

# **Aplikace pájecího prostředku do B-spoje trubky pro zlepšení výsledků vnitřní čistoty chladiče**

Ing. Petra Havlíková

---

Bakalářská práce  
2019

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**

**Fakulta technologická**

**Ústav výrobního inženýrství**

**akademický rok: 2018/2019**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

**(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)**

**Jméno a příjmení: Ing. Petra Havlíková**

**Osobní číslo: T16512**

**Studijní program: B3909 Procesní inženýrství**

**Studijní obor: Technologická zařízení**

**Forma studia: kombinovaná**

**Téma práce: Aplikace pájecího prostředku do B-spoje trubky pro zlepšení výsledků vnitřní čistoty chladiče**

**Zásady pro vypracování:**

**vypracujte rešerši na dané téma  
popište stávající stav a jeho technické problémy  
navrhněte technické řešení daného problému  
vyhodnoťte dosažené výsledky**

Rozsah bakalářské práce: **cca 60 stran**  
Rozsah příloh:  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Paul T. Vianco: Soldering Handbook, Sandia National Laboratories, New Mexico**
2. **Shigley J. E., Mischke Ch. R., Budynas R. G.: Konstruování strojních součástí, VUT IUM 2011**
3. **Mott R. L.: Machine Elements in Mechanical Design, Pearson Prentice Hall 2005, 4th edition**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Maloch, CSc.**  
Ústav výrobního inženýrství  
Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2019**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2019**

Ve Zlíně dne 14. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 23. 5. 2019

.....

---

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá technologií pájení používanou při výrobě hliníkových chladičů. Teoretická část je zaměřena na vymezení základních pojmů, rozdělení pájek a na teoretické základy pájení v ochranné atmosféře. V praktické části je nastíněn postup výroby a funkce chladiče v automobilu. Dále je popsán problém související se zbytky pájecích prostředků po pájení a jejich negativní vliv na funkci chladičového systému. Je vysvětlen proces zkoušky vnitřní čistoty chladiče, prezentovány nepříznivé výsledky při stávajícím výrobním procesu. Ve spolupráci s odbornou firmou bylo navrženo technické řešení – aplikační systém pájecího prostředku do B-spoje trubky. Na závěr jsou prezentovány zlepšené výsledky po implementaci navrženého řešení.

Klíčová slova: pájení, pájka, smáčivost, difuze, eroze, ochranná atmosféra, chladič, vnitřní čistota, aplikace pájky

## **ABSTRACT**

This treatise is occupied by brazing technology used in the production of aluminum radiators. Theoretical part is focused on the definition of key terms, classification of flux and the theoretical basis of controlled atmosphere brazing. Practical part sketches the production process and function of the radiator in the car. Next is described the issue related with residue flux after brazing and its negative influence on the cooling system function. Then is described the test of internal cleanliness; presented the wrong results in the current production process. In cooperation with a specialized company, a technical solution – application system of brazing paste into B-joint of the tube was proposed. Lastly, improved results after implementation of the proposed solution are presented.

Keywords: brazing, flux, wetting, diffusion, erosion, controlled atmosphere, radiator, internal cleanliness, flux application

Motto:

*„Tři hlavní věci, kterých je třeba, aby se dosáhlo čehokoliv, co za to stojí, jsou: práce, vytrvalost a zdravý rozum.“ (Thomas Alva Edison)*

Poděkování patří Ing. Jaroslavu Malochovi, CSc. za odborné vedení bakalářské práce, poskytování rad a připomínek. Ráda bych poděkovala také rodině, která mi byla velkou oporou během studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná v IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>11</b>
<b>1 OBECNĚ O PÁJENÍ.....</b>	<b>12</b>
1.1 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ .....	12
1.2 PÁJKA.....	12
1.3 SMÁČIVOST PÁJKY .....	13
1.4 ROZTĚKAVOST .....	14
1.5 VZLÍNAVOST PÁJKY.....	15
1.6 ROZDĚLENÍ PÁJEK .....	15
1.6.1 Měkké pájky.....	15
1.6.2 Tvrdé pájky .....	16
1.7 DIFUZE A EROZE .....	18
1.8 TAVIDLA .....	20
1.8.1 Oxidace materiálu .....	21
1.8.2 Tavidla v hromadné výrobě .....	22
1.8.3 Skupiny tavidel v hromadné výrobě .....	25
1.8.4 Kritéria výběru tavidla .....	26
1.8.5 Specifikace rozsahu teplotního toku .....	26
<b>2 PÁJENÍ V PECE, KONTROLOVANÁ ATMOSFÉRA .....</b>	<b>28</b>
2.1 KONTROLOVANÁ ATMOSFÉRA PRO PÁJENÍ .....	28
2.1.1 Aplikace kontrolované atmosféry .....	29
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>32</b>
<b>3 CHLADICÍ SYSTÉM AUTOMOBILU.....</b>	<b>33</b>
3.1 CHLADIČ AUTOMOBILU .....	33
3.2 PROCES PÁJENÍ HLINÍKOVÉHO JÁDRA .....	36
3.2.1 Analýza zapájení .....	38
<b>4 VNITŘNÍ ČISTOTA CHLADIČE .....</b>	<b>40</b>
4.1 ZKOUŠKA VNITŘNÍ ČISTOTY .....	40
4.1.1 Výsledky vnitřní čistoty pro vybrané chladiče.....	42
4.2 NÁVRHY ŘEŠENÍ PROBLÉMU .....	43
<b>5 PROCES APLIKACE TAVIDLA DO TRUBKY .....</b>	<b>45</b>
5.1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ.....	46
5.2 PARAMETRY APLIKACE PÁJECÍ PASTY .....	47
5.3 VÝSLEDKY VNITŘNÍ ČISTOTY .....	48
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>50</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>51</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>52</b>



<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>53</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>54</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>55</b>

## ÚVOD

Tato práce pojednává o řešení problému s vnitřní čistotou chladiče automobilu. Na začátku byly množící se návštěvy v servisních centrech kvůli problému s čerpadlem. Automobilky vedou podrobnou evidenci o všech opravách v autorizovaných servisních centrech, a to jak záručních, tak i pozáručních. Jakmile kumulující se vady stejného typu dosáhnou jisté hranice, je toto eskalováno managementu kvality dodavatelů. V našem případě následovalo hledání kořenové příčiny a prověřování všech komponentů chladicího systému. Jelikož zde chladič představuje objemem největší komponent, tak se pozornost soustředila právě sem – na hliníkové tepelné výměníky. Jejich hliníková část se vyrábí trvalým spojením několika komponentů s využitím technologie pájení v ochranné atmosféře.

Pájení v hromadné sériové výrobě není natolik rozšířené a známe jiné způsoby výroby, ku příkladu svařování. Proto je první část práce zaměřena na vymezení základních pojmů z teorie pájení, na různé druhy pájek, na rozdělení pájek na měkké a tvrdé a na jejich hlubší členění. Dále je přiblížen problém oxidace a využití ochranné atmosféry při pájení jako ochrany proti němu.

V praktické části je popsána funkce chladicího systému a chladiče, jak se chladič vyrábí a také jak se vyhodnocuje kvalita zapájení. Je popsána zkouška vnitřní čistoty chladiče a výsledky této zkoušky u vybraných výrobků při stávajícím výrobním procesu. Jak je již naznačeno v názvu práce, tyto hodnoty je žádoucí změnit. Proto bude provedena analýza možných příčin, s důrazem na proces nanášení pájky. Ve spolupráci s odborníky bude navrženo technické řešení a následně implementováno na jednom stroji. Bude nutné zkoušet a hledat optimální nastavení pro dosažení správné kvality zapájení a současně uspokojující výsledky vnitřní čistoty. Na závěr budou vyhodnoceny výsledky po implementaci navrženého řešení.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 OBECNĚ O PÁJENÍ

Podstatou pájení je smáčení materiálů v tuhém stavu prostřednictvím tekuté pájky. Zapájený spoj vznikne díky působení základního materiálu, pájky a tavidla. Mezi atomy základního materiálu a pájkou vznikají předpoklady pro vznik adhezních sil. Nastává rozpouštění materiálů a difuze mezi atomy základního materiálu a pájky. [1, 6]

Výhody pájení jsou:

- vysoká produktivita,
- vysoká reprodukovatelnost výrobků,
- vysoká rozměrová přesnost. [1]

### 1.1 Povrchové napětí

Uvnitř kapaliny, roztavené pájky, se přitažlivé síly částic ruší a vytváří rovnovážný stav. Naopak na povrchu kapaliny jsou povrchové molekuly pod vlivem jednostranně působících sil. Tudíž vzniká přebytek energie, který vybízí kapalinu zaujmout takový tvar, který má při daném objemu co nejmenší plochu, tedy tvar koule. Tento jev je výsledkem účinku sil působících na povrch a nazývá se povrchové napětí. Velikost povrchového napětí pájky je ovlivněna strukturou roztaveného kovu a okolního prostředí, tedy typem ochranné atmosféry, druhem tavidla nebo stupněm vakua. Velikost povrchového napětí se určuje pro stanovenou mezeru a teplotu zkouškou kapilární vztlínivosti. Povrchové napětí se stoupající teplotou klesá u všech materiálů, kromě čisté mědi, u té platí přímá úměra. S povrchovým napětím souvisí další vlastnosti pájek – smáčivost a vztlínivost v mezeře. [6]

### 1.2 Pájka

Pájka je kov určený k pevnému spojování dalších kovových materiálů. Většinou se jedná o eutektickou slitinu kovů, která taje při nízké teplotě.

Pájka může být dodávána ve formě bloků, fólií, tyčí, drátů, tvarovaných těles, prášku nebo pasty. Výběr vhodného tvaru pájky závisí na různých okolnostech, především na velikosti a tvaru spojované součásti, typ spoje, způsob pájení a v neposlední řadě také ekonomická náročnost a množství výroby.

