhodně tvarované, aby měly se spojovaným materiálem co možná největší stykovou plochu z důvodu rozložení tepla v materiálu. [1]





Obr. 3: Princip odporového ohřevu při pájení (překresleno z: [1])

Podle stanovené teploty (u pájení podle prac. teploty pájky) se volí sekundární proud dle možností použitého transformátoru a dopočítává se doba zahřívání, která by měla být řádově několik sekund. Teplota je tedy velmi dobře regulovatelná. [1]

Existují dvě možnosti odporového ohřevu: Přímý odporový ohřev (obr. 3) – proud teče spojovaným místem a nepřímý ohřev, kdy se pomocí proudu zahřívá okolí spojovaného místa. Při použití nepřímého ohřevu je nutné pájené materiály zatěžovat mírnou přítlačnou silou, aby nedocházelo k posunutí spojovaných částí a nevypadla vložená pájka. Tlak ale nesmí být příliš veliký, aby se později roztavená pájka nevytlačovala ze spoje. Tohoto ohřevu se využívá u spojování materiálů, které jsou vůči sobě v nepoměru z hlediska jejich velikosti (např. řezné destičky - držáky soustružnických nožů). U přímého ohřevu tlak zajišťují čelisti elektrod. Přítlačná síla uhlíkových elektrod se pohybuje mezi 50 – 500 N. Odporový ohřev pracuje přibližně s napětím 2 – 12 V, proudem 2500 A a časem v rozmezí 2 až 60 s v závislosti na požadované teplotě. [1], [15]

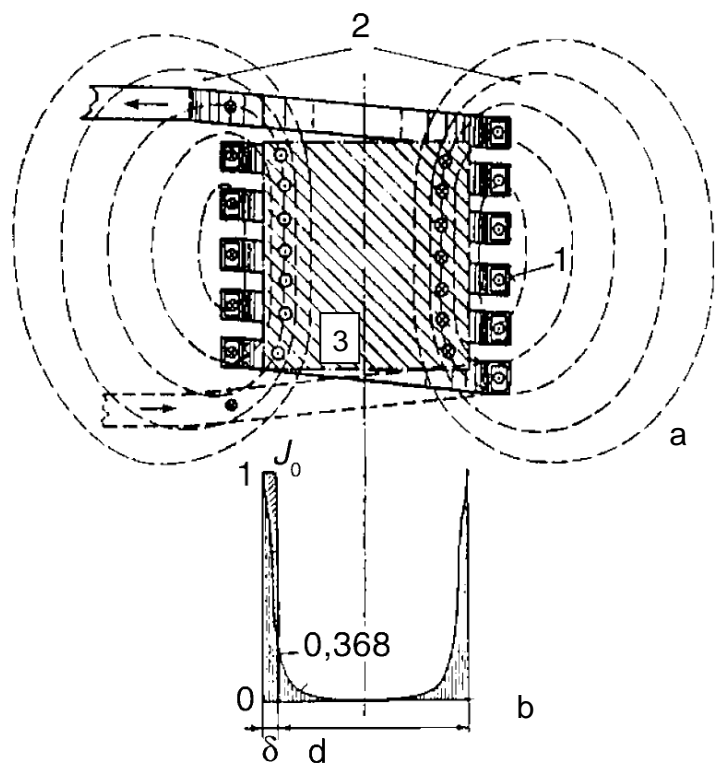
Celé zařízení může být buď stacionární, nebo mobilní (pojízdné). Toto zařízení je složeno z pojízdného vozíku, na kterém je transformátor. Z něj jsou vyvedeny kabely, které musí být ohebné a vodou ochlazované. Na koncích kabelů jsou pájecí kleště s např. pneumatickým upínacím zařízením, s čelistmi elektrod a uhlíky. Čelisti elektrod jsou buď měděné – pro ohřevy do 500 °C nebo pro vyšší teploty se používají elektrody molybdenové či wolframové. K zamezení úniku tepla z jiných částí, než z uhlíkových (resp. molybdenových) elektrod, se čelisti elektrod musí chladit, docházelo by jinak k jejich deformaci. Pro zapínání a vypínání

procesu ohřevu slouží nožní proudový spínač, který lze umístit do blízkosti vykonávané práce. [1]

Pájení je možno pouze u přeplátovaných spojů, které jsou například na spojkách vinutí - tzv. poutkového spojení cívek u statorového vinutí synchronních a asynchronních strojů pro napětí nad 6 kV. [15]

## 2.2 Indukční ohřev

Základním principem indukčního ohřevu je vznik tepla pomocí elektrické indukce. Metodu lze popsat pomocí principu funkce transformátoru (obr. 4a). Induktorem (indukční cívkou) protéká střídavý elektrický proud s napětím  $U - 1$ . Díky tomu se v okolí cívky vytvoří střídavé elektromagnetické pole - 2, které je nejsilnější uvnitř cívky. Pokud do vnitřního prostoru cívky vložíme vodivý materiál - 3, pak si lze představit tento materiál jako sekundární vinutí transformátoru spojené nakrátko. Induktor tedy představuje primární vinutí, které indukuje vířivé proudy do vložené součásti. [1],[16] Působením vířivých proudů dochází k tvorbě Jouleova tepla, které lze popsat dříve zmiňovanou rovnicí:



Obr. 4: a) Princip indukčního ohřevu,

b) Proudová hustota v materiálu (převzato z:[16])

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad [J; \Omega, A, s] \quad (1)$$

U této metody lze regulovat elektrický odpor součásti, který je nejvíce závislý na frekvenci  $f$  a na teplotě, kvůli které se mění materiálové konstanty - měrný el. odpor (rezistivita)  $\rho$  a permeabilita  $\mu$ .

$$R \approx \sqrt{f \cdot \rho \cdot \mu} \quad [\Omega; Hz, \Omega m, H m^{-1}] \quad (2)$$

- Rezistivita mědi:  $\rho = 0,0169 \cdot 10^{-6} \Omega m$  při 20 °C. [12]
- Permeabilita mědi:  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,99999 = 1,2566 \cdot 10^{-6} Hm$ . [17]

Důležité je, že čím větší je frekvence, tím sice vzniká větší teplo  $Q$ , ale tím více dochází ke skin efektu, snižuje se proudová hustota  $J_0$  (ve válcovém vodiči o průměru  $d$  podle obr. 4b) a zahřívá se jen část materiálu. Hloubka vniku  $\delta$  určuje tloušťku materiálu, při které poklesne hustota indukčního proudu o  $1/e = 0,368$ . Při zvyšování frekvence hloubka vniku klesá podle vztahu:

$$\delta = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad [mm] \quad (3)$$

Pro zjištění hloubky vniku při různých frekvencích a za různých teplotních podmínek, je nutné přepočítat rezistivitu materiálu pro požadované hodnoty. Při vyšší teplotě roste i rezistivita materiálu podle vzorce:

$$\rho_t = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad [\Omega m] \quad (4)$$

kde:  $\rho_t$  – rezistivita pro požadovanou teplotu,

$\rho_0$  – rezistivita při známé teplotě,

$\alpha$  – teplotní součinitel elektrického odporu daného materiálu<sup>7</sup>,

$\Delta t$  – rozdíl požadované a známé teploty. [1], [16], [17]

Pro frekvenci  $f = 50$  Hz a teplotu  $t = 620$  °C, je výpočet následující:

1. Přepočet rezistivity mědi pro teplotu 620 °C:

$$\rho_t = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) = 0,0169 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot (620 - 20)) = 0,0406 \cdot 10^{-6} \Omega m$$

2. Výpočet hloubky vniku za daných podmínek:

$$\delta = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{0,0406 \cdot 10^{-6}}{1,2566 \cdot 10^{-6} \cdot 50}} = 503 \cdot 0,0254 = 12,78 mm$$

<sup>7</sup> Teplotní součinitel el. odporu mědi:  $\alpha = 4 \cdot 10^{-3} K^{-1}$  [17]

V literatuře [1] se uvádí pro dané podmínky hodnota  $\delta = 12$  mm. Nepřesnost výpočtu je pravděpodobně způsobena zaokrouhlováním. Dále se pro měď v literatuře udává pro shodnou teplotu:  $f = 10$  kHz,  $\delta = 0,8$  mm a pro frekvenci  $f = 500$  kHz, hloubka vniku  $\delta = 0,15$  mm. Od povrchu materiálu až k hloubce vniku se spotřebuje kolem 86 % tepla, ve zbývající části pouze cca 14 %. S vědomím těchto informací se stanovuje vhodná frekvence na zdroji indukčního proudu (generátoru) pro konkrétní tloušťky spojovaných materiálů s mírně naddimenzovanými hodnotami, aby docházelo k plnému prohřátí a kvalitně spojenému místu. [1]

### Zařízení pro indukční ohřev

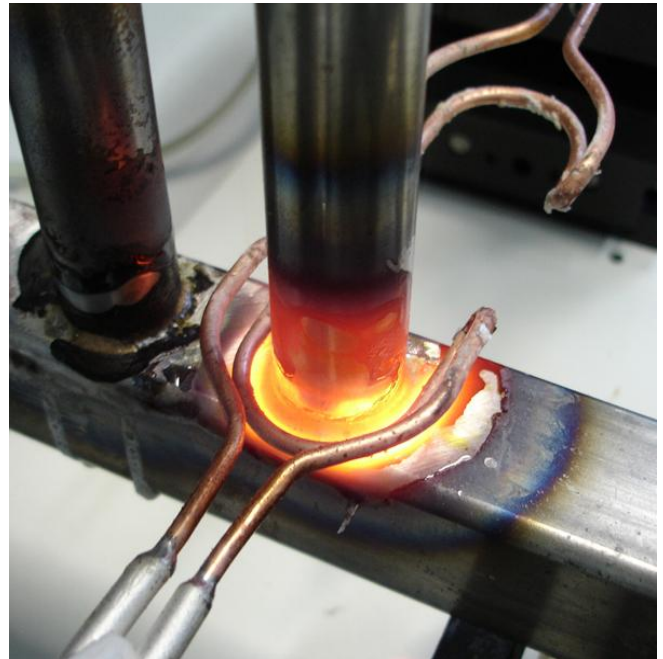
Zařízení pro ohřívání pomocí indukční metody se skládá ze zdroje indukčního proudu (generátoru), induktoru a upínacího mechanismu pro pájení.



Obr. 5: Zdroj indukčního proudu JH 1300-400 K značky JOSAM (převzato z:[18])

Generátory pro ohřev disponují frekvencemi od 50 Hz až do hodnot několika set megahertzů. Regulaci frekvence zajišťuje vysokofrekvenční měnič, který je osazen zpravidla tyristory nebo tranzistory, či elektronkami. Celé zařízení může být mobilní nebo statické. Pro zlepšení účinnosti metody je induktor chlazen. Proto zařízení obsahuje chladicí nádrž, ve které se jako chladivo používá zpravidla voda. [1], [16]

Induktor je převážně vyroben v podobě dutého měděného vodiče, který bývá různých tvarů. Dutinou proudí chladicí médium. Volba tvaru induktoru je závislá na tvaru spojovaného materiálu. Rozděluje se na induktor vnější, vnitřní nebo plošný. Induktor svým tvarem musí umožnit nejtěsnější přiblížení ke spojovanému materiálu, což je zpravidla 1 až 5 mm. Pro ohřev mědi je vhodné použít vícezávitové induktory k dosažení lepšího rozložení ohřevu. Naopak oceli, které mají větší rezistivitu a jsou magnetické, mohou mít pouze jeden závit, který dokáže danou ocel ohřát. Závitby by měly být dostatečně odizolovány. [1], [16]



Obr. 6: Induktor – spojování oceli (převzato z:[19])

Dále se indukční zařízení skládá z upínacího mechanismu, který zajišťuje v pájeném místě stabilní mezeru pro vyplnění pájkou a fixuje spojované části proti pohybu. Může se jednat o klasickou upevňovací svorku nebo i o složitější pomocný přípravek. [1]

Hlavní výhody v indukčním ohřevu jsou ty, že se jedná o bezkontaktní ohřev, při kterém nevznikají nečistoty, indukční pájení je energeticky úsporné – ohřívá se pouze to místo, které je potřeba, ohřev je časově nenáročný a nevznikají při ohřevu žádné zplodiny, které by vznikaly důsledkem tohoto ohřevu (oproti plamenovému ohřevu). [1], [16]

Tento způsob ohřevu je velmi hojně využíván při pájení závitů a čel vinutí hladkých vinutí rotorů turboalternátorů. [15]

## 2.3 Plamenový ohřev

Ohřev pomocí plamene se používá jak při pájení, tak při svařování materiálů. Princip metody je založen na spalování hořlavého plynu, který je s kyslíkem sloučen ve speciálním hořáku. Pro dosažení požadované teploty se vybírá vhodný hořlavý plyn. [20] Běžně se používá extrémně hořlavý plyn – rozpuštěný acetylén, označení: UN 1001, který je výbušný za přístupu i bez přístupu vzduchu. Tento plyn se skladuje a používá v tlakových lahvích, vyrobených z oceli. [9]

Postup při plamenovém pájení není nijak speciální. Pájené plochy se musí nejdříve očistit, poté se aplikuje tavidlo a mezi plochy se může vložit plíšek pájky. Nyní se pomocí hořící směsi acetylénu a kyslíku začne okolí budoucího spoje zahřívat na teplotu potřebnou pro roztavení pájky. V průběhu se pájka dodává do spoje ve formě tavícího se drátu. Když je pájka dostatečně zateklá v celém objemu místa pájených ploch, ohřev se může přerušit. Následuje vizuální kontrola, zdali je pájka rozprostřená po celém spoji. Pokud ano, spoj se přebrousí do požadovaných rozměrů a okolí spájeného spoje se očistí (například smirkovým papírem). Celý postup plamenového pájení je znázorňuje příloha č. 1. [9]



Obr. 7: Plamenný ohřev (převzato z: [21])

Výhoda plamenového pájení je v poměrně nízkých pořizovacích nákladech na zařízení. Využití tohoto ohřevu je zejména při údržbách, opravách a spojování rozměrnějších dílů. Používá se například pro vytvoření závitů a cívek pro stroje s vyniklými póly, demontáž a opravy vinutí a všude tam, kde nelze předchozí dvě metody použít. Lze pájet spoje s tupými konci, šikmo seříznuté (kvůli zvětšení pájecí plochy), přizpůsobené nebo i přeplátované. Fixace pájeného materiálu je možná upevňovací svorkou, kleštěmi, apod. [1],[15]

Nevýhoda je, že při pájení vznikají výpary a okolí spojeného materiálu je silně znečištěno. Je zde také nebezpečí poranění, výbuchu a poškození okolní izolace plamenem.

## 3 Diagnostický systém pro posouzení kvality pájeného spoje

Diagnostický systém kontroly kvality, jak pro kontrolu pájeného spoje, tak pro jiné kontroly, je systém zkoušení vlastností výrobku, resp. zařízení pomocí vhodné metody zkoušení, za účelem dosažení požadovaných hodnot. Překročením stanovených hodnot se výrobek, resp. zařízení stane nespolehlivým, hledají se příčiny vad a poté se provádí jejich náprava. Po opravě se výrobek, resp. zařízení zkouší znovu a ověřuje se, zda je výrobek, resp. zařízení již v pořádku. Pokud není, děj se opakuje.

Proto práce informuje o metodách zjišťování případných vad. Náprava vad je poté individuální a rozhoduje o ní každý výrobce na základě svých postupů a zkušeností.

### 3.1 Vady v pájených spojích

Vady v pájených spojích představují nedokonalosti způsobené mnoha faktory, například špatnou teplotou pájení, nečistotami, špatným tavidlem, výběrem nevhodné metody pájení, apod. Definice vady v pájených spojích v ČSN EN ISO 18279 (2004:7) zní následovně: „Vady jsou nepravidelnosti v pájeném spoji, odchylky od předpokládané relativní polohy částí spojených pájením a od předpokládaného tvaru pájených komponent, pokud tyto odchylky závisejí na pájení.“ [22].

Vady se rozdělují na vady vnější a vnitřní.

Vnější vady: nedoplnění pájkou, trhliny, vystupující pórovitost, neúplné zaplnění spoje, přesah, atd. [22]

Vnitřní vady dělíme na trhliny, vady zaplnění pájkou, pevné vměstky, zachycení plynů, vměstky tavidla, nedostatečné roztavení, apod. [22]

Cílem každého pájení je vyhnout se těmto vadám, které jinak značně komplikují výrobu a provoz elektrických zařízení. Pro analyzování vad se může zařízení podrobit zkoušení, které se dělí na dvě základní části: na destruktivní a nedestruktivní zkoušení.

#### 3.1.1 Destruktivní zkoušení

Destruktivní zkoušení je takové zkoušení, při kterém dochází k destrukci (neboli porušení) zkoušeného vzorku. Jedná se o vzorky, které jsou zpravidla tímto zkoušením dále nepoužitelné. Jsou to zkoušky smykem, tahem, metalografickou kontrolou, tvrdosti, odlupovací zkoušky, zkoušky lámavosti. [23]

Tyto zkoušky se dělají jen výjimečně, pro diagnostický systém kontroly kvality velkého množství pájených spojů jsou z důvodu destrukce téměř nepoužitelné.

### 3.1.2 Nedestruktivní zkoušení

Nedestruktivním zkoušením lze zkoušet vybranou část výrobku, například pájený spoj, aniž by se porušila struktura materiálu daného výrobku. Tyto zkoušky jsou tudíž velmi vhodné k vytvoření diagnostického systému kontroly kvality v pájených spojích.

Zkoušky lze dělit na zkoušky:

- a) vizuální kontrolou,
- b) radiografické,
- c) kapilární,
- d) těsnosti,
- e) ověřovací,
- f) termografie,
- g) pomocí ultrazvuku.

[24]

#### a) Vizuální kontrola

Vizuální kontrola se dělí do dvou kategorií na přímou a nepřímou.

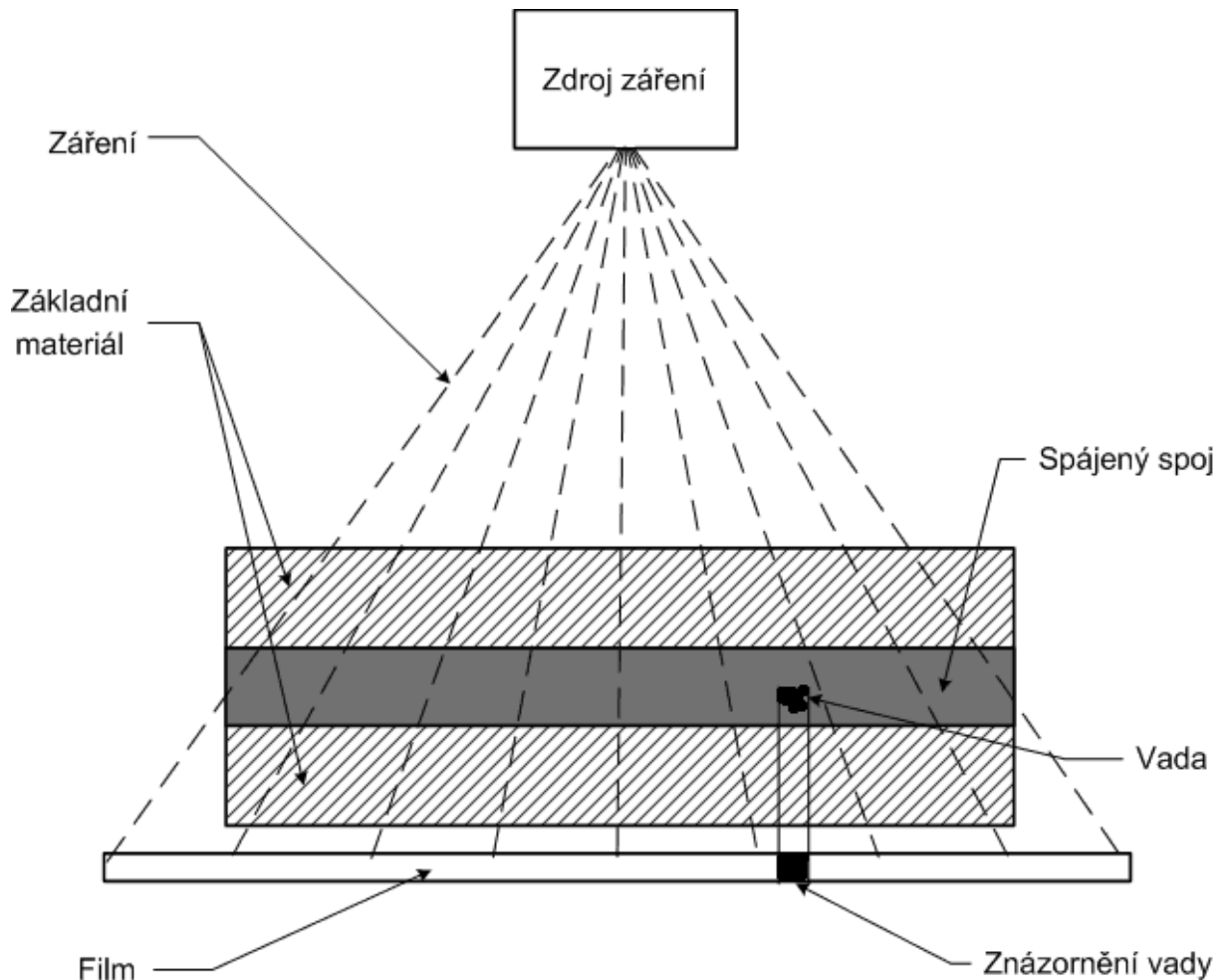
Při přímé kontrole není optická dráha mezi okem a pozorovaným předmětem přerušena. U této metody lze využít pomůcky, jako jsou například zrcátka a lupy. Je zde požadavek na dostatečnou intenzitu osvětlení. U místní kontroly, která je zaměřena na zjišťování detailu, by měla být vzdálenost optické dráhy menší než 600 mm, úhel mezi povrchem a okem by neměl přesahovat 30° a plocha by měla být osvětlena minimální intenzitou 500 luxů. [25]

Nepřímá vizuální kontrola se používá tam, kde přímou kontrolu nelze z důvodu nedostupnosti nebo bezpečnosti použít. U této kontroly je optická dráha mezi okem a povrchem zjišťovaného vzorku přerušena. Pomůcky pro tuto metodu jsou například videokopy, fotoaparáty a různé filmové techniky. [25]



### b) Radiografické zkoušení

Radiografické zkoušení, označované také prozařování, je metoda, při které se používá pronikavé rentgenové nebo gama záření. Díky prozáření na film lze identifikovat vnitřní kritické vady v daném vzorku. [24], [25]



Obr. 8: Princip prozařování (překresleno z [25])

Záření gama je krátkovlnné fotonové záření. Toto záření vzniká přechodem atomového jádra z vyššího energetického stavu do nižšího. Jeho energie fotonu je často udávána nad 10 keV. To odpovídá vlnové délce kratší než 124 pm. [26]

$$\lambda = h \cdot c \cdot E^{-1} \quad [m; eV \cdot s, m \cdot s^{-1}, eV] \quad (5)$$

kde:  $\lambda$  – vlnová délka

$h$  – Planckova konstanta ( $h = 4,13567 \cdot 10^{-15} eV \cdot s$ )

$c$  – rychlost světla ve vakuu ( $c = 3 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$ )

$E$  – energie fotonů

[27]

Rentgenové záření je krátkovlnné fotonové záření, které vzniká v elektronovém obalu atomu. Pro vznik tohoto záření je zapotřebí zdroj elektronů, zařízení pro urychlení elektronů a terčík pro zpomalení urychlených elektronů. [25]

#### c) Kapilární zkoušení

Toto zkoušení se používá u povrchových vad pájeného spoje, jako je např. pórovitost, výskyt trhlin a neúplné zatečení pájky. Bohužel, jedná se pouze o povrchovou zkoušku, zjištění vnitřní vady je kapilární metodou nemožné.