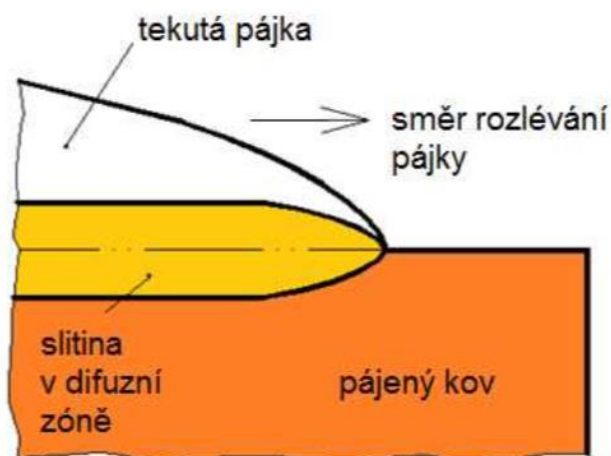
Velmi důležitým aspektem pro správné pájení je eliminace roztékání roztavené pájky po plochách mimo spoj. Tyto oblasti se mohou chránit vhodným nátěrem, ten je však málo účinný. Proto se používají spíše kapilární překážky formou rozšířeného průřezu spoje nebo zkosení hran. Avšak nejvhodnější ochranou před roztékáním pájky je použití optimálního množství pájky pro daný spoj, správné pájecí teploty a optimální doba pájení. [4, 7]

V malosériové výrobě se používá pájka ve tvaru kroužku. Prstenec se natočí na tyč příslušného průměru, podle průměru spoje.

Pájka ve tvaru folie nebo tenkých pásků, které jsou často vícevrstvé, se používá pro pájení kombinovaných materiálů s rozdílným součinitelem tepelné roztažnosti.

V sériové výrobě se používá pájka ve formě plátovaného povrchu jednoho ze spojovaných materiálů. Výhodnou metodou je také nastříkání pájky na pájené plochy základního materiálu.

Používá se také pájka ve formě pasty, natírá se na pájené plochy. Pastu tvoří jemně roze-mletá pájka a tavidlo s vhodným pojivem.



Obrázek 1 Struktura pájeného spoje [7]

### 1.3 Smáčivost pájky

Smáčivostí se označuje schopnost tekuté pájky přilnout k čistému povrchu základního materiálu při pracovní teplotě. Vyhodnocuje se velikostí stykového úhlu alfa.

Podmínka pro existenci smáčivosti:  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$

$\alpha = 0^\circ - 15^\circ$  smáčivost dokonalá, vhodná pro kapilární pájení

$\alpha = 15^\circ - 75^\circ$  smáčivost dobrá, vhodná pro nánosové pájení

$\alpha = 75^\circ - 90^\circ$  pájka je smáčivá (ještě postačuje pro nánosové pájení)

$\alpha > 90^\circ$  smáčivost špatná - pájka nevhodná pro jakýkoliv způsob pájení [1]



Obrázek 2 Poměr dotykových ploch [6]

Pozitivní vliv na snížení mezipovrchových napětí má vhodné legování pájky, základního materiálu a optimální podmínky pájení. Důležitá je také kvalita pájené plochy – leštěné povrchy jsou nevhodné, tažené nebo třískově obráběné povrchy jsou vhodné.

Podstatnou podmínkou ke smáčení je také teplota, zejména u materiálů s vysokou tepelnou vodivostí je nezbytné, aby se teplota ještě před stykem s pájkou rovnala minimálně teplotě solidu pájky. Jako teplotu smáčení označujeme takovou teplotu, při které pájka smáčí povrch, aniž by se roztekla. Tento jev se využívá především při nánosovém pájení. Při pájení s využitím kapilarity je teplota nad likvidem pájky.

Proces pájení je nevratný, tedy nelze zpět vytvořit kapku pájky. Vlivem vzájemné rozpustnosti, může být i nepatrná, a difuze se vytvoří fáze mezi základním materiálem a pájkou, přitom se změní složení použité pájky. Ke smáčení dojde pouze, když se mezi některými prvky pájky a základního materiálu vytvoří tuhý roztok nebo intermetalické slitiny. [6]

#### 1.4 Roztékavost

Roztékavost je schopnost tekuté pájky roztéci se při určité teplotě po vodorovném povrchu základního materiálu. Je vyhodnocena velikostí smáčené plochy v  $\text{mm}^2$  při konstantních

podmínkách. Takto lze například porovnávat vhodnost různých druhů pájek a základních materiálů. [1]

## 1.5 Vztlínavost pájky

Vztlínavostí, nebo také kapilaritou, se nazývá schopnost tekuté pájky vyplnit úzkou mezerou spoje působením kapilárních sil. Velikost těchto sil se určuje podle zákonů hydromechaniky pro laminární proudění. Existence kapilární síly je podmíněna účinkem zakřivení čela postupující pájky do tvaru menisku. Na velikost kapilární síly má významný vliv velikost mezery. Pro různé typy pájek je definovat vhodnou mezeru. Obecně platí, že velmi malá mezera nezaručuje zatečení pájky do spoje a příliš velká mezera je pro pájení nevhodná, protože kapilární síly přestávají působit.

Vztlínavost je dominantní fyzikální princip, který zaručuje dobré připájení. [5]

## 1.6 Rozdělení pájek

Základním kritériem pro rozdělení pájek je hodnota tavicí teploty. Hraniční teplota je stanovena na 450°C, potom tedy rozlišujeme:

- měkké pájky – tavicí teplota do 450°C,
- tvrdé pájky – tavicí teplota nad 450°C.

### 1.6.1 Měkké pájky

Měkké pájky se vyznačují především nízkou pracovní teplotou a zároveň nižší pevností pájených spojů. Proto se používají hlavně pro vytvoření takových spojů, které nejsou pevnostně či teplotně namáhány. Obecně jsou měkké pájky slitiny těžkých kovů tavicích se při nízkých teplotách, jako Sn, Pb, Cd, Sb a Bi.

Hlavním představitelem měkkých pájek jsou pájky cínové, založené na bázi slitiny cínu a olova. Pracovní teplota těchto pájek je mezi 190°C a 350°C a mohou obsahovat 4 – 90 % cínu. Cín je v těchto pájkách aktivní složkou a způsobuje dobrou smáčivost. Obsah cínu tedy podstatně ovlivňuje kvalitu zapájení.

Cínové pájky s vyšším obsahem cínu se používají především v potravinářství, resp. konzervárenství. Pájky s vyšším obsahem olova se využívají při klempířských a zámečnických pracích. [1, 4]

Kromě cínových pájek se v praxi používají také speciální pájky, které splňují zvláštní podmínky. Ty mohou být hygienické, ekonomické či protikorozní, nebo umožňují použití při zvýšené teplotě. Tyto pájky jsou téměř jednoúčelové, jejich využití má jisté omezení, například pájky s obsahem kadmia jsou náchylné k oxidaci, nebo pájky obsahující olovo nejsou vhodné pro použití v potravinářském průmyslu. [4]

Měkké pájky pro hliník jsou pájky pro pájení hliníku, hořčíku, titanu a jejich slitin. Základním požadavkem kladeným na pájky pro hliník je vznik difúzních mezivrstev pájeného spoje, dobrá korozní odolnost spoje, hlavně proti elektrolytické korozi. Pro pájení hliníku a jeho slitin jsou adhezní spoje bez difúzní oblasti nevhodné.

Měkké pájky pro pájení hliníku můžeme rozdělit takto:

- nízkoteplotní pájky s teplotou tání do 270°C,
- středně teplotní pájky s teplotou tání 270 – 400°C,
- vysokoteplotní pájky s teplotou tání 400 – 500°C. [4]

### 1.6.2 Tvrdé pájky

Tvrdé pájky mají v praxi mnohem širší uplatnění, proto je také jejich škála rozmanitější.

#### Tvrdé pájky pro pájení hliníku

Jedná se o pájky na bázi Al-Si nebo Al-Cu-Si. U spojů pájených těmito pájkami není potřeba se obávat koroze, protože se jedná o pájky podobného chemického složení, jako má základní materiál.

#### Tvrdé pájky na bázi mědi

Měděné pájky jsou vhodné pro pájení železných a neželezných kovů s teplotou tání nad 1000°C.

Pro kapilární pájení vysokotavitelných materiálů, jako ocel, nikl a jeho slitiny, se používá pájka s označením E-Cu. Má velmi dobrou roztékavost, dobře vyplňuje i velmi malé spáry, je charakteristická dobrou tvárností a odolností vůči teplotám do 350°C. Tato měděná páj-



ka se vyrábí jako dráty, pásy, pruty, folie i pasty. Využívá se především při pájení v průběžné peci s redukční atmosférou bez použití tavidla.

Pro pájení mědi a jejích slitin se používá pájka Cu-P10. Při pájení touto pájkou se nemusí používat tavidla. Při pájení s ohřevem část fosforu shoří na oxid fosforečný. Není nutné tedy tavidlo odstraňovat, což je příznivé z finančního i časového hlediska.

Mosazné pájky Cu-Zn mají řadu nevýhod. Patří mezi ně vypařování zinku již při teplotě 650°C, vysoká tavicí a pracovní teplota pájení a především křehkost pájeného spoje v případě přítomnosti pod 60 % mědi. Proto se z této skupiny pájek nejvíce využívá pájka typu Ms 60 s přídavkem malého množství dalších legovacích přísad. Mosazné pájky se používají pro všechny metody pájení, kromě pájení v redukční atmosféře a pájení ve vakuu. Nejdůležitější zásadou pro správné pájení je dodržení předepsané pájecí teploty, tedy pájka se nesmí přehřát. [1, 4]

#### Tvrdé pájky na bázi stříbra

Pájky na bázi stříbra jsou podstatně dražší, proto se méně používají, i když potřebují nižší pájecí teplotu. Vhodná teplota je 630 až 800 °C. S rostoucím obsahem stříbra (do 45 %) tavicí teplota pájky klesá, nad 45 % opět stoupá.

Stříbrnými pájkami je možné spojit téměř všechny kovy, kromě kovů lehko tavitelných. Pro pájení železných kovů mají stříbrné pájky nižší obsah nečistot než pro pájení neželezných kovů. Jedná se o prvky, které vytvářejí při pájení oceli křehké přechodové oblasti, které snižují antikorozi a deformační vlastnosti pájeného spoje. [4]

#### Tvrdé pájky na bázi niklu

Nikl je základní složkou pro žárovevné a žáruvzdorné pájky, především díky odolnosti proti korozi a oxidaci. Společným znakem niklových pájek jsou dobré pájecí vlastnosti, ale na druhou stranu nedostatečná tvářitelnost. Proto se vyrábějí ve formě prachu, který se dále zpracovává na pastu nebo folie.