U této metody se využívá takzvaného kapilárního penetrantu, což je barevný nebo fluorescenční roztok. Princip spočívá v jeho smáčivosti a vzlínivosti. Penetrant se nanese na daný zkoušený vzorek, ten vnikne do povrchových vad, po určité penetrační době se zbytek penetrantu odstraní z povrchu vzorku prostředkem k tomu určeným, např. látkou napuštěnou rozpouštědlem nebo vodou. Poté se nanáší vývojka, díky ní se zbylý penetrant ve vadách zbarvuje a vadu lze tak zřetelně rozpoznat pomocí vizuální metody. [24], [25]

#### d) Zkoušení těsnosti

Zkoušení těsnosti lze využít pro stanovení celkové rychlosti úniku plynu z pájeného spoje nebo pro lokalizaci místa úniku plynu na daném spoji. [24]

Existují dva základní způsoby zkoušení:

1. Tlaková metoda – zjišťování úniku plynu pájeným spojem z dílu
2. Vakuová metoda – zjišťování úniku plynu pájeným spojem do dílu

Tato metoda lze použít ve všech etapách výroby. Pro účely diagnostiku pájeného spoje ve smyslu zkoušení pro elektronické využití se tato metoda nevyužívá. Její význam je např. u zkoušení ocelových tlakových nádob. [24]

#### e) Ověřovací zkoušení

Tato metoda spočívá ve vystavení spoje vyššímu zatížení než tomu, pro které je zařízení vyrobeno. Nicméně toto zatížení nesmí způsobit trvalou deformaci výrobku. Zatížením se rozumí: Zatížení tahem či tlakem, hydrostatickými metodami, zkouškou ve zkrutu, tepelnými šoky, apod. [24]

**f) Termografie**

U této metody se zkoušené místo zahřeje a poté se sleduje rozložení tepla v kritickém místě. Pro sledování tepla a ochlazování součástí lze například použít termo-kameru. V důsledku trhliny, či jiné vady má dané místo jinou teplotu chladnutí, která se projeví na termo-kameře jinou barvou. Při pájení mnoha spojů je tato metoda značně zdlouhavá. [24]

**g) Zkoušení ultrazvukem**

Jedná se o ultrazvukovou impulsovou odrazovou metodu nebo o metodu průchodovou [24]. Zkoušení ultrazvukem se používá tam, kde není možné daný vzorek dobře prozářit. Pod pojmem ultrazvuk si můžeme představit zvukovou vlnu o určité frekvenci, která je nad mezí slyšitelnosti lidského ucha – tedy nad 16 až 20 kHz. [25] Je to metoda, která je z hlediska dostupnosti a časové náročnosti pro kontrolu diagnostického systému nevhodnější, a proto jí bude věnována následující podkapitola.

**3.2 Zkoušení pomocí ultrazvuku**

Toto zkoušení využívá vysokofrekvenčních mechanických vln, kterými „prozvučí“ daný zkoušenec. Vlnění se šíří prostředím díky jeho elastickým vlastnostem. Jestliže vysílaná frekvence je nad 100 kHz, zvuková energie se šíří svazkem, který se může odrážet, lámat ohýbat a také absorbovat. Při frekvencích pohybujících se v řádech MHz jsou vlny tlumeny a vzduchem se nešíří, nicméně pevným materiálem se šířit mohou. [29]

Na základě odrazovaných nebo přijímaných paprsků (podle výběru metody), zaznamenává ultrazvukový přístroj nehomogenity ve zkoušenci. U pájeného spoje to mohou být například příčné (kolmé) trhliny, vzduchové bubliny (špatné zatečení pájky), pórovitost, či špatné roztavení pájky. Z hlediska velmi malé velikosti mezery mezi spojovanými materiály se nepředpokládá tvorba podélných prasklin.

### 3.2.1 Obecné vlastnosti ultrazvuku

Pohyb vlny v prostředí matematicky vyjadřuje vlnová rovnice, která se šíří určitou rychlostí

$$\text{v prostředí:} \quad a_{(t)} = A \cdot \sin \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \quad (6)$$

kde:  $a_{(t)}$  – výchylka částice z rovnovážné polohy v čase  $t$ ,

$A$  – amplituda vychýlené částice [m],

$\omega$  – kruhová frekvence [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$t$  – čas [s],

$x$  – vzdálenost kmitajícího bodu od počátku [m],

$c$  – rychlost šíření vlny [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

$$\text{Dále pak:} \quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (7)$$

kde:  $f$  - frekvence [Hz],

$T$  – perioda [s].

[25]

Pokud se zvuková vlna šíří prostředím rychlostí  $c$ , tak za čas odpovídající periodě  $T$  urazí vzdálenost odpovídající vlnové délce  $\lambda$ :

$$\lambda = cT \quad [m] \quad (8)$$

Pomocí vlnové délky lze teoreticky stanovit nejmenší možnou zjizvitelnou vadu, která bude zaznamenána. Jedná se o polovinu vlnové délky.

Velikost vad zjizvitelných pro danou frekvenci je teoreticky:

$$d_v \geq \frac{\lambda}{2} \cdot 10^3 \quad (9)$$

kde:  $d_v$  – průměr vady [mm].

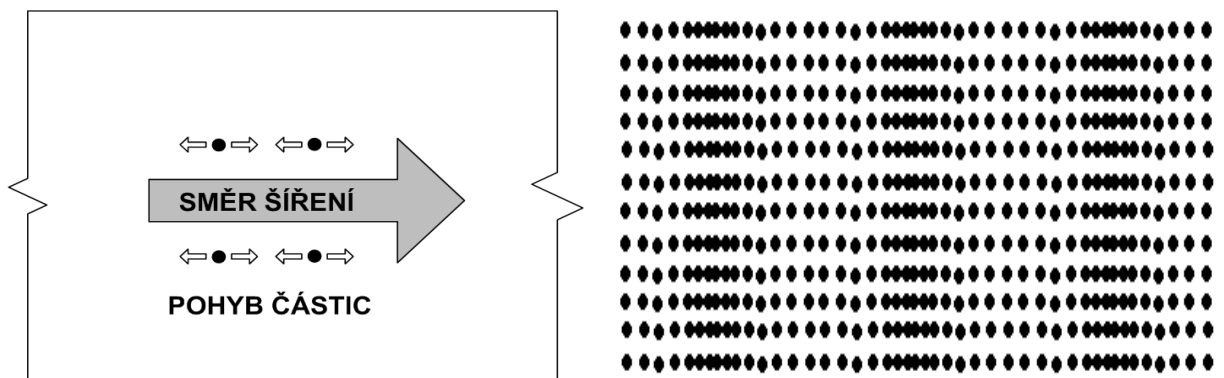
[29]

## Rychlost a šíření ultrazvukových vln

Rychlost šíření vlny v prostředí je závislé na druhu šíření vlny. Jedná se o vlny podélné, příčné, povrchové a deskové. Podélné a příčné vlny v ultrazvukové defektoskopii se používají nejvíce a proto jsou popsány v následujícím textu.

### Podélné vlny (Longitudinální – L)

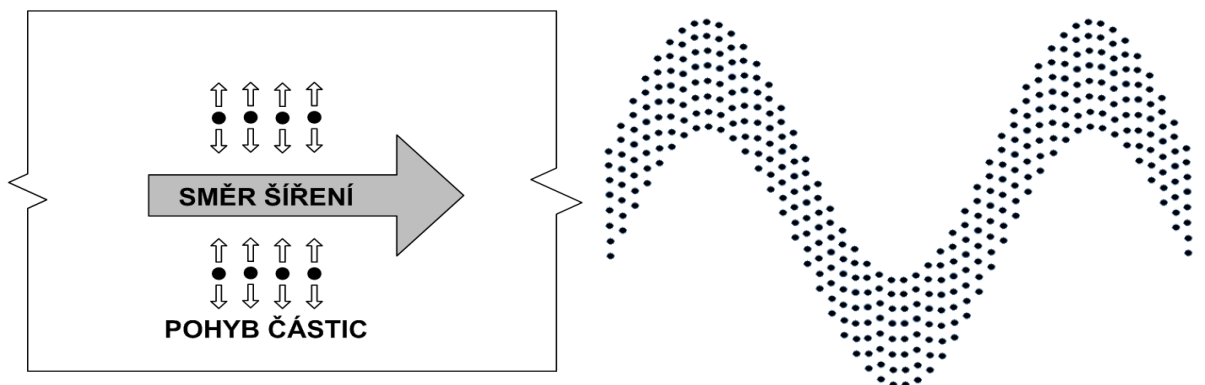
Částice zde kmitají ve směru šíření vlny. Tyto vlny jsou pro ultrazvuk nejdůležitější, protože jejich šíření je možné jak v pevných, kapalných, tak plynných prostředích. Při šíření dochází ke střídavému zhušťování a zředování částic prostředí – objemovým změnám prostředí. [29]



Obr. 9: Šíření podélného vlnění (překresleno z: [29])

### Příčné vlny (Transverzální – T)

Částice u tohoto vlnění kmitají kolmo na směr šíření. Jejich šíření je možné pouze v pevných prostředích. Rychlost vlnění je přibližně poloviční než u podélného šíření. Proto je také lze tímto vlněním zjistit poloviční vady při stejné frekvenci než u šíření předchozího. Při šíření nevzniká zhušťování ani zředování částic, ale jen vzájemný příčný posuv částic. [29]



Obr. 10: Šíření příčného vlnění (překresleno z: [29])

Rychlost šíření vln pro daný materiál se dají vypočítat ze znalostí hustoty  $\rho$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ], Poissonova čísla  $\mu$  [-] a modulu pružnosti v tahu - pro podélnou vlnu (značení  $C_L$ ), či modulu pružnosti ve smyku – pro příčnou vlnu ( $C_T$ ).

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)\cdot(1-2\mu)}} \quad [\text{ms}^{-1}]; \quad c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad [\text{ms}^{-1}] \quad (10); (11)$$

Pro měď je  $c_L = 4700 \text{ms}^{-1}$ ;  $c_T = 2260 \text{ms}^{-1}$ ; (při 20 °C)

Pro ocel:  $c_L = 5900 \text{ms}^{-1}$ ;  $c_T = 3250 \text{ms}^{-1}$ ; (při 20 °C) [29], [30]

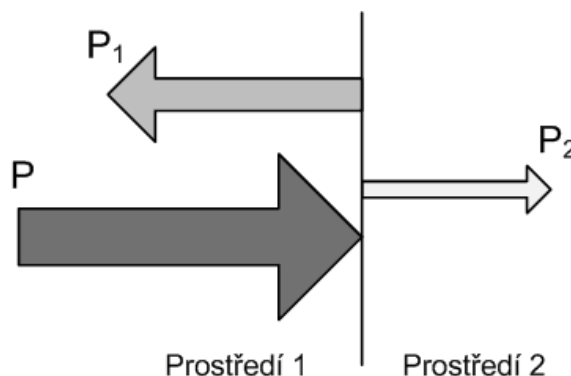
Při zkoušení mědi frekvencí 4 MHz, vychází minimální teoreticky zjistitelná vada:

$$d_{vL} = \frac{c_L}{2f} \cdot 10^3 = \frac{4700}{2 \cdot 4 \cdot 10^6} \cdot 10^3 = 0,588 \text{mm} \quad d_{vT} = \frac{c_T}{2f} \cdot 10^3 = \frac{2226}{2 \cdot 4 \cdot 10^6} \cdot 10^3 = 0,278 \text{mm}$$

### Odraz a lom rovinných vln na rozhraní dvou prostředí

Pokud dopadne vlna na rozhraní dvou prostředí, při kolmém dopadu dochází k odrazu vln, při šikmém dopadu i k lomu vln.

Při kolmém dopadu s akustickým tlakem  $P$ , dojde na rozhraní dvou prostředí k vytvoření odražené akustické vlny s akustickým tlakem  $P_1$  a k průchodu vlny s akust. tlakem  $P_2$  (viz obr. 11). K určení podílu odražené a prošlé vlny je nutný výpočet akustické vlnové impedance  $Z_1$  pro prostředí 1 a  $Z_2$  pro prostředí 2. Poté je možno určit faktor odrazu  $R$  a faktor průchodu  $D$ .