#### Ostatní tvrdé pájky

Pájky na bázi palladia jsou žárovevné a využívají se v oblasti výroby plynových turbín, proudových motorů, letadel, jaderných reaktorů a podobně. Palladiové pájky jsou odolné vůči nárazu, jsou tažné, mají menší roztékavost, a proto se s nimi mohou pájet mezery až do 0,5 mm, mají vysokou odolnost vůči korozi. Nevýhodou je jejich vysoká cena.

Naopak pájky na bázi železa jsou levnější než niklové pájky, ale mají vyšší teplotu tavení.

Pájky na bázi drahých kovů, jako Au, Pt, Pd, Ag s příměsí Ni a Cu se používají ve zlatnictví, umělecké výrobě a dentální technice. [1, 4]

## 1.7 Difuze a eroze

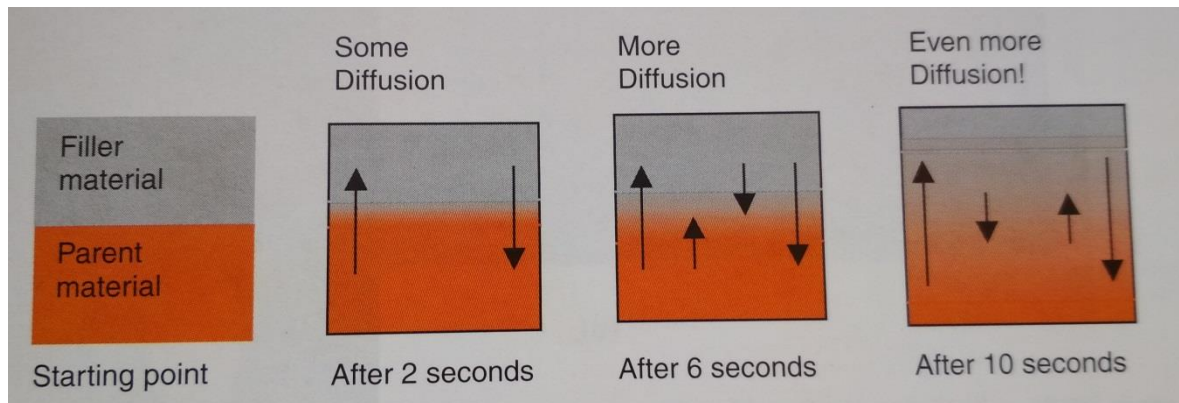
Difuze je metalurgická reakce při pájení. Při pájení je základní materiál a tekutá pájka po jistou dobu ve vzájemném styku, což umožňuje vznik metalurgických reakcí ve spoji. Podle druhu pájky a základního materiálu může ve spoji nastat některá z těchto reakcí:

- adhezní spojení,
- vzájemná difuze prvků pájky a základního materiálu,
- rozpouštění základního materiálu pájkou,
- reakce pájky s povrchovými oxidy základního materiálu.

Při adhezním spojení nedochází k vzájemné rozpustnosti pájky a základního materiálu. Využívá se především tam, kde je nežádoucí změna chemického složení spojovaných materiálů (např. při výrobě Si diod). Většinou dochází k vytvoření přechodových oblastí různých tloušťek, které mají jiné chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti než spojované materiály, a ty potom určují užité vlastnosti spoje. Podmínkou difuze při pájení je možnost přemístění atomů pájky a základního materiálu. Toto přemístování je usnadněno nehomogennou složením. Na hloubku difuze mají vliv:

- poruchy struktury základního materiálu (vakance, dislokace),
- gradient teploty,
- vzájemná aktivita jednotlivých prvků a další.

Difúzní procesy závisí také na typu a nepravidelnosti krystalové mřížky. Mohou probíhat po povrchu, po hranicích zrn nebo pomaleji v celém objemu. Difúze po hranicích zrn je nežádoucí především u austenitických ocelí, protože je příčinou tzv. pájecí praskavosti. Jedná se o období elektrochemické koroze, kdy pájka mezi zrny vytvoří elektrolyt a porušuje soudržnost základního materiálu. Omezuje se použitím takové pájky, jejíž komponenty mají sníženou rychlost difúze, předchozím vyžeháním základního materiálu, snížením pracovní teploty a zkrácením doby pájení. [6]



Obrázek 3 Progresivní změna v kompozici pájeného spoje při smáčení základního materiálu pájkou [3]

Schwarz definuje difuzi z jiného pohledu. [5] Uvádí účinné spojení základního materiálu a pájky, pokud je spoj vytvořen bez výskytu:

- nežádoucí difuze do základního materiálu,
- zředění pájky se základním materiálem,
- eroze základního materiálu,
- výskytu křehkých spojů.

První 3 efekty jsou závislé na vzájemné rozpustnosti, na množství přítomné pájky, na teplotě a době trvání pájecího cyklu.

Eroze základního materiálu vzniká, pokud jsou pájka a základní materiál navzájem rozpustné. Toto slučování může vést ke vzniku křehkých spojů, které snižují pevnost pájeného spoje. Kompozice pájek jsou nastaveny tak, aby eliminovaly vznik výše uvedených faktorů a poskytovaly požadované vlastnosti, jako je odolnost proti korozi, příznivá teplota pájení nebo úspora materiálu. Například křemík se používá ke snížení teplot liquidu a solidu hliníkových a niklových pájek. Jiné pájky obsahují prvky jako lithium, fosfor nebo bór, které redukují oxidy kovů základního materiálu a vytvářejí sloučeniny s teplotami tavení pod teplotou pájení. Tyto roztavené oxidy jsou z pájeného spoje vyloučeny a zanechávají čistý povrch pro pájení. [5]

V knize *Brazing Footprints* popisuje Peaslee erozi jako odstranění části základního materiálu. [2] Umožňuje difuzi pájky a natavení ještě před tím, než je pájka navzlínána do spoje kapilaritou. Následkem toho často dochází ke snížení tloušťky stěny nebo otvoru, kde pájka rozpustila základní materiál a odvedla ho do spoje na jiném místě. Tam, kde existuje vzájemná rozpustnost mezi pájkou a základním kovem, existuje potenciál pro erozi vždy. Například při pájení hliníkového základního kovu s hliníkovou a silikonovou pájkou lze snadno provést difuzi i erozi. Jedním z nejdůležitějších aspektů je, že mezi různými hliníkovými slitinami je patrný rozdíl.

Primární metodou pro řízení difuze a eroze je naplánování cyklu pece, který umožní, aby se pájka natavila po dosažení pájecí teploty.

Druhým hlavním kontrolním faktorem je množství pájky na okraji spoje. Během cyklu roztavení pájky bude velké množství pájky pokračovat ve spojení se základním materiálem, což způsobí difuzi a dodatečný úbytek základního materiálu. Pokud pájka rovnoměrně navzlíná do spoje, potom nedochází k erozi.

Difuze a eroze lze řídit. Proto je žádoucí zjistit důvody eroze a postupy kontroly proměnných. V některých případech může být nezbytné změnit základní materiál nebo pájku, aby byla zajištěna větší kontrola podmínek pájení. [2]

## 1.8 Tavidla

Jako tavidlo se označuje chemická látka, jejímž úkolem je působit jako čisticí prostředek při tvrdém či měkkém pájení nebo při svařování, s cílem odstranit zoxidované kovy z míst, která se spojují. Mezi běžně používaná tavidla patří chlorid amonný nebo kalafuna pro pájení cínovou pájkou, kyselina chlorovodíková nebo chlorid zinečnatý pro pájení pozinkované oceli (nebo jiných zinkových povrchů), a borax pro tvrdé pájení či svařování železných kovů. Různá tavidla, většinou založená na chloridu sodném, chloridu draselném a na fluoridu sodném, se používají ve slévárnách k odstraňování nečistot z roztavených neželezných kovů, například z hliníku, a pro přidávání požadovaných stopových prvků, např. titanu.

Při procesu pájení je primárním účelem tavidla zabránit oxidaci obou pájených materiálů. Pájka velmi dobře přilne k mědi, ale velmi špatně k jejím oxidům, které se při teplotách používaných při pájení rychle tvoří. Tavidlo je látka, která je při pokojové teplotě téměř netečná, ale při zvýšených teplotách se stává silně redukční a brání tak tvorbě oxidů kovů.

Navíc tavidlo umožňuje, aby pájka snadno tekla po pájených površích, místo aby tvořila kuličky.

Tavidla se vyrábí ve formě prášku, kapaliny, pasty, jako tavidlo může působit i ochranná atmosféra, anebo místo tavidla může být použito vakuum. [1]

Pro správnou funkci tavidla je potřeba zvážit tyto charakteristiky:

- dobré smáčení základního materiálu a pájky,
- reakční teplota tavidla musí být o 50 – 150°C nižší než je teplota solidu pájky,
- v oblasti pracovních teplot má mít minimální viskozitu,
- má mít stálé povrchové napětí,
- zamezuje přístupu vzduchu k pájenému povrchu,
- hustota tavidla má být menší než hustota pájky,
- tavidlo musí být chemicky stálé při teplotě 20°C i při pracovní teplotě,
- jednoduchá odstranitelnost zbytků tavidla po pájení
- interval tavení tavidla musí být minimální,
- tavidlo nesmí být zdraví škodlivé. [1,4]

### 1.8.1 Oxidace materiálu

Tavidla, kontrolovaná atmosféra a vakuum podporují tvorbu pájených spár. Mohou být použity k vyloučení reakčních složek a zajištění aktivní nebo inertní ochranné atmosféry, čímž se zabrání nežádoucím reakcím při pájení. Za určitých podmínek mohou tavidla a atmosféra snížit přítomné oxidy. Pozornost je třeba věnovat používání atmosfér, protože některé kovy jsou napadány různými plyny. K těmto kovům patří mimo jiné titan, zirkon, niob a tantal, které se při pájení v jakémkoliv prostředí obsahujícím vodík, kyslík nebo dusík stávají trvale degradovány. Použití jakéhokoli tavidla nebo atmosféry nevyklučuje potřebu čištění součástí před pájením.