Obr. 11: Kolmý dopad na rozhraní  
(překresleno z: [29])

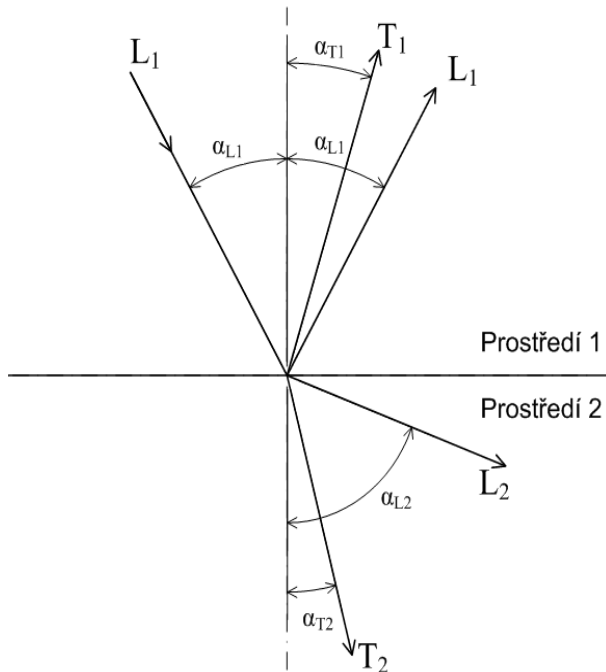
$$Z = \rho \cdot c \quad (12)$$

$$R = \frac{P_1}{P} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (13)$$

$$D = \frac{P_2}{P} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} = 1 + R \quad (14)$$

Při výpočtu rozhraní měď – vzduch, vychází  $R = -0,98$ , což vypovídá o 98 % odrazu s otočenou fází. Je to dáno hustotou vzduchu, která je oproti hustotě mědi zanedbatelná (měď:  $\rho_1 = 8960 \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ; vzduch:  $\rho_2 = 1,29 \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). [29], [30]

Při šikmém dopadu vlny mohou vzniknout při odrazu a lomu až čtyři vlnové složky. Tyto složky se šíří dále pod určitými úhly. Vzájemný vztah mezi nimi je dán Snellovým zákonem, který udává závislost mezi rychlostmi a úhly v sousedících prostředích. Pro obr. 12



Obr. 12: Šikmý dopad vlny na rozhraní (překresleno z: [30])

je matematické vyjádření Snellova zákona následující:

$$\frac{\sin \alpha_{L1}}{c_{L1}} = \frac{\sin \alpha_{T1}}{c_{T1}} = \frac{\sin \alpha_{L2}}{c_{L2}} = \frac{\sin \alpha_{T2}}{c_{T2}} \quad (15)$$

Je-li  $c_1/c_2 < 1$  nastává lom od kolmice, pokud je  $c_1/c_2 > 1$  nastává lom ke kolmici. Čím větší je tedy rychlost šíření v druhém prostředí ( $c_2$ ), tím větší je úhel lomu.

První kritický úhel  $\alpha_{L2} = 90^\circ$  představuje vymizení z druhého prostředí podélnou vlnu ( $L_2$ ). Stane se tak při:

$$\alpha_{L1} = \arcsin \frac{c_{L1}}{c_{L2}} \quad (16)$$

Jestliže se bude úhel  $\alpha_{L1}$  dále zvětšovat, dosáhne se i druhého kritického úhlu  $\alpha_{T2} = 90^\circ$ . Z druhého prostředí vymizí i příčná vlna ( $T_2$ ). Analogicky pak platí:

$$\alpha_{L1} = \arcsin \frac{c_{L1}}{c_{T2}} \quad (17)$$

Využití poznatků ze Snellova zákona slouží pro zkoušení ultrazvukem úhlovými sondami, jejichž cílem je prozvučit materiál tak, aby se v něm šířil pouze jeden druh vlny.

[28], [29], [30]

### 3.2.2 Ultrazvuk pro nedestruktivní defektoskopii

Pro ultrazvukovou nedestruktivní defektoskopii (ve zkratce - ultrazvuková NDT) se používají dvě základní metody, jsou to:

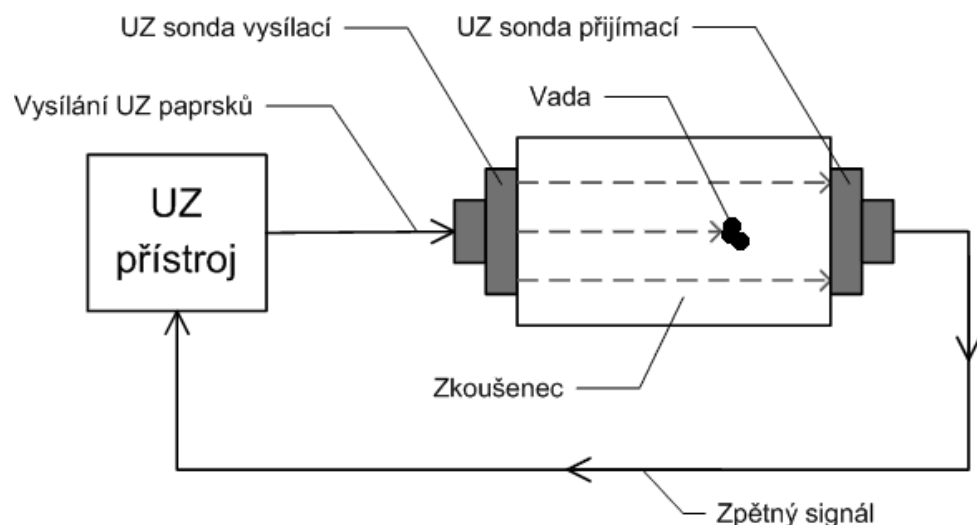
- průchodová metoda,
- impulzová odrazová metoda.

Obě tyto metody potřebují pro svoji činnost generátor impulzů, jednu, resp. dvě sondy a vyhodnocovací zařízení, které výsledek měření zobrazuje na obrazovce. Zpravidla bývá generátor a vyhodnocovací zařízení jeden přístroj, ke kterému se připojí příslušné sondy.

Sondy obsahuje jeden nebo více měničů. To jsou součástky měnící elektrickou energii na mechanickou a obráceně. Jsou to převážně piezoelektrické, kompozitové, magnetostrikční a elektrodynamické měniče. Pro kontrolu spojů tupých, pájených či svařovaných, kterých je u vinutí točivých strojů značná část, se používají úhlové sondy, které využívají buď přímého, nebo nepřímého odrazu. [29]

#### Metoda průchodová

Princip průchodové metody je znázorněn na obr. 13. Generátor vysílá impulzy do vysílací sondy. Pokud je zkoušenec bez vady, projde jím celý svazek impulzů, který zachytí přijímací sonda, která jej vede zpět do UZ přístroje. Zde se impulzy vyhodnocují a zobrazují. Je-li ve zkoušenci vada, vznikne úbytek akustického tlaku. Z důvodu útlumu materiálu se musí provádět měření nejprve na vzorku bez závad, a poté celé měření vyhodnocovat srovnávací metodou. [28]



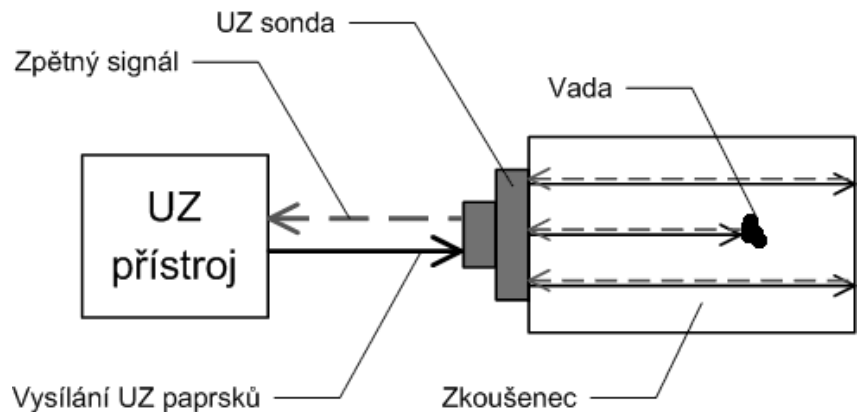
Obr. 13: Princip průchodové metody (převzato z: [28])



### Metoda impulzová odrazová

Princip odrazové metody je založen na odražení svazku generovaných paprsků a jejich zpětném vyhodnocování. Názorné naznačení této metody je na obr. 14.

Generátor vysílá impulzy přes sondu do zkoušenice. Ta slouží nejprve jako vysílací sonda. Pokud je zkoušenec bez vady<sup>8</sup>, projde jím celý svazek paprsků s nepatrným útlumem (vznik šumu) až



Obr. 14: Princip impulzové odrazové metody (překresleno z: [29], [30])

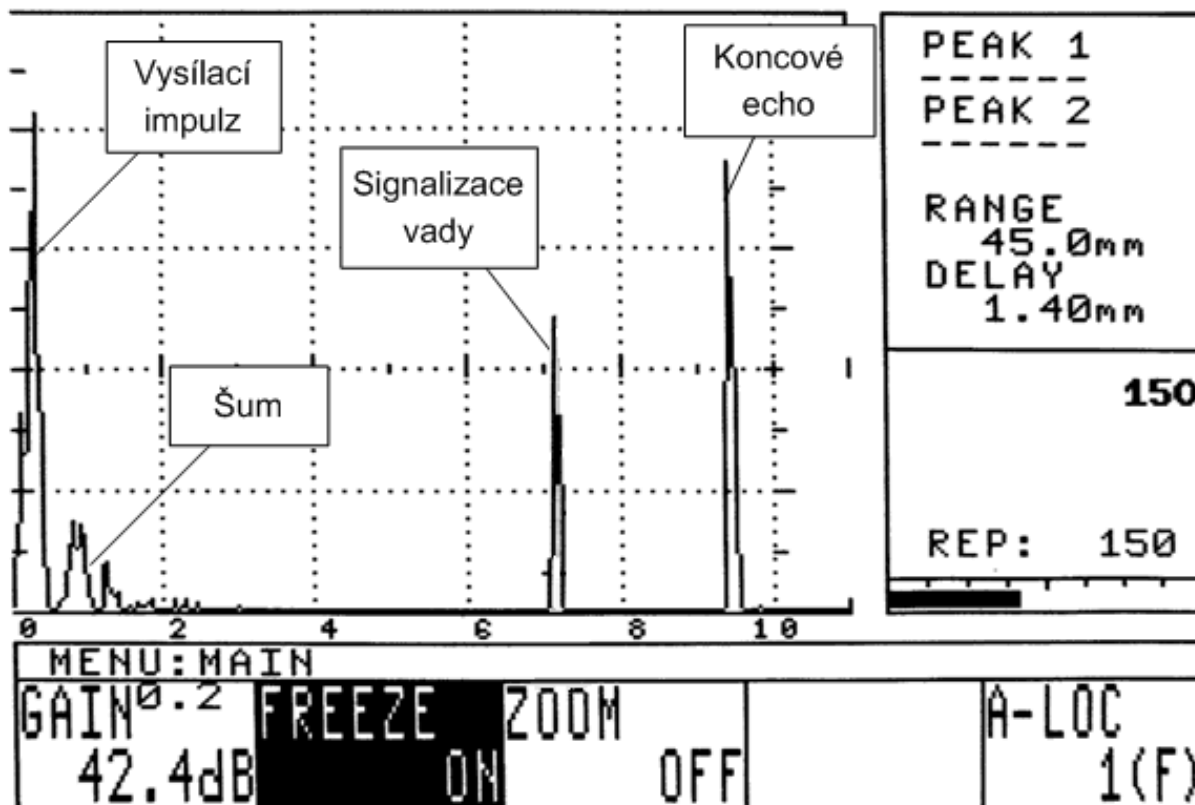
na konec zkoušenice (na hranu dvou prostředí), odrazí se zpět, a sonda, nyní již ve funkci přijímače, zachytí pouze koncové echo (odraz z konce zkoušenice). Pokud se ve zkoušenci vada vyskytuje, část paprsků neprojde až na konec zkoušenice, ale odrazí se v místě vady, tedy dříve v čase než koncové echo. Jedná se o závislost akustického tlaku vyslaných impulzů na čase. Tato vada je poté zobrazena na obrazovce UZ přístroje například jako na obr. 15. [30]

Tato metoda se využívá nejen pro zjišťování vad v podobě trhlin v materiálu a jiných nehomogenit, ale uplatnění má také pro přesné měření, např. tloušťky ocelí, délky šroubů, apod. Její výhodou, oproti průchodové metodě, spočívá v možnosti lokalizace místa vady. Při pájení (resp. svařování) je tato metoda s jednou kolmou sondou použitelná u spojů přepřátovaných na plochých materiálech. Pomocí úhlové sondy lze zkoušet i spoje tupé. [28], [29], [30]

<sup>8</sup> Bez vady se rozumí, že zkoušenec vyhovuje předem stanoveným kritériím. Jedná se např. o vady, které se vzhledem k svojí zanedbatelné velikosti neuvažují. Zkoušenec, který je naprosto v pořádku je možný uvažovat jen teoreticky.