Materiály, které jsou vystaveny působení vzduchu, mají tendenci reagovat s různými složkami atmosféry, do které jsou vystaveny. Rychlost těchto chemických reakcí se zpravidla zrychluje, se zvyšující se teplotou. Nejčastější reakcí je oxidace, ale někdy se tvoří i nitridy a karbidy. Rychlost tvorby oxidu se mění s každým složením kovu a povahou oxidu. Musí být zvážena houževnatost, struktura, tloušťka a odolnost vůči odstranění a další oxidaci.

Tvorba oxidu na některých kovových materiálech ve vzduchu je okamžitá, dokonce i při pokojové teplotě nebo pod ní. Tyto reakce vedou ke vzniku oxidů nebo jiných sloučenin, které brání výrobě konzistentně tvrdých pájených spojů. [3]

### 1.8.2 Tavidla v hromadné výrobě

Primárním účelem tavných pájek je podporovat smáčení základního kovu. Účinnost pájky, která se běžně označuje jako smáčení, může být vyjádřena jako funkce pájitelnosti. Tavidlo musí být schopné rozpouštět jakýkoliv oxid zbývající na základním kovu po čištění a jakékoliv oxidové filmy na kapalně pájce. Je důležité si uvědomit, že většina tavidel není určena k primárnímu odstraňování mastnoty, oleje nebo nečistot a nemůže nahradit správné předčištění. V některých případech však mohou tavidla sloužit k potlačení vytěšňování složek vysokého tlaku par v kovové pájce. [5]

Pro účinnou ochranu povrchů, které mají být pájeny, musí být tavidlo naneseno jako rovnoměrný povlak a chráněno, dokud nedojde k dosažení teploty pájení. Musí zůstat aktivní po celou dobu pájení. Vzhledem k tomu, že roztavený materiál má tendenci vytlačovat tavidlo ze spoje při teplotě pájení, je důležitá viskozita a povrchové napětí tavidla a mezifázová energie mezi tavidlem a povrchy dílů. Doporučené tavidla by proto měly být používána v jejich správném teplotním rozmezí a na materiálu, pro který jsou navržena. [1, 5]

Další funkcí tavidla je ochrana před korozí. Vznik koroze se soustřeďuje na zoxidovaný materiál, povrchová vrstva nebo atomy kovu mohou být také ovlivněny. Tento vliv je rychlý kvůli zvýšeným provozním teplotám, a protože kapacita oxidu pájky je značná. Interakce toku taveniny s oxidovou vrstvou je zásadní pro získání dobrého, čistého a rychlého spoje.

Některé kovy pro pájení obsahují přidané deoxidátory ze slitin, jako je například fosfor, lithium a další prvky, které mají silnou příbuznost s kyslíkem. Například kovové plnivo obsahující fosfor působí jako tavidlo na měď a stříbro. V některých případech tyto přísady způsobují, že se tato plniva sama taví bez použití připravených tavidel nebo řízených atmosfér, pouze v roztaveném stavu a samotné oxidují během vytápěcího cyklu. V jiných případech se používají ve spojení s ochrannými atmosférami nebo tavidly pro zvýšení tendencí smáčení. Pokud se mají spárovat velké části nebo je předpokládána prodloužená doba ohřevu, doporučuje se použití dodatečného tavidla. [5]

Mnoho chemických sloučenin se používá při přípravě tavidel a mnoho tavidel na trhu je vyráběno tak, aby nabízelo specifické vlastnosti. Když se tavidla zahřívají, mezi různými chemickými přísadami dochází k reakcím, které vytvářejí nové sloučeniny při teplotách tvrdého pájení. Tyto sloučeniny jsou od nezreagovaných složek zcela odlišné chemicky a fyzikálně. Pokud je například fluoroboritan složkou tavidla, mohou se vytvářet fluoridy, které reagují s přísadami. Rychlost reakce tavidla s kyslíkem, základními kovy, pájkou a jakýmkoli jinými cizími materiály se zvyšuje s teplotou. Složení tavidla musí být pečlivě přizpůsobeno všem faktům cyklu pájení, včetně doby prodlevy. Vliv tavidla na kovy musí být omezen, protože tavidlo musí rychle reagovat s oxidy kovů, aby se umožnilo uspokojivé vytvoření spoje. Aktivní halogenidy, jako jsou chloridy a fluoridy, jsou například nezbytné v tavivech pro slitiny obsahující hliník nebo jiné vysoce elektropozitivní kovy.

Nejběžnějšími složkami chemických tavidel jsou:

- boráty (sodík, draslík, lithium atd.),
- fúzovaný borax,
- elementární bór,
- fluoboritany (draslík, sodík),
- fluoridy (sodík, draslík, lithium),
- chloridy (sodík, draslík, lithium),
- kyseliny (boritá, kalcinovaná boritá),
- alkálie (hydroxid draselný, hydroxid sodný),
- smáčedla,
- voda (buď jako hydratační nebo jako přísada pro pastovité toky). [5]

Většina tavných pájek je vlastními směsmi několika výše uvedených složek. Složky se smíchají a reagují způsobem, který zajišťuje bezpečný výsledek pro specifické účely. Jejich funkce jsou následující:

Boráty jsou výhodné při vytváření tavidel, které se taví při vyšších teplotách. Mají dobrou schopnost rozpouštět oxidy a poskytují ochranu proti oxidaci po dlouhou dobu. Většina borátů je tavitelná při teplotách okolo 760 ° C nebo vyšších. V roztaveném stavu mají relativně vysokou viskozitu, a proto je třeba je míchat s jinými solemi, aby se zvýšila tekutost.

Fúzovaný borax je další tavící materiál, který je aktivní při vysokých teplotách. V malé míře se používá i v procesech pájení s nižší teplotou.

Elementární práškový bór je přidáván pro zvýšení celkového tavícího účinku. Stříbrné pájky, které obsahují elementární bór, nabízejí lepší ochranu na karbidových materiálech a na materiálech, které tvoří oxidy žáruvzdorné, jako je chrom, nikl a kobalt.

Fluoboráty reagují podobně jako jiné boráty. I když neposkytují ochranu před oxidací ve stejném rozsahu jako jiné boráty, mají lepší tok v roztaveném stavu a mají větší schopnosti rozpouštět oxidy. Fluoboráty se používají s jinými boráty nebo s alkalickými sloučeninami, jako jsou uhličitany.

Další třídou sloučenin jsou fluosilikoboráty, které mají vyšší teploty tání než fluoboráty a poskytují dobrou adhezivitu povrchu. Jejich vysoké teploty tání omezují jejich použití.

Fluoridy rychle reagují s většinou oxidů kovů při zvýšených teplotách, a proto se používají v tavidlech jako čisticí prostředky. Jsou zvláště užitečné při výskytu žáruvzdorných oxidů, jako jsou chrom a hliník. Fluoridy se často přidávají, aby se zvýšila tekutost roztavených boritanů, čímž se zlepšuje kapilární tok roztaveného pájeného tavidla. Fluoridy však mohou vytvářet nebezpečné výpary, a proto jejich použití vyžaduje přísné bezpečnostní opatření. Fluoridy, až do 40% obsahu pájky, dávají stříbrným pájkám schopnost tání při nízké teplotě - 560 ° C a vysokou aktivitu pro rozpouštění oxidů kovů.

Chloridy fungují podobně jako fluoridy, ale mají nižší účinný teplotní rozsah. Chloridy je třeba používat s opatrností, protože při nižších teplotách způsobují snížení bodů tání tavidel na bázi fluoru.

Tavidla pro pájení hliníku a hořčíku obsahují alkalické chloridy fluoridů. Síly lithia dávají těmto pájkám nízké teploty tání, 540 až 615 ° C a vysokou chemickou aktivitu, což umožňuje tokům rozpouštět odolný oxid hlinitý.

Kyselina boritá je hlavní složka používaná v tavidlech pro tvrdé pájení, protože usnadňuje odstranění zbytků tavidla po pájení. Teplota tání je nižší než teplota tání borátů, ale je vyšší než teplota tání fluoridů. Tavidla stříbra pro tvrdé pájení obsahují kyselinu boritou a boritan draselný ve spojení s komplexním fluoroboritanem draselným a fluoridovými sloučeninami. Vysokoteplotní pájky, založené na kyselině borité a alkalických borátech, někdy obsahují malé přísady elementárního boru nebo oxidu křemičitého pro zvýšení aktivity



a ochrany, a to s teplotou tání až 1204 ° C. Obsah fluoridu v těchto tavidlech je obvykle nízký, nejvýše 2-3%. Tyto pájí železné a vysokoteplotní slitiny a karbidy.

Alkálie, jako jsou hydroxidy draslíku a sodíku, se používají mírně, pokud vůbec, aby zvýšily užitečnou pracovní teplotu tavidla. Jejich nevýhodou je to, že jsou navlhavé, dokonce i malé množství v jiných tavidlech může způsobit problémy ve vlhkém počasí a může výrazně omezit dobu skladování tavidla.

Zvlhčovací činidla se používají v pastovitých a kapalných pájkách pro usnadnění toku a rozptýlení toku na obrobek před pájením.

V tavných spojích je přítomna voda buď jako hydratační voda v chemikáliích používaných při výrobě pájky nebo jako samostatná přísada pro výrobu pasty nebo kapaliny. Voda použitá při výrobě pasty musí být k tomuto účelu vhodná, je nutné se vyhýbat tvrdým vodám. [3, 5]

### 1.8.3 Skupiny tavidel v hromadné výrobě

Neexistuje jediné tavidlo, které by bylo univerzálně použitelné pro všechny pájecí aplikace. Tavidla jsou klasifikována podle jejich pájecích schopností u některých skupin základních kovů v poměrně specifických teplotních rozsazích. Pět kategorií tavných pájek je:

hliník,

hliník-bronz,

stříbro,

hořčík a

vysokoteplotní tavidla.

V rámci každého typu a třídy je k dispozici řada komerčních a jedinečných tavidel a výběr vhodného tavidla musí být proveden pečlivou analýzou vlastností požadovaných pro konkrétní aplikaci. Pro vhodné použití musí být tavidlo chemicky kompatibilní se všemi základními kovy a kovy, které se podílejí na pájení. Musí být aktivní v celém rozsahu teploty pájení a po celou dobu při teplotě pájení. Pokud je cyklus tvrdého pájení dlouhý, mělo by být vybráno méně aktivní, ale více ochranné tavidlo. Naopak, pokud je cyklus krátký, může být použito aktivnější tavidlo, které podpoří rychlý průtok pájky při minimální teplotě.

Pokud je pro pájecí aplikaci vhodných více tavidel, měly by být vyhodnoceny i další aspekty, jako je bezpečnost a náklady při pájecím procesu. [5]

#### 1.8.4 Kritéria výběru tavidla

Typ základního materiálu ovlivňuje výběr tavidla více než kterýkoli jiný faktor. Pro pájení slitin hliníku se používají hliníkové pájky. Podobně hliníko-bronzové a hořčíkové tavidla se využívají při pájení těchto základních kovů. K pájení slitin železa a niklových slitin lze použít dva typy tavidel: tavidla stříbra nebo vysokoteplotní tavidla. Který z nich je lepší, závisí na typu základního materiálu, podmínkách pájení a na nákladech. Výrobci upřednostňují stříbrné pájky, které jsou dražší než tavidla při vysokých teplotách, aby se minimalizovalo množství tepla. Ty se používají také k pájení slitin mědi. [5]

Pro výběr konkrétního tavidla, s ohledem na techniku pájení, existuje několik kritérií:

- Při aplikaci pájky ponořením musí být voda odstraněna, obvykle předehtím.
- Pro odporové pájení musí tavidlo umožňovat průchod proudu. To obvykle vyžaduje mokré, zředěné tavidlo.
- Účinný rozsah teplot pájky musí zahrnovat teplotu pájení pro konkrétní použitý základní materiál.
- Kontrolovaná atmosféra může ovlivnit požadavky na pájku.
- Mělo by být zvaženo snadné odstranění zbytků pájky.
- Náchylnost ke korozi základního materiálu by měla být minimalizována. [5]

#### 1.8.5 Specifikace rozsahu teplotního toku

Aby bylo pájení účinné, pájka musí být roztavená a aktivní předtím, než se základní materiál nataví, a musí zůstat aktivní, dokud spoj není zaplněn a při ochlazení tuhne.

Proto teplota solidu základního materiálu určuje minimální pracovní teplotu pájky a teplota likvidu základního materiálu určuje maximální teplotu pájení, které musí pájka odolat. Obecně je vhodné zvolit pájku, která je aktivní přibližně o 30 ° C pod solidem základního materiálu a která zůstane aktivní alespoň o 90 ° C nad likvidem materiálu. Pokud se během pájecího procesu vyskytne přehřátí, je nutné zvolit tavidlo aktivní při teplotě 120-175 ° C

nad likvidem materiálu. Pájka tak má široký teplotní rozsah pro odstranění oxidů na povrchu před zapájením a zůstává efektivní při teplotách pájení. Délka doby pájení ovlivňuje výsledek. Roztavená pájka vytváří ochranný povlak, který zabraňuje oxidaci na omezenou dobu – kyslík nakonec částečně difunduje do základního materiálu. Pájka musí dále odstraňovat nově vznikající oxid až do konce ohřívacího cyklu. Pájka může rozpouštět jen omezené množství oxidu, delší ohřívací cyklus zvyšuje možnost, že pájka bude nasycena oxidem. Tento stav se nazývá vyčerpání pájky.

Teplotní rozsah pájky, který závisí na teplotě pájení, druhu a objemu pájky a druhu základního materiálu, předpokládá cyklus pájení na dobu 15-20 sekund. Při delším ohřívacím cyklu může dojít k vyčerpání pájky i při pájení pod maximální provozní teplotou, protože časem se pájka nasytí oxidem kovu. Aby se zabránilo vyčerpání pájky při prodloužených ohřívacích cyklech, je nutné použít pájku s vyšším pracovním teplotním rozsahem. Když je ohřívací cyklus krátký, lze pájet nad maximální pracovní teplotou pájky. Použití nízkoteplotní pájky nad maximální pracovní teplotou usnadňuje odstranění zbytků pájky, protože tyto pájky jsou lépe rozpustné ve vodě než vysokoteplotní pájky. [5]

## 2 PÁJENÍ V PEČI, KONTROLOVANÁ ATMOSFÉRA

Pro spojování pomocí pájení lze použít celou řadu metod pájení. Výběr konkrétní metody závisí ve značné míře od toho, zda se jedná o měkké nebo tvrdé pájení a na dalších okolnostech. Mezi běžné metody pájení patří:

- pájení pájkou pro měkké pájení,
- pájení plamenem,
- pájení ponorem,
- pájení v peci,
- pájení ve vakuu,
- pájení elektrickým obloukem,
- pájení paprsky elektronů a laserem a další. [1]

### 2.1 Kontrolovaná atmosféra pro pájení

Další metodou pro kontrolu tvorby oxidů během pájení a také redukci vzniku oxidů po očištění je vyplnění pájecí oblasti vhodnou kontrolovanou atmosférou. Stejně jako tavidla není ani kontrolovaná atmosféra primárně určena pro čištění zbytků oxidů, maziva, olejů, nečistoty a jiných cizích částic. Všechny díly určené k pájení musí být podrobeny vhodnému čistícímu procesu. Pokud je použité tavidlo, může být kontrolovaná atmosféra žádoucí pro prodloužení životnosti tavidla a minimalizaci čištění po pájení. Obecně při pájení v kontrolované atmosféře není následné čištění po pájení vůbec nutné. [3, 5]

Kontrolovaná atmosféra je ve velké míře využívána pro pájení ve vysokých teplotách. Vzhledem k tomu, že kontrolovaná atmosféra plní stejnou funkci jako použití tavidla, má v porovnání s tavidlem řadu výhod:

1. Pájené komponenty jsou při pájení v ochranné atmosféře udržovány čisté, v prostředí bez oxidů. Po pájení lze výrobky většinou ihned použít pro další operace bez čištění.
2. Pájení v kontrolované atmosféře je použitelné pro komplexní montáže, jako jsou tepelné výměníky nebo tahové komory. Kompletní odstranění tavidla po pájení je pro takto složité výrobky velmi náročné, nebo dokonce nemožné.

3. Problémy se zachycením tavidla v pájeném spoji mohou být zcela vyloučeny při pájení v kontrolované atmosféře.

Ačkoli je dostupných několik druhů kontrolovaných atmosfér pro pájení, lze je rozdělit do třech obecných kategorií:

- redukční atmosféra,
- inertní atmosféra,
- vakuum.

Reakce vyplývající z použití redukčních, inertních a vakuových atmosfér jsou různé. Některé podmínky se však vztahují na všechny tři. Můžeme je tak definovat obecné techniky pájení v kontrolované atmosféře atmosféry:

- plynná atmosféra,
- plynná atmosféra společně s kapalným nebo tuhým tavidlem aplikovaným na styčnou plochu,
- vysoké vakuum,
- kombinace vakua a plynné atmosféry.

### 2.1.1 Aplikace kontrolované atmosféry

Jeden typ řízené atmosféry je produktem spalování plamene v hořáku. Běžně se používá neutrální nebo redukční plamen. Samostatně dodávaná řízená atmosféra může být také použita s indukčním nebo odporovým pájením. Avšak řízená atmosféra se nejčastěji používá při pájení v pecích nebo při retortovém pájení.

Pájení v peci vyžaduje použití vhodné atmosféry k ochraně hliníkových součástí před oxidací. V případě oceli proti oduhličení při pájení a během chlazení, které se provádí v komorách uzpůsobených pro pájení, a to zejména tam, kde je k dispozici titan, zirkonium a žáruvzdorné kovy.

Princip spočívá v použití kontrolované plynové atmosféry zahrnující přípravu speciálního ochranného plynu a jeho zavedení do pece při tlacích nad atmosférickým tlakem. Vzhledem k tomu, že plyn je plynule přiváděn do pece a cirkuluje skrze ni, pec se zbaví vzduchu. Ochranná plynová atmosféra se udržuje pod mírným tlakem, což zabraňuje pronikání

vzduchu do pece. Při některých operacích jsou výrobky umístěny do studené pece, nebo retortu, a neotevřou se, dokud není dokončen proces pájení. Pokud musí být výrobky do pece dodávány nepřetržitě nebo periodicky, jsou v peci umístěny závěsy nebo přechodné komory, aby se zabránilo kontaminaci atmosféry pece.

Schopnost regulovat složení a tím i účinnost atmosféry pece závisí nejen na stavu a správném fungování zařízení vyrábějících atmosféru, ale také na správném nastavení a provozu pece, která se používá.

Když se používají určité typy řízených atmosfér, jako jsou ty, které obsahují vodík, je třeba věnovat mimořádnou pozornost tomu, aby se zabránilo tvorbě výbušných směsí plynu. Směsi vodíku se vzduchem v rozmezí od 4 do 75 % vodíku jsou výbušné. Jako bezpečnostní opatření při použití prostředí s výbušným plynem by měla být pec nebo retort důkladně vyčištěna, aby bylo zajištěno odstranění veškerého vzduchu před aplikací tepla. Odpadní plyny z pece mohou být buď nepřetržitě spalovány, nebo odváděny do venkovního prostoru mimo budovu.

Některá atmosféry, jako jsou atmosféry obsahující oxid uhelnatý, jsou toxické. Správné spalování nebo likvidace odpadních plynů z těchto atmosfér je obzvláště důležitá z hlediska bezpečnosti. Při pájení toxických kovů, jako je beryllium, by měly být odpadní plyny pečlivě filtrovány nebo vedeny potrubím do vnějšího prostoru.

Mnoho ochranných atmosfér je vytvářeno směsí uhlovodíkového palivového plynu a vzduchu do retortu. Většina těchto atmosfér je bohatá exotermická směs, ve které je teplo uvolněné z reakce postačující. Bohatá exotermická atmosféra je nejméně nákladná generovaná atmosféra, adekvátně flexibilní pro mnoho aplikací, má relativně malý potenciál srážení a vyžaduje minimální údržbu generátoru. Přibližně 70 až 80% všech pájených atmosfér je exotermní a obecně se používá k pájení měkké oceli nebo nízkouhlíkové oceli.

Při pokusech o pájení komponentů z uhlíkové oceli v exotermní atmosféře bylo zjištěno, že žádná atmosféra ani vakuum neumožňují vznik dobrého zapájeného spoje, a to kvůli přítomnosti kadmia a zinku. Kadmium obsažené v základním materiálu se normálně vypaří v atmosféře a vysráží se jako jemný prach v peci, který je později rozvířen, nebo bude odveden výfukovým systémem. Ve vakuové peci se však kadmium a zinek odpaří ze základního materiálu a uloží se v tepelné ochraně a na chladnějších elektrických izolátorech. To může způsobit značné problémy. Navíc k tomu dojde i při použití parciálního tlaku ve vakuové peci. Kadmium by tedy nemělo být používán ve vakuové pájecí atmosféře.