### Šum vznikající při zkoušení

Šum, který je vidět na snímku (obr. 15) může mít více příčin. Zpravidla se jedná o šum z povrchu zkoušenice. Povrch by měl být co možná nejčistší a nejhladší, drsnost by neměla



Obr. 15: Ukázkový graf zkoušenice s vadou – snímek z UZ přístroje SONIC 1200HR (převzato z:[31])

přesahovat 6,3  $\mu\text{m}$ . Povrch se tedy očistí a pak se zpravidla opatřuje prostředkem, který dokáže kvalitně převést UZ vlnění do vzorku a zpět. Na rozhraní „sonda – zkoušený materiál“ jinak vzniká miniaturní mezera. Ta se odstraní vazebním prostředkem - vhodnou pastou, vazelínou či kapalinou. [29]

Dále sonda může zaznamenat strukturní šum zkoušeného materiálu (tzv. rozptyl). Ty se objevují podle toho, jak byl materiál vytvořen – při tváření materiálu.

Aby tyto šumy při měření zkoušenice nemátly, na začátku měření se proměří tzv. referenční měrka, která je stejná jako zkoušenec a ví se o ní, že je bez vad. Metoda zkoušení, použité sondy a prostředí, musí být shodné u obou měření. Sleduje se šum referenční měrky a pomocí toho se pak kalibruje citlivost UZ přístroje. [29]

### **3.3 Současný diagnostický systém kontroly kvality pájených spojů ve společnosti 1. SERVIS ENERGO a návrh k jeho zlepšení**

Diagnostický systém ve společnosti 1. SERVIS ENERGO pro kontrolu pájených spojů je v současnosti tvořen vizuální kontrolou pracovníky, kteří daný spoj zkonstruovali. Jedná se o nejrychlejší a nejjednodušší možnou kontrolu. Při přísném dodržování podmínek pájení lze teoreticky tuto kontrolu považovat za dostačující. Nicméně velkou roli zde má lidský faktor. Proto je zde otázka vhodného a doplňujícího diagnostického systému kontroly kvality spojů, který by lidský faktor alespoň z části dokázal nahradit.

#### **3.3.1 Doporučené doplnění diagnostického systému kontroly kvality pájených spojů**

Při hledání vhodné nedestructivní metody, která se opírá o české technické normy, (uvedeny v použité literatuře v bodu [24]) a dále o názory specialistů ze společnosti ADVANCED TECHNOLOGY GROUP s. r. o. (společnost zabývající se NDT metodami), se jeví jako nejvhodnější tyto čtyři metody nedestructivního zkoušení:

- metoda vizuální kontroly (+její případné doplnění),
- metoda kapilární,
- metoda radiografická,
- metoda ultrazvukové defektoskopie.

##### **Vizuální metoda**

Ponechání metody vizuální kontroly, která se již v 1. SERVIS ENERGO provádí, je zcela namístě. Případně uvážení možnosti rozšíření této metody o zobrazovací a přibližovací zařízení, které zajistí pracovníkům lepší a přesnější pohled na spájené součásti ke zjištění případného nedostatečného zatečení pájky, či trhlin. Jedná se ale pouze o vnější kontrolu, takže z finančního hlediska a z časových ztrát při zkoušení to může být neekonomické a tedy zbytečné tuto metodu rozšiřovat.

##### **Kapilární metoda**

Kapilární zkoušení z hlediska časové náročnosti a zjištění pouze vnějších vad se jeví jako nevhodné, nicméně v některých případech by mohlo být také využitelné.

### **Radiografická metoda**

Radiografická metoda je poměrně přesná metoda, která udává informaci o případných vnitřních vadách, nicméně je vhodná pouze pro přeplátované spoje. Dále je to drahá metoda, časově náročná a je nutné také vymezení zvláštního prostoru pro zkoušení. Při velkém množství spojů by bylo zkoušení značně zdlouhavé a neekonomické. Za úvahu stojí využití metody při požadavku na malé množství vysoce kvalitních spojů např. ve formě tzv. outsourcingu. Což znamená zhotovené spoje nechat zkontrolovat jinou společností, která má potřebné vybavení a zkušenosti. Zde by ale mohl být velký problém v dopravě.

### **Metoda ultrazvukové defektoskopie**

Tato metoda se zdá jako nejvhodnější. Odrazovou metodou lze snadno a rychle proměřit přeplátovaný spoj. Pomocí úhlových sond lze zkoušet i spoje tupé. Jedná se o zkoušení vnitřních vad spoje, což je velice důležitá informace. Problém při zkoušení nastává u tzv. dutých vodičů, které slouží ke chlazení vinutí. Spoje těchto vodičů ultrazvuk prozvučí chybně.

Diagnostika pomocí ultrazvuku začíná výběrem specializované společnosti, která doporučí vhodnou metodu, pomůže s výběrem zařízení pro zkoušení, zkalibruje přístroje, zaškolí pracovníky, uskuteční pozáruční servis, apod.

### ***Výběr specializované společnosti***

Některé společnosti zabývající se NDT:

*Advanced Technology Group s. r. o.;      CONTROLTEST spol. s.r.o.;      NDT Trade s.r.o.;*  
*PROXIS, spol. s.r.o.;      QC PLZEŇ s.r.o.;      Testima, spol. s.r.o.;*  
*R&R NDT Ultrasonic Testing;      STARMANS elektronics s.r.o.;      TSI System s.r.o.;*

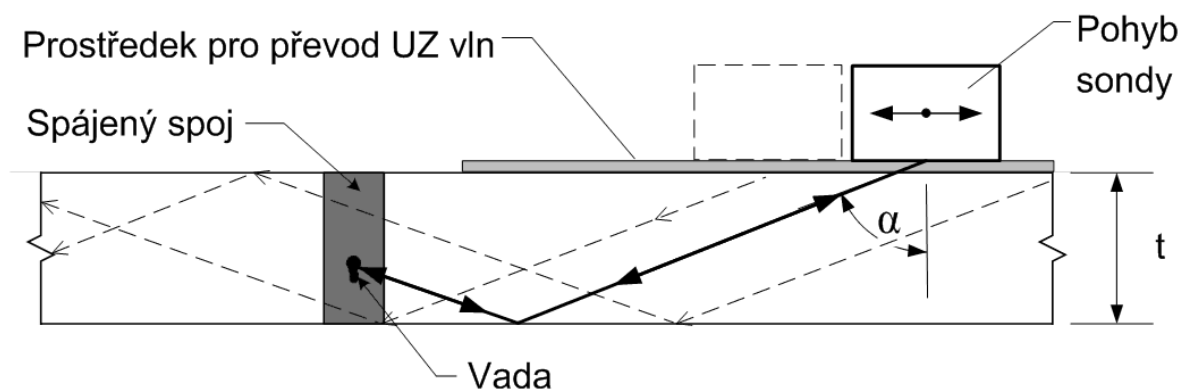
### ***Princip metody ultrazvukové defektoskopie uzpůsobený pro kontrolu tupých spojů***

Ultrazvuková metoda zkoušení pájených spojů je buď průchodová, nebo odrazová – pro plátované spoje s využitím kolmé sondy viz obr. 13 a obr. 14.

Pro kontrolu spojů tupých se využívá tzv. šikmého prozvučování pomocí úhlových sond. Spoje se převážně zkoušejí příčnými ultrazvukovými vlnami, díky kterým lze odhalit menší vady než u podélných vln při stejné frekvenci. To znamená, že úhel sondy  $\alpha$ , musí být mezi 1. a 2. kritickým úhlem, jejichž určení je popsáno na str. 39. Další kritérium pro výběr

vhodného úhlu sondy určuje tloušťka  $t$  spojeného materiálu. Pro tloušťky 5 - 25 mm bývá úhel  $70^\circ$ . Tloušťky 25 – 40 mm mívají úhel  $60^\circ$  a větší tloušťky bývají úhlem  $45^\circ$ . Pro zkoušení pájených spojů vinutí bude vhodný tedy úhel  $70^\circ$ . [25], [29]

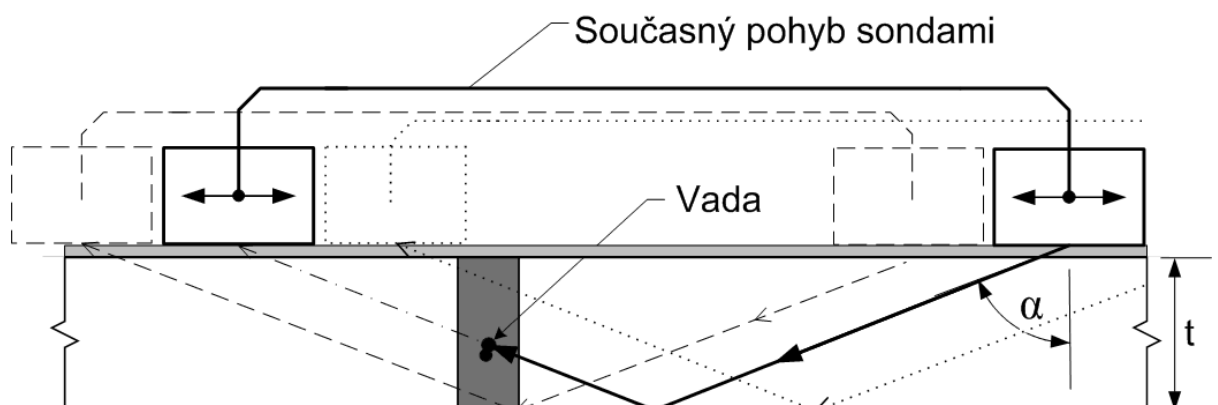
Dále se musí stanovit, zda půjde o zkoušení přímé, kdy paprsek sondy dopadá přímo na spájený spoj (pro spoje o tloušťkách nad 100 mm) nebo o zkoušení nepřímé, které se provádí jedním, či několika odrazy. V případě spojování vinutí jde tedy o nepřímé zkoušení



Obr. 16: Nepřímé zkoušení úhlovou sondou – odrazová metoda (překresleno z: [28])

odraženým paprskem. Obr. 16 znázorňuje nepřímé zkoušení odrazovou metodou pomocí úhlové sondy. Vlna je ze sondy vyslána přes vazební prostředek, odráží se o hrany materiálu až do ztracena. Pokud je ve spoji vada, vlna se téměř okamžitě odrazí zpět do sondy a na obrazovce UZ přístroje se zobrazí echo vady. [30]

Zkoušení tupého svaru průchodovou metodou znázorňuje obr. 17. Vlna je ze sondy vyslána přes vazební prostředek, odráží se o spodní hranu materiálu do přijímací sondy,



Obr. 17: Nepřímé zkoušení úhlovou sondou – průchodová metoda (překresleno z: [29])

pokud je spoj v pořádku. Je-li ve spoji vada, vlna se do přijímací sondy dostane utlumená o velikost dané vady.