Stříbrné a měděné pájky, které obsahují zinek (nikoli však kadmium), se také vypaří v atmosféře. Někdy se používá pájka ke snížení odpařování, a pokud to funguje, tak ne zcela uspokojivě.

Doporučuje se, aby v případě potřeby byly v atmosférických pecích použity stříbrné pájky obsahující jiné prvky než kadmium a zinek. Ve vakuové peci je nutné použít parciální tlak, částečně vyšší teploty, aby se zabránilo odpařování stříbra a mědi.

Exotermické nebo endotermické plyny se vyrábějí hlavně řízeným spalováním přírodních nebo syntetických plynů se vzduchem za vzniku směsi sestávající v podstatě z dusíku, vodíku, methanu nebo ethanu, oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého a vodní páry.

Vzhledem k tomu, že se poměr palivového plynu k vzduchu zvyšuje, směs se stává endotermickou – vyžaduje přidání tepla a katalyzátoru pro spalování. Endotermické směsi plynů se používají v pájených médiích a ocelích s vysokým obsahem uhlíku a někdy v měkkých ocelích. [5]

Teorie pájení je obsáhlé téma a v praxi je nutné vybrat ty správné možnosti pro konkrétní aplikaci. A i když se po provedení mnoha zkoušek najde odpovídající kombinace pájky a nastavení pájení, není vyloučeno, že se vyskytnou okolnosti, které vyvolají potřebu procesu výroby změnit.

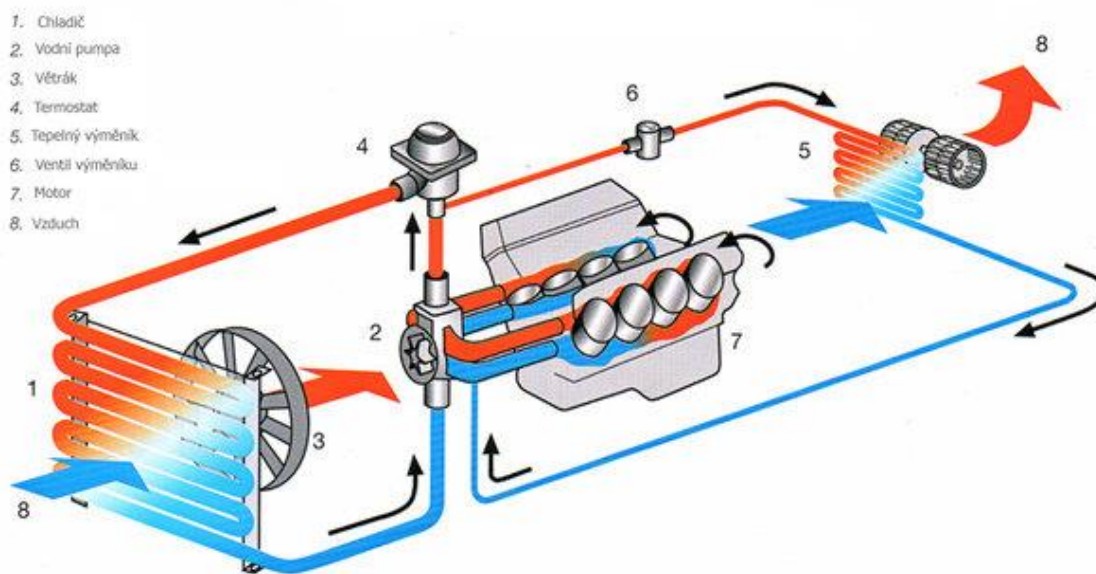
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



### 3 CHLADICÍ SYSTÉM AUTOMOBILU

V každém automobilu můžeme nalézt produkty vyrobené pájením. Mimo jiné jsou to součásti chladicího okruhu – chladič, ať už kapalinový nebo vzduchový, a kondenzátor.

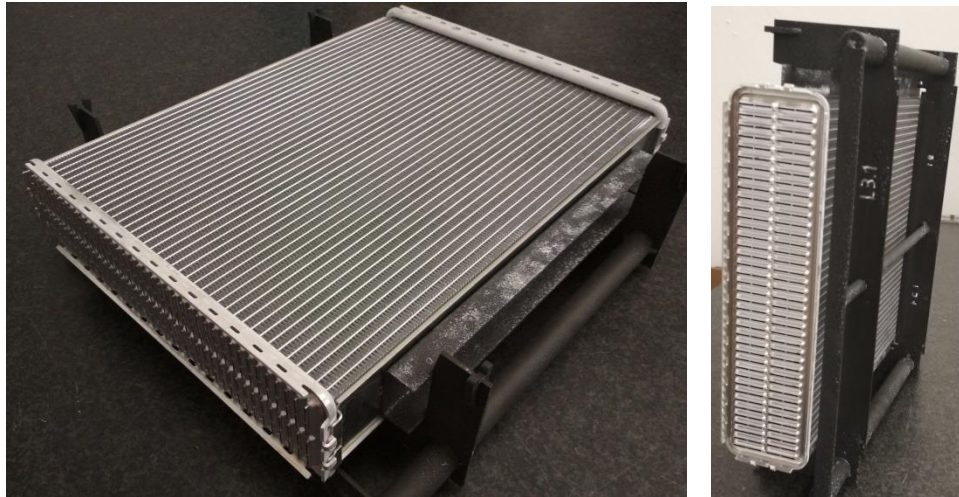
Hlavní úlohou chlazení je odvod přebytečného tepla, které vzniká při chodu motoru. Chlazení také zajišťuje správnou provozní teplotu motoru, a tak ovlivňuje i spotřebu paliva. A neméně důležitou funkcí chlazení je i na první pohled opačný proces – topení v autě.



Obrázek 4 Schéma chladicího systému automobilu [8]

#### 3.1 Chladič automobilu

Podstatnou součástí chladicího systému je samotný tepelný výměník – chladič. Sestává z hliníkového těla (core – jádro), těsnění z EPDM a plastových komor z PA 6.6 s 30 % skelných vláken. A právě hliníkové jádro je vyrobeno procesem pájení.



Obrázek 5 Nezapájené hliníkové jádro v rámu

Hliníkové jádro se skládá z těchto součástí:

trubky,

lamely,

bočnice,

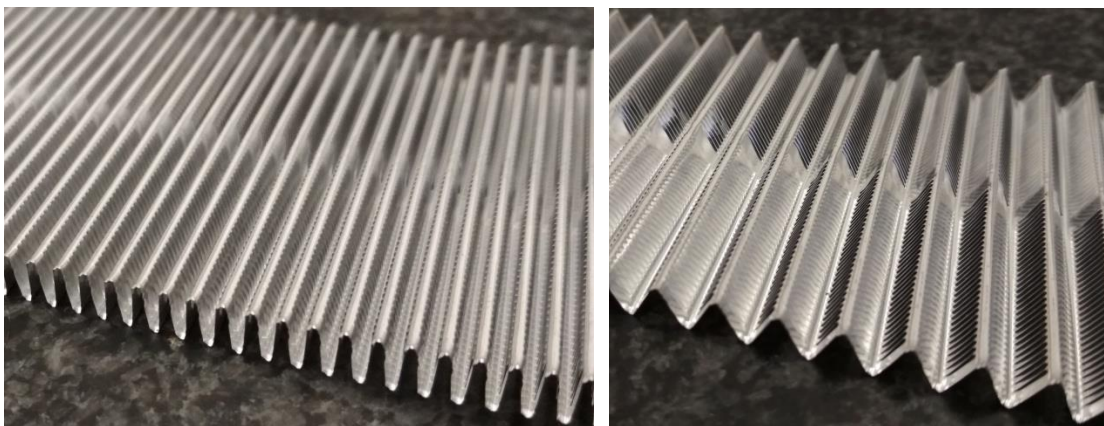
víka.

Trubkami proudí chladicí kapalina od motoru, zde je ochlazena a vrací se zpět. Trubky je možno vyrobit pomocí 2 technologií – svařováním a rolováním. Svařovaná trubka je hotová, svár trubku uzavře. Kdežto rolovaná trubka zůstává po vyrobení otevřená a je uzavřena až při pájení sestaveného jádra. Výroba probíhá tak, že hliníkový pásek je veden ze svitku do stroje, kde je uloženo několik sad tvářecích kol. Ty jsou konstruovány tak, že pásek je cíleně ohýbán, až vznikne B-trubka – podle tvaru průřezu.



Obrázek 6 Detail profilu B-trubky

Lamely vytváří teplosměnnou plochu chladiče. Lamely jsou připájeny k trubkám, jsou ohřívány chladicí kapalinou proudící v trubkách od motoru a zároveň ochlazovány proudem vzduchu proudícího skrz chladič. Vyrábí se z hliníkového pásu velmi malé tloušťky. Pásek prochází strojem s tvářecími koly, kde vzniknou průstříhy v požadovaném úhlu. Takto prostříhaný pásek je skládán do požadované hustoty.



Obrázek 7 Lamely: vlevo finální podoba, vpravo v roztaženém stavu

Bočnice slouží k ochraně krajních vlnovců a montáži dalších prvků. Vyrábí se stříháním v postupovém nástroji. Jedna strana hliníkového pásu má nanesenou pájecí vrstvu.



Obrázek 8 Bočnice

Víka zajišťují propojení vnitřního okruhu chladiče – do víka jsou vetknuty trubky a spoje jsou zapájeny.



Obrázek 9 Víko

Po zapájení hliníkového jádra se do víka vloží těsnění a na něj plastová komora, ve speciálním stroji se tyto komponenty pod tlakem zajistí, víko se určitým způsobem deformuje a zaručí tak pevný spoj.