V obou případech se sondami přibližuje, resp. oddaluje od spoje, aby se celý ve své výšce prozvučil. Zároveň se sondami pohybuje do stran, aby se spoj prozvučil po celé své délce. Důležité pro průchodovou metodu je současný pohyb obou sond. Podle úhlu sond a tloušťky materiálu musí být sondy od sebe vzdáleny konstantní vzdáleností. Toho lze dosáhnout jejich spojením. Toto spojení může mít navíc funkci polohovadla. [29]

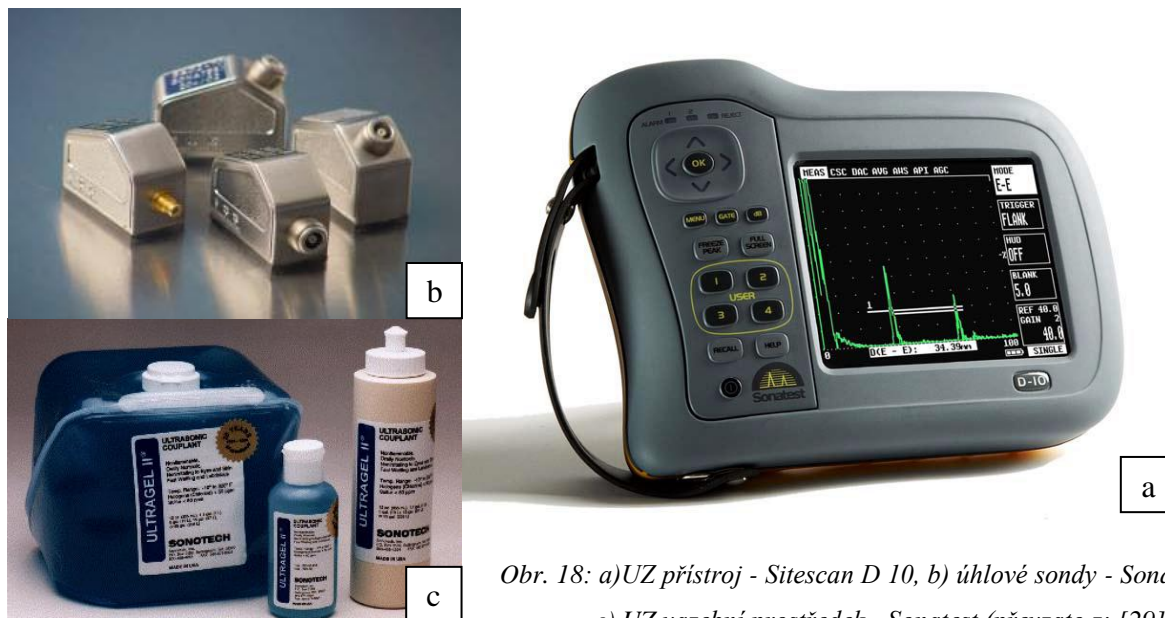
Neméně důležité je také nanesení vazebního prostředku pro kvalitní přenos vln do zkoušence. Vazební prostředek by měl být nanesen rovnoměrně po celé ploše zkoušení. Sondy se po něm musí lehce pohybovat. Nesmí vzniknout místo, kde mezi sondou a zkoušeným materiálem bude vzduchová mezera.

Pro zpřesnění a zkvalitnění měření je důležité správně zkalibrovat přístroj pro konkrétní měření. Je vhodné vytvořit kvalitní pájený spoj s části závitu vinutí jako referenční měрку, pro danou sérii zkoušení pájených spojů. Podle této měřky se nastaví UZ přístroj a výsledky měření se mohou srovnávat pomocí porovnávací metody měření. [29]

Je dobré také vytvořit další vzorky s umělými vadami, které poslouží ke zjištění chování přístroje v daných vadných stavech. Například vyfrézovat po délce svaru drážku o hloubce 0,5 mm, proměřit vzdálenosti, kdy sonda vadu vyhodnotí a zaznamenat velikost echa vady. Díky tomu může pracovník odhadnout velikost vady, někdy její polohu a tedy i její důležitost. [29]

### Výběr zařízení pro zkoušení

Ultrazvukových přístrojů (obr. 18 a)) je na trhu celá řada. Liší se především svými parametry a funkcemi. Například rozsahem frekvence, přesností přístroje, hmotností



Obr. 18: a)UZ přístroj - Sitscan D 10, b) úhlové sondy - Sonatest, c) UZ vazební prostředek - Sonatest (převzato z: [29])

a rozměry, napájením, automatickým výpočtem velikosti vady, měřením hloubky, velikostí displeje, dotykovým ovládním, odolností, apod. Záleží jen na zákazníkovi, jaké má požadavky. Cena běžného přístroje pro UZ zkoušení se pohybuje kolem 100 000 - 200 000 Kč, i více. [29]

Pro UZ přístroj bývá potřeba dokoupit sondy, podle zvolené metody zkoušení. Rozdělují se na přímé a úhlové, také podle použitého vlnění na sondy podélných vln, resp. příčných, na sondy jednoduché (vysílací/přijímací) nebo dvojité a sondy speciální. Dále se sondy rozlišují podle frekvence, velikosti měniče, u úhlových také podle úhlu lomu. Ukázka úhlových sond je zobrazena na obr. 18 b). Cena sond se pohybuje od 5 000 – 15 000 Kč. Cena je závislá hlavně na přesnosti a druhu sondy. [29]

Dále je pro zkoušení důležitý vazební prostředek (obr. 18 c)) pro šíření vlny na rozhraní sonda - zkoušenec. Jsou to stabilní gely na vodné či olejové bázi. Liší se pracovním rozsahem teplot, ve způsobu odstranění (vodou, rozpouštědly), v práškové podobě (vodou rozpustný), v pastové podobě. [29]

## **Závěr**

Pájené spoje, jak pro vinutí elektrických točivých strojů, tak pro elektroniku všeobecně, jsou velice důležitou částí v elektrickém obvodu daného zařízení. Přísným dodržováním postupu pájení, vyškoleným personálem, výběrem vhodné metody ohřevu a používáním kvalitního a vhodného materiálu pro zkonstruování pájeného spoje, tím vším je možné kvalitu pájeného spoje ovlivnit. To vše je ale závislé na lidském faktoru, který může pochybit. Pomocí diagnostiky pájených spojů lze zjistit tyto chyby, které jinak mohou způsobit značné ztráty, jak peněžního charakteru, tak i ztráty na životech z důsledku nepředvídatelného chování stroje.

Metod a způsobů ověřování kvality pájených spojů je celá řada, nicméně metod pro pájené spoje, které jsou elektricky využívány, mnoho není. Zvláště pak u nedestruktivního zjišťování vnitřních vad spojů. Tato práce poskytuje přehled možných způsobů kontroly kvality pájených spojů vytvořených tvrdou metodou podle ČSN EN 12799 se zaměřením právě na zjišťování vnitřních vad pro vinutí výkonových elektrických točivých strojů. Nejvhodnější metoda pro tuto kontrolu se jeví metoda ultrazvukové defektoskopie, která je relativně přesná, časově nepříliš náročná, a která má i přes svoji značnou historii stále velké uplatnění v nedestruktivním zkoušení.

Bohužel možnost vyzkoušení daných ultrazvukových metod na konkrétních zkoušencích se neuskutečnila z důvodu časového zaneprázdnění specialistů ze společnosti **ADVANCED TECHNOLOGY GROUP s. r. o.** Prakticky se vyzkoušela pouze metoda vířivými proudy, která se zdála být také pro zkoušení spojů vhodná, nicméně z důvodu různých vlastností spojovaného materiálu a pájky je tato metoda naprosto nevyhovující. Její uplatnění je pouze u zkoušení materiálu se stejnými vlastnostmi – např. hledání trhlin v ocelových trubkách. Proto tato metoda není ani uvedena v textu práce.

Výběrem vhodné metody ultrazvukové defektoskopie, vhodného zařízení a správným nastavením a zkalibrováním přístrojů, je toto nedestruktivní zkoušení kontroly kvality pájeného spoje v praxi reálně proveditelné.



## Literatura

- [1] RŮŽA, V. *Pájení*, SNTL, Praha 1988
- [2] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Pájení> [cit. 15. ledna 2012]
- [3] [http://www.indium.com/\\_dynamo/download.php?docid=323](http://www.indium.com/_dynamo/download.php?docid=323) [cit. 26. října 2011]
- [4] Szendiuch I. *Pájení a bezolovnaté pájky*, Brno 2008  
[http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/novinky/pb\\_free.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/novinky/pb_free.pdf) [cit. 15. ledna 2012]
- [5] ČSN EN ISO 17672:2010 – Tvrdé pájení – Pájky
- [6] <http://fluxamat.cz/> [cit. 22. dubna 2012]
- [7] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Měď> [cit. 15. dubna 2012]
- [8] ČSN EN 1045:1999 – Tvrdé pájení - Tavidla pro tvrdé pájení - Klasifikace a technické dodací podmínky
- [9] Interní materiály společnosti 1. SERVIS – ENERGO, s.r.o.
- [10] [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_brazing\\_alloys](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_brazing_alloys) [cit. 16 března 2012]
- [11] <http://www.vuz.sk/?cid=865> [cit. 19. dubna 2012]
- [12] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Rezistivita> [cit. 19. dubna 2012]
- [13] <http://www.medportal.cz/trubky-v-tzb/odborna-instalace-medenych-trubek/pajky-a-tavidla-pro-pajeni-natvrdo> [cit. 15. dubna 2012]
- [14] [http://www.technicalmaterials.umicore.com/en/bt/brazingCenter/show\\_en\\_P\\_01\\_PrinciplesOfBrazingTechnology.pdf](http://www.technicalmaterials.umicore.com/en/bt/brazingCenter/show_en_P_01_PrinciplesOfBrazingTechnology.pdf) [cit. 22. dubna 2012]
- [15] SEQUENZ, H., kolektiv *Technologie vinutí elektrických strojů točivých*, SNTL, Praha 1980
- [16] ČERNÝ, V. Indukční ohřev, *ELEKTRO - odborný časopis pro elektrotechniku*, 2002/10-12, 2003/1-5, FCC PUBLIC s. r. o., Praha, ISSN 1210-0889

- [17] MIKULČÁK, J., kolektiv *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*, SPN, Praha 1988, 54-09-12/1
- [18] <http://www.maha-cz.cz/cz/produkty/rovnani-ramu/indukcni-ohrev/jh-1300-400-k/>  
[cit. 1. května 2012]
- [19] <http://www.dw-inductionheating.com/wp-content/uploads/2011/10/brazing.jpg>  
[cit. 3. března 2012]
- [20] MINAŘÍK, V. *Plamenové svařování*, Scientia, spol. s r.o., Praha 1997, ISBN 80-7183-080-1
- [21] <http://www.gas-tec.com/Brazing New Brochure.pdf> [cit. 3. března 2012]
- [22] ČSN EN ISO 18279:2004 – Tvrdé pájení – Vady v pájených spojkách
- [23] ČSN EN 12797:2002 – Tvrdé pájení – Destruktivní zkoušky pájených spojů
- [24] ČSN EN 12799:2002 – Tvrdé pájení – Nedestruktivní zkoušení pájených spojů
- [25] KOPEC, B., kolektiv: *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*, Akademické nakladatelství CERM, Brno 2008, ISBN 978-80-7204-591-4
- [26] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Záření\\_gama](http://cs.wikipedia.org/wiki/Záření_gama) [cit. 12. prosince 2011]
- [27] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronvolt> [cit. 12. prosince 2011]
- [28] KREIDL, M., kolektiv *Diagnostické systémy*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2001, ISBN 80-01-02349-4
- [29] Interní materiály společnosti ADVANCED TECHNOLOGY GROUP, s. r. o.
- [30] OBRAZ, J. *Ultrazvuk v měřicí technice*, SNTL, Praha 1984
- [31] <http://www.imaterialy.cz/Stavebni-technika/Moznosti-vyuziti-ultrazvukove-impulsni-metody-ve-stavebni-praxi.html> [cit. 25. dubna 2012]

# **Přílohy**

## **Příloha č. 1 – Výroba pájeného spoje plamenovým ohřevem**

Pájený spoj konstruovaný pro cívky vyniklých pólů rotoru hydroalternátoru. Veškeré obrázky pořízeny ve společnosti 1. SERVIS ENERGO, s. r. o.