Obrázek 10 Zapájené hliníkové jádro bez rámu



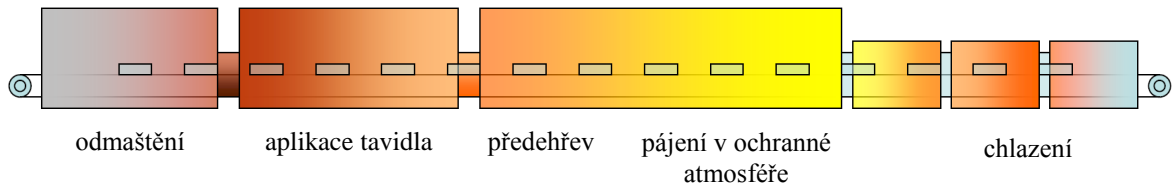
Obrázek 11 Těsnění volně vložené do víka



Obrázek 12 Víko pevně spojeno s komorou

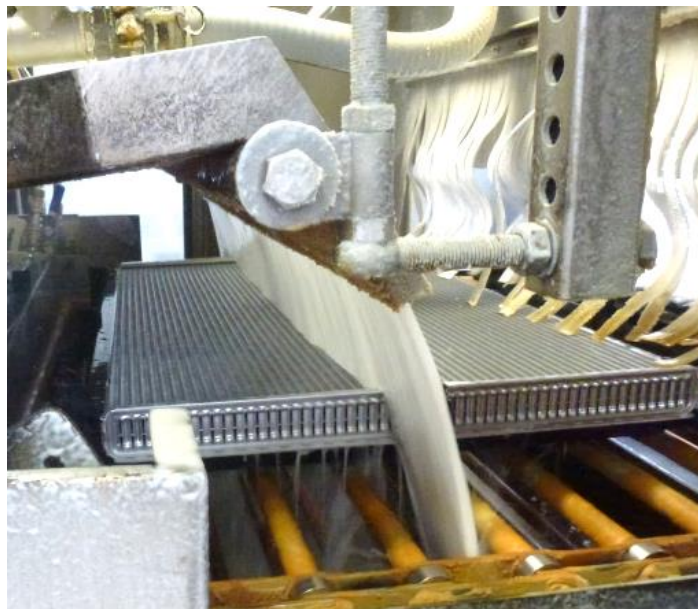
### 3.2 Proces pájení hliníkového jádra

Výše uvedené komponenty se poskládají a zajistí proti pohybu vložením do ocelového rámu. V tomto stavu se jádro i s rámem uloží na pás a prochází jednotlivými fázemi pájecí pece:



Obrázek 13 Schéma pájecí pece

Zde je nutné blíže rozvést aplikaci tavidla. Hliníkové jádro prochází pod kontinuálním vodopádem – tím se tavidlo dostane do spoje trubka – víko, bočnice – lamela a lamela – trubka. Vzápětí je tavidlo aplikováno bočním vstřikem přímo do B-trubek pro zajištění vnitřního zapájení trubky.



Obrázek 14 Aplikace tavidla v pájecí peci vodopádem



Obrázek 15 Trysky pro boční aplikaci tavidla



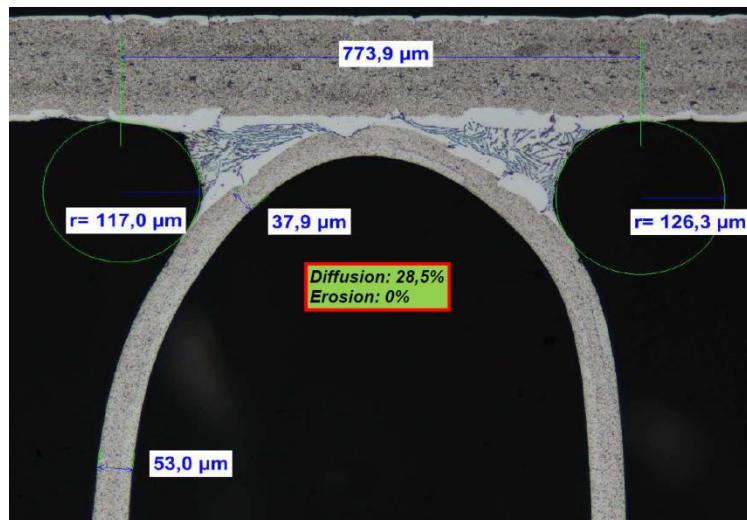
Obrázek 16 Trysky pro boční aplikaci tavidla – v provozu

### 3.2.1 Analýza zapájení

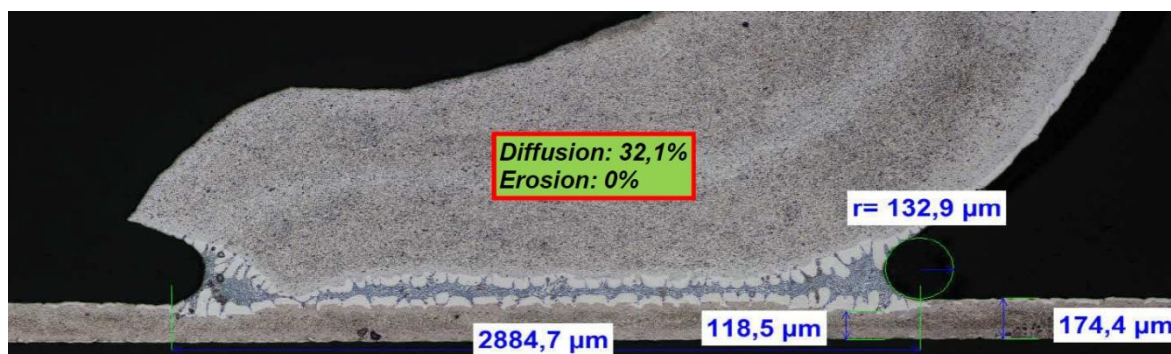
Na konci fáze chlazení je chladič odebírán obslužným personálem a je vytažen z rámu, který držel před pájením komponenty pohromadě. To je možné, protože hliníkové jádro se během pájení nepatrně zmenší.

Pro vyhodnocení kvality zapájení se provádí analýza zapájení. Provádí se destruktivními zkouškami v materiálové laboratoři – vybrané místa hliníkového jádra jsou vyřezány, zali-

ty do pryskyřice, poté vybroušeny, výbrusy naleptány a snímány digitálním mikroskopem. Na snímcích je analyzována difuze a eroze pájených spojů a další parametry podstatné pro dlouhou životnost chladiče.



Obrázek 17 Analýza zapájení lamely a trubky



Obrázek 18 Analýza zapájení víka a trubky

Místa řezů nejsou vybrány náhodně. Jedná se o nejteplejší a nejchladnější místo při pájení. Tyto místa se zjišťují pomocí přístroje Datapaq. Je to soustava propojených teplotních snímačů, může jich být zapojeno až 10. Ty se připevní na požadovaná místa hliníkového jádra a pošlou se společně do pece. Snímače nepřetržitě zaznamenávají teplotu během celého pájecího procesu. Poté lze z každého snímače zvlášť vyhodnotit teplotní křivku a stanovit potenciální problémová místa výrobku.

Analýza zapájení se provádí při změně pájecího profilu – změně nastavení některých parametrů pájení, anebo po odstávce pece.

## 4 VNITŘNÍ ČISTOTA CHLADIČE

Po pájení zůstane uvnitř trubek jisté množství tavidla a to způsobuje vnitřní nečistotu. Čistota vnitřního prostoru trubek chladiče je velmi důležitá pro provoz celého chladicího systému. Veškeré zbytky tavidla a jiné nečistoty jsou po naplnění chladicího okruhu smíchány s chladicí směsí – glykolem.

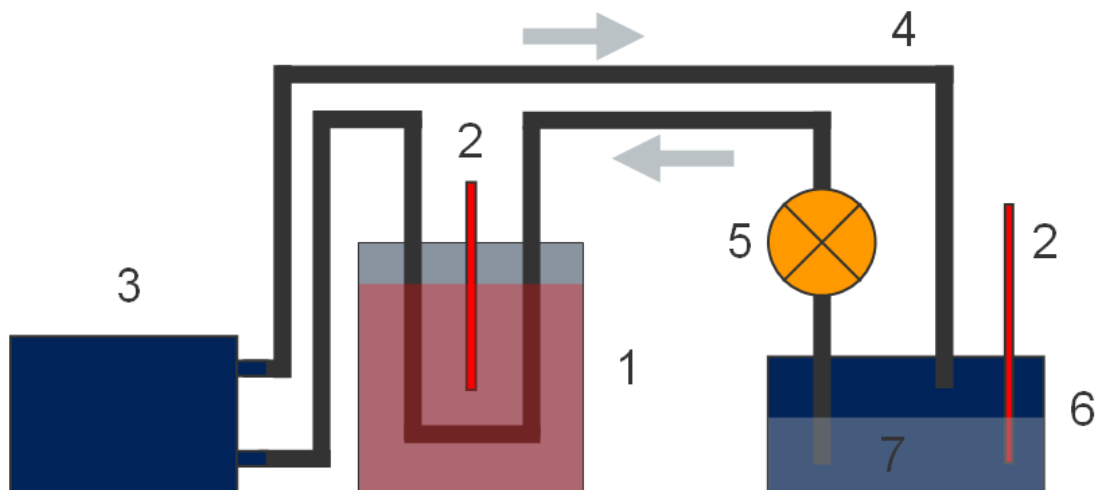
Servisní střediska několika automobilek sdružovaly informace o výměně vodní pumpy po 2-3 letech standardního provozu. Na základě provedených analýz byl vysloven závěr, že kořenovou příčinou poruchy vodní pumpy v chladicím okruhu mohou být zbytky tavidla. Ethylenglykol reaguje s fluoridem sodným – hlavní složkou zbytků tavidla po pájení. Při této reakci postupně dochází k pomalému zvyšování viskozity až do stavu, kdy pumpa přestane pracovat z důvodu gelové konzistence chladicí směsi. Z tohoto důvodu se vyskytl na výrobce komponentů chladicího okruhu požadavek pravidelně testovat vnitřní čistotu výrobků.

### 4.1 Zkouška vnitřní čistoty

Zkouška vnitřní čistoty chladiče probíhá ve více krocích. Prvním krokem je napojení chladiče do okruhu se 7,5 l deionizované vody (standardní objem hlavního chladiče je 3 – 5 litrů).