### **1. Čištění ploch pro pájení**

Nejprve hrubé očištění pomocí smirkového papíru, poté očištění pomocí acetonu.



*Obr. 19: Hrubé očištění ploch pro pájení pomocí smirkového papíru*

## **2. Nanesení tavidla**

Nános musí být po celé ploše budoucího spoje a v jeho okolí.



*Obr. 20: Nanesení tavidla (zde tekuté tavidlo BF-103)*

## **3. Vložení pájky do mezery**



*Obr. 21: Pájka Ag45CuZn ve formě plechu o tloušťce 0,2 mm*





*Obr. 22: Vložení pájky do mezery*

#### **4. Ukončení příprav před ohřevem**

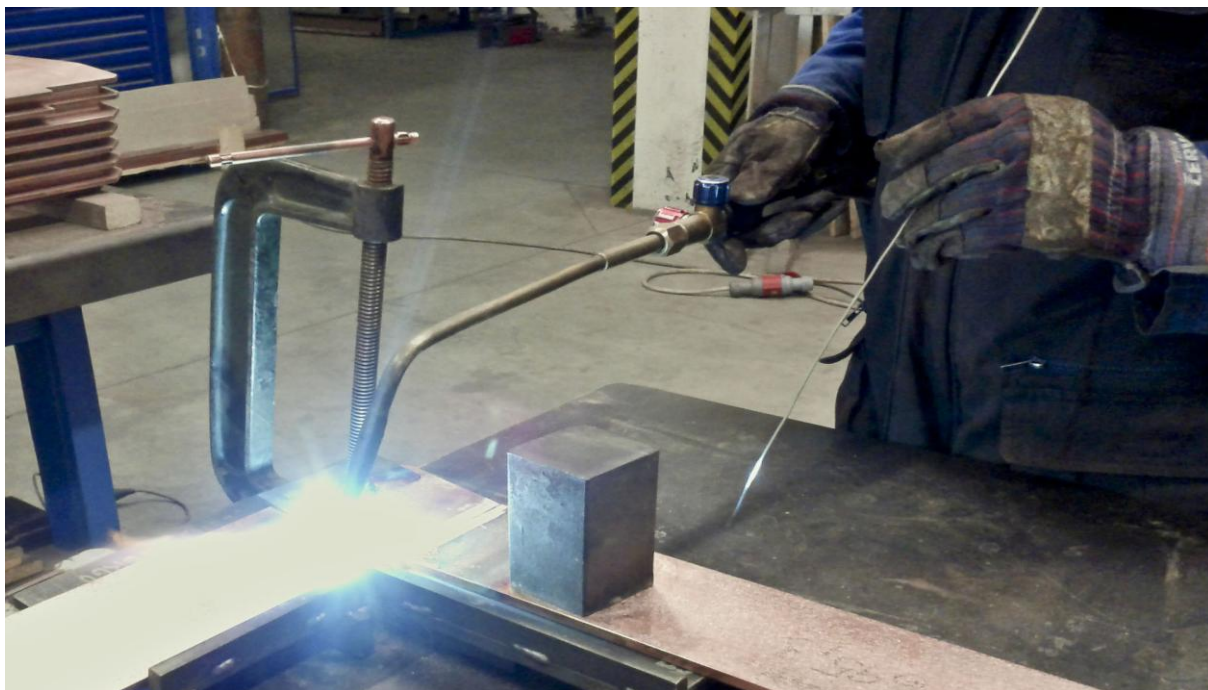


*Obr. 23: Připravený materiál pro ohřev pomocí upínací svorky*



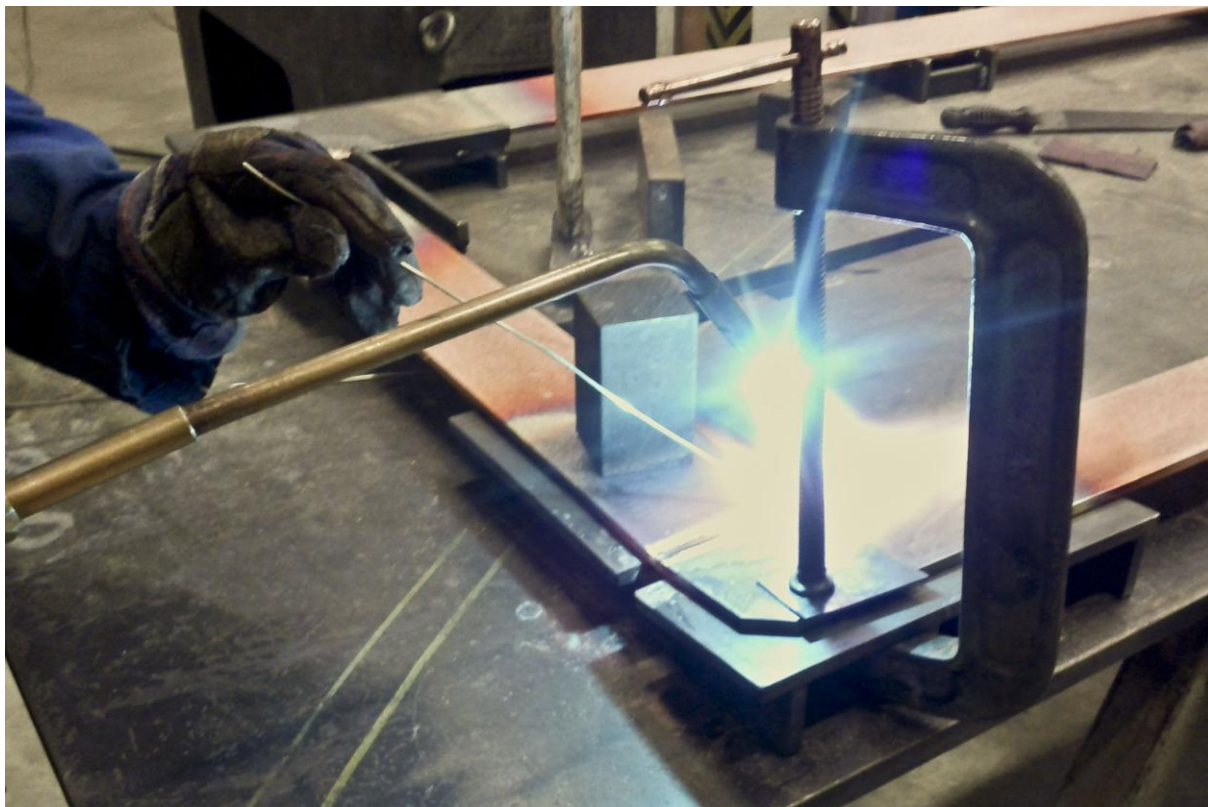
*Obr. 24: Hořák pro plamenový ohřev*

## **5. Ohřev pomocí plamenové metody**

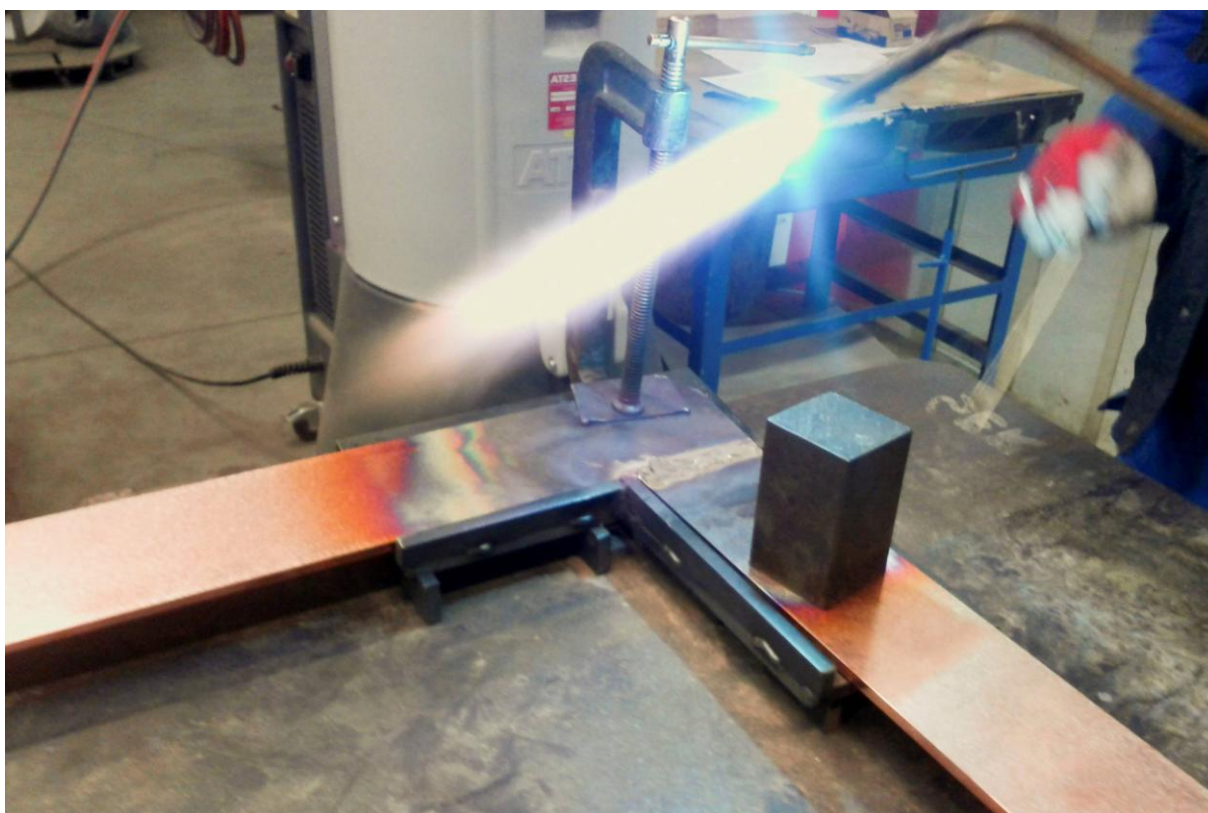


*Obr. 25: Ohřívání okolí pájeného spoje*





*Obr. 26: Doplnování pájky v drátové formě o průměru 2 mm*



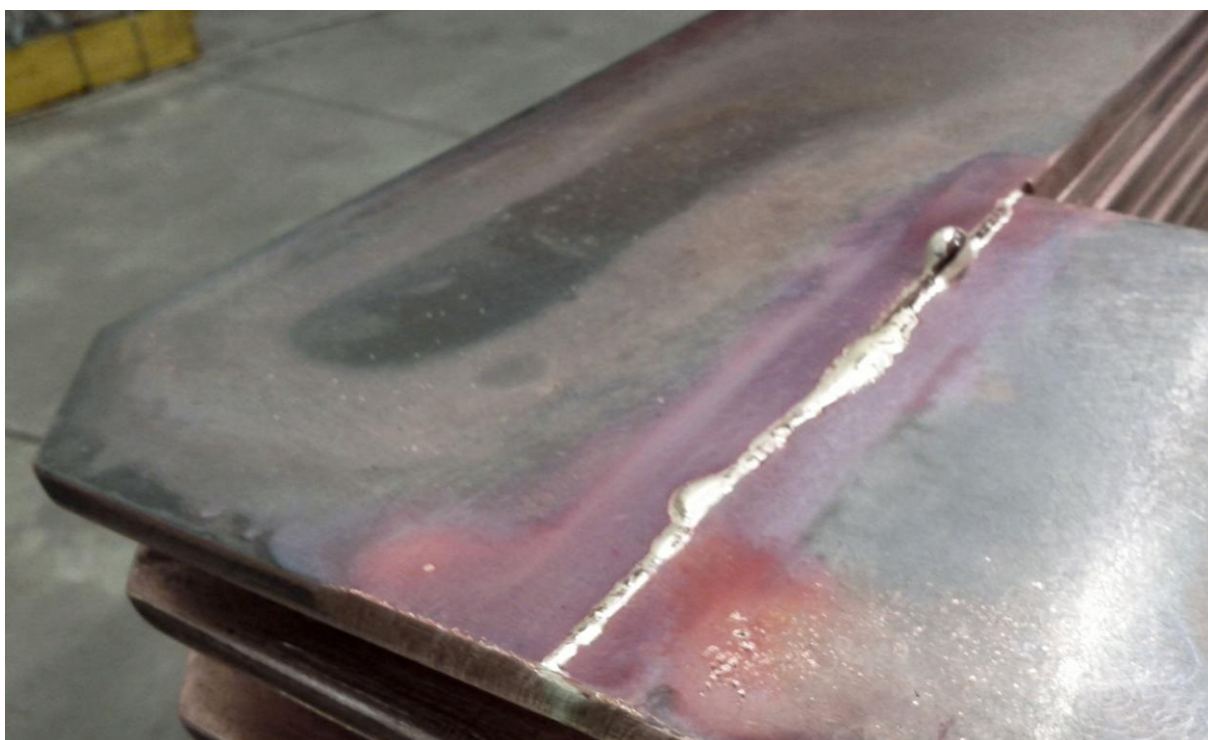
*Obr. 27: Spájený spoj, ukončení ohřevu*



## **6. Vizuální kontrola spoje**



*Obr. 28: Pájka ve spoji, okolí s nečistotami*



*Obr. 29: Spodní strana spoje, kontrola zatečení pájky*

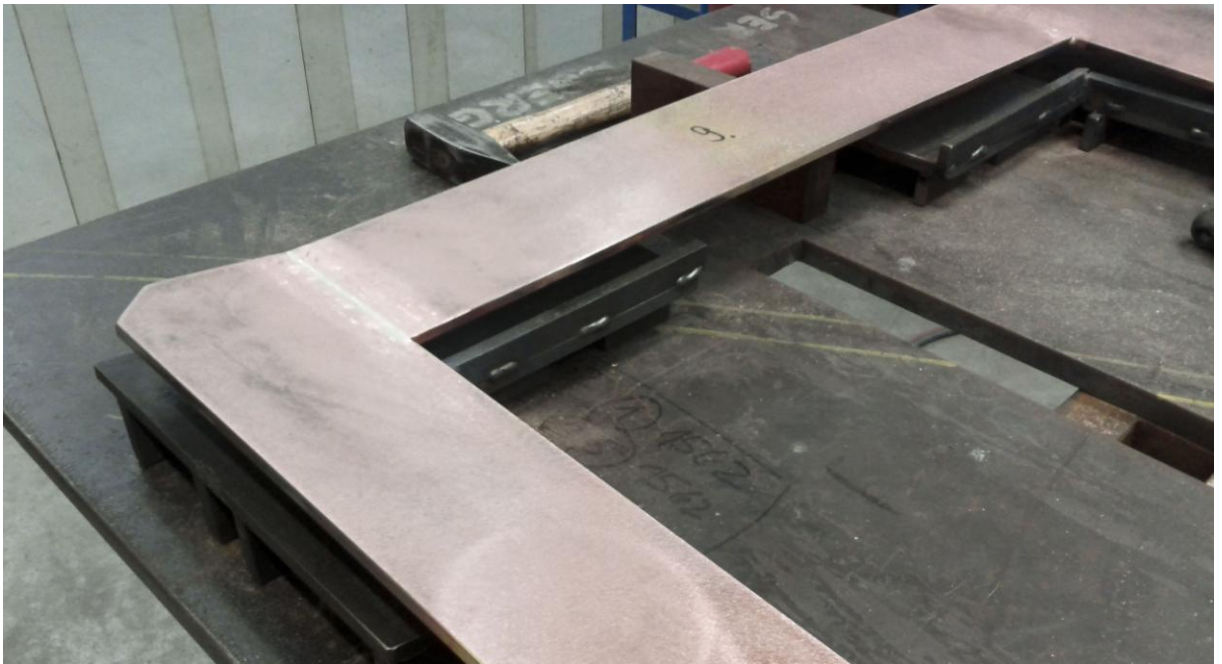
## **7. Očištění nečistot**

Nejprve se provádí zarovnání spoje pomocí úhlové brusky, poté následuje čištění pomocí excentrické brusky.



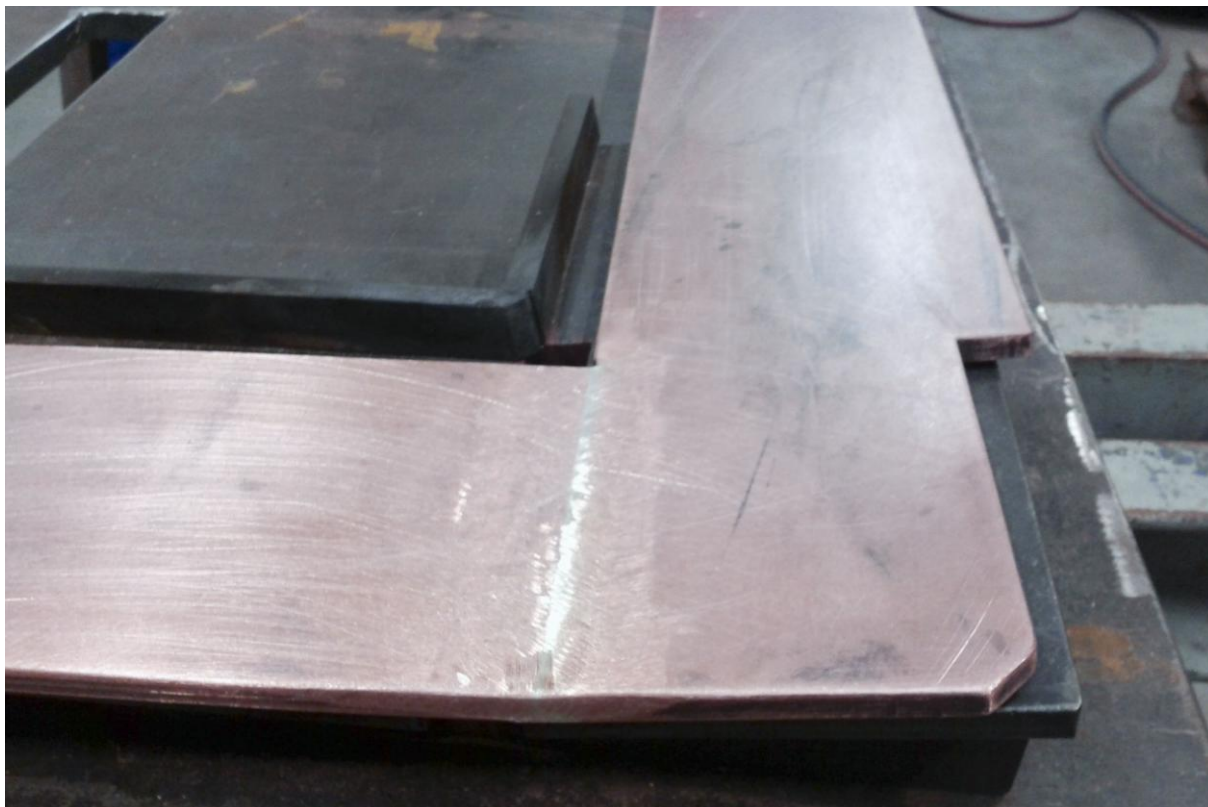
*Obr. 30: Čištění pomocí excentrické brusky*

## **8. Výsledek pájení**

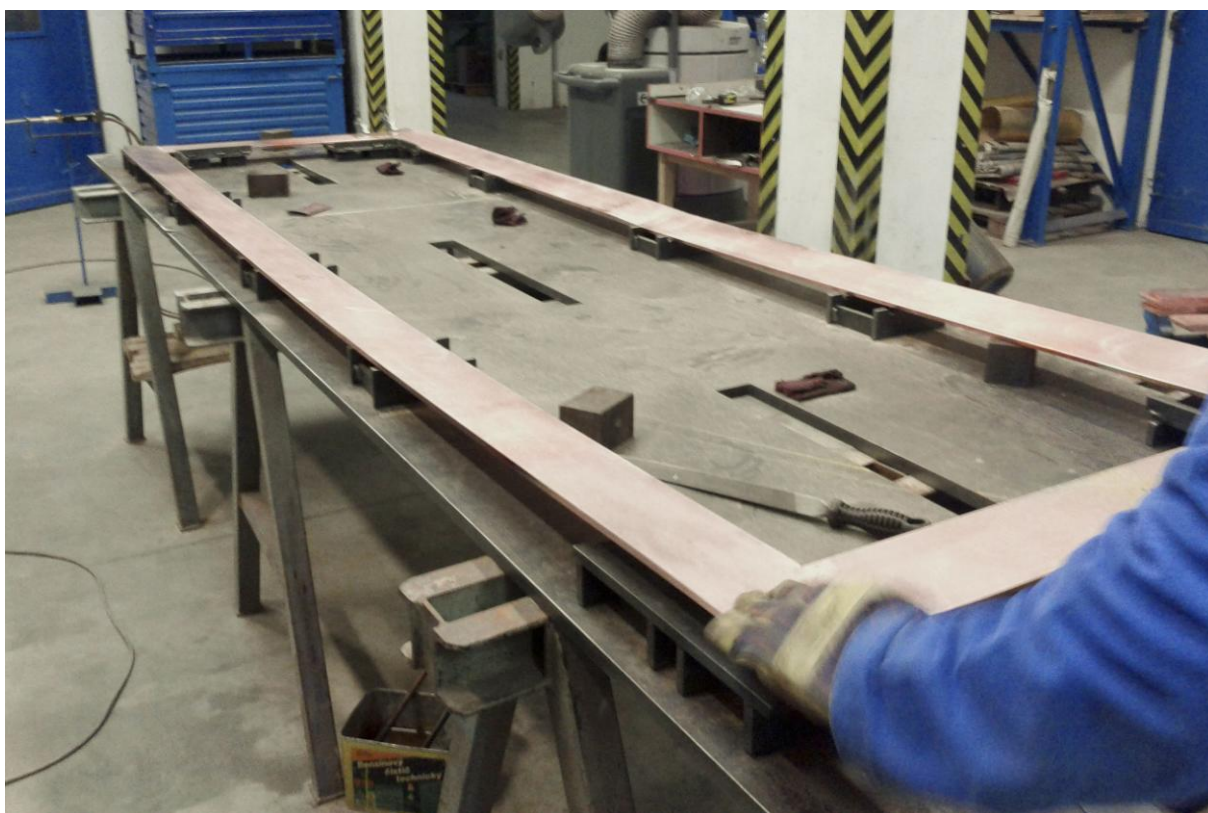


*Obr. 31: Pohled na spájený spoj*





*Obr. 32: Detail spoje*



*Obr. 33: Jeden závit pólového vinutí*

**Věc:** Udělení souhlasu s citací norem

**Č.j. :** 01805/1200/2012

Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) uděluje tímto Janu Salzmanovi (Západočeská univerzita v Plzni), souhlas s použitím částí norem ČSN EN ISO 17672:2010 – Tvrdé pájení – Pájky, ČSN EN 1045:1999 – Tvrdé pájení - Tavidla pro tvrdé pájení - Klasifikace a technické dodací podmínky, ČSN EN ISO 18279:2004 – Tvrdé pájení – Vady v pájených spojích, ČSN EN 12797:2002 – Tvrdé pájení – Destruktivní zkoušky pájených spojů, ČSN EN 12799:2002 – Tvrdé pájení – Nedestruktivní zkoušení pájených spojů, za účelem citace v diplomové práci ***Pájené spoje vinutí elektrických točivých strojů***. Podmínkou je uvedení zdroje citace v diplomové práci.

Za ÚNMZ, 09. 05. 2012:  
Úřad pro technickou normalizaci,  
metrologii a státní zkušebnictví  
Gribovova 24, P.O.Box 49  
128 01 Praha 2

Bc. Patrik Vogel

Zástupce ředitele, Kancelář Úřadu