V tomto uzavřeném okruhu je vnitřní prostor 24 hodin nepřetržitě proplachován. Teplota kapaliny je fixně stanovena na 80 °C, výkon pumpy je stanoven na 8 l/minutu. Po 24 hodinách je výplach zastaven. Veškerá kapalina z chladiče i připojovacího systému je shromážděna do uzavíratelné nádoby a nechá se volně ochlazovat až na pokojovou teplotu.





Obrázek 19 Schéma zapojení při zkoušce čistoty (zdroj PV 3678)

- |                                   |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1. temperanční pásek (termostat), | 5. čerpadlo,                |
| 2. teploměr,                      | 6. zásobník,                |
| 3. tepelný výměník (chladič),     | 7. plnicí médium (kapalina) |
| 4. vedení (hadice),               |                             |

Dalším krokem zkoušky je práce s výluhem. 50 ml se odebere do uzavíratelné nádoby a tento vzorek je předán na stanovení obsahu fluoridu sodného pomocí iontové chromatografie. Z výluhu se určuje také hmotnost pevných částic. 250 ml se odebere do vysoké skleněné odměrky a ta je vložena do tepelné komory přehřáté na 100°C. Zde zůstane až do úplného odpaření vody. Po ochlazení na pokojovou teplotu je zjištěna hmotnost odměrky na kalibrované váze a je zjištěn rozdíl v hmotnosti s dříve zaznamenanou hmotností prázdné odměrky. Výsledná hmotnost pevných částic na celkový objem chladiče je vypočtena podle vzorce:

$$m_v = m \cdot 30 \quad [\text{g}]; \quad (1)$$

kde:

$m_v$  je výsledná hmotnost pevných nečistot [g]

$m$  je hmotnost nečistot zjištěna z 250 ml výluhu [g]

Získané hodnoty je nutné porovnat s cílovými hodnotami. Ty se musí vypočíst pomocí délky pájeného spoje, který se vypočítá podle vzorce:

$$I_{LNL} = n_R * (l_R + 2 * (2 * (b_R - h_R) + \pi * h_R)) \quad [m]; \quad (2)$$

kde:

$I_{LNL}$  je délka pájeného spoje [m]

$n_R$  je počet trubek [-]

$l_R$  je délka trubek [m]

$b_R$  je šířka trubek [m]

$h_R$  je výška trubek [m]

Pro zjištění cílové hodnoty pro hmotnost pevných částic se použije vzorec:

$$m_C = I_{LNL} * 0,06 \quad [g]; \quad (3)$$

kde:

$m_C$  je celková hmotnost nečistot na chladič [g]

$I_{LNL}$  je délka pájeného spoje [m]

$$f_C = I_{LNL} * 0,8 \quad [mg/l]; \quad (4)$$

kde:

$f_C$  je celkový obsah fluoridu sodného na litr [mg/l]

$I_{LNL}$  je délka pájeného spoje [m]

#### 4.1.1 Výsledky vnitřní čistoty pro vybrané chladiče

Pro prezentaci situace při současném nastavení procesu jsou vybrány 4 chladiče reprezentující výrobní portfolio. V tabulce 1 jsou uvedeny maximální přípustné hodnoty vypočteny podle vzorců (1) a (2) a také výsledky obou sledovaných charakteristik – hmotnosti pevných částic vypočtených podle vzorce (3) a obsah fluoridu sodného vypočtených podle vzorce (4).

Tabulka 1 Přehled naměřených hodnot při současném procesu

Popis výrobku	Maximální přípustné hodnoty pro		Naměřené hodnoty pro	
	hmotnost pevných částic [g]	obsah fluoridu sodného [mg/l]	hmotnost pevných částic [g]	obsah fluoridu sodného [mg/l]
A	4,5	100	4,4	145
B	4,0	91	4,0	102
C	2,1	48	2,0	62
D	1,8	22	1,9	29

Z údajů uvedených v tabulce 1 lze vyslovit závěr, že při současném nastavení pájecího procesu chladiče nesplňují specifikaci stanovenou zákazníkem. Obsah fluoridu sodného je překročen u všech sledovaných výrobků a u jednoho současně také hmotnost pevných částic.

## 4.2 Návrhy řešení problému

Hlavní příčina byla stanovena a potvrzena. Dále bylo nutné pracovat na nalezení účinného opatření. Byl ustanoven tým pro řešení problému, složený z pracovníků výroby, technologie a kvality.

První myšlenkou bylo snížení koncentrace tavidla. Tavidlo aplikované v pájecí peci je směs prášku v demineralizované vodě s koncentrací 10 – 12 %. Pro ověření toho, zda je to krok správným směrem, byly vyrobeny vzorky s koncentrací 7 %. Při následném zpracování bylo však 15 % vzorků vyhodnoceno jako netěsných. Příčinou bylo nedostatečné připájení trubek uprostřed chladicího jádra. Tato cesta se tedy ukázala pro vyřešení problému jako nevhodná.

Dalším podnětem bylo odstranění přebytku tavidla z trubek. Nezapájené hliníkové jádra byly odebrány z pásu pece po nanesení tavidla, tyto byly po dobu 2 minut uvedeny do svislé polohy a poté zapájeny. Zapájení bylo v odpovídající kvalitě, výsledky vnitřní čistoty byly pod stanoveným limitem. Dále bylo nutné vymyslet realizaci v sériovém procesu. V pájecí peci existuje mezi sekcí nanesení tavidla a sekcí předehřevu prostor asi 120 cm,

který by bylo možné využít k naklonění jádra a umožnit tak přebytku tavidla z trubek vytéct. Byly realizovány zkušební výrobní dávky s přidáním operátora pro naklonění jader. Výsledky těchto zkoušek však nebyly uspokojivé. Operátor měl na naklonění pouze asi 20 vteřin, nikoli 120 jako tomu bylo při prvotní zkoušce. Bylo by nutné prostor mezi nanesením tavidla a předehřevem značně prodloužit, a to bylo zamítnuto jako nerealizovatelné z hlediska prostorových možností. Navíc se při naklání jader operátorem vyskytly vizuální vady způsobené manipulací nezapájeného jádra, a to především změna pozice lamel. Manipulace s nezapájeným jádrem se tedy ukázala jako nevhodná.

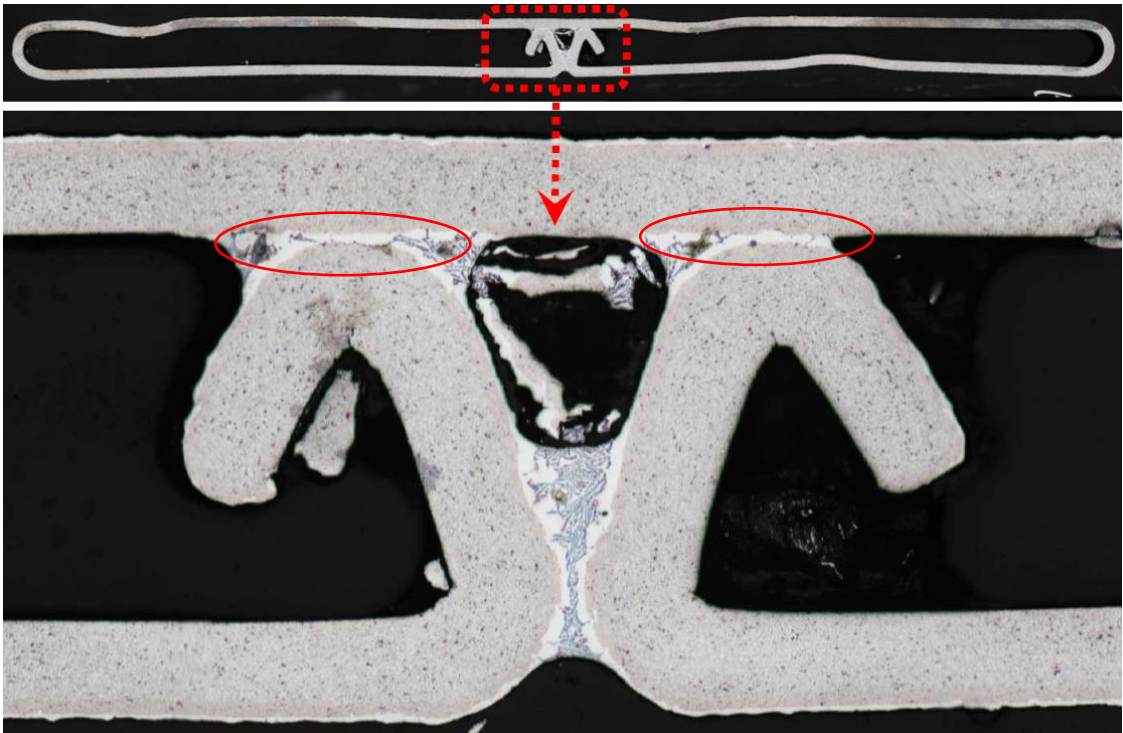
Naskytla se ještě další možnost jak přebytek tavidla odstranit. Na konci sekce nanášení tavidla jsou instalovány trysky, které jsou napojeny na stlačený vzduch. Foukající vzduch má za úkol odstranit přebytečné množství tavidla z vnitřního prostoru trubek. Tento vzduchový systém byl navržen již na začátku výroby, avšak není dostatečný. Proto byla navržena změna nastavení tlaku vzduchu – z hodnoty 1 bar na 2 bary. Při tomto nastavení se vložky na pásu posouvaly, a to není žádoucí. Teoreticky by tento problém bylo možné odstranit zajištěním vložek proti pohybu. Prakticky to však není možné, protože pás je pohyblivý a rozměry výrobků se liší.

Z provedených zkoušek vyplývá, že pro vyřešení problému je nutné odstranit boční aplikaci tavidla. Boční aplikací je pájka nanášena na celou vnitřní plochu trubky, přitom na vnitřních stěnách trubky není pájka potřebná. Bylo tedy nutné nalézt vhodné řešení pro zachování kvality zapájení, a současně snížení zbytků fluoridu sodného po pájení.

## 5 PROCES APLIKACE TAVIDLA DO TRUBKY

Při hledání příčin vysokých hodnot zbytkového fluoridu sodného bylo uvažováno několik možností. Hlavní příčinou bylo stanoveno velké množství zbytků pájky po pájení, protože tyto zbytky obsahují nežádoucí fluorid sodný. Následné odstranění těchto zbytků není z hlediska efektivity výrobního procesu možné.

Ve výsledku je jako kořenová příčina stanovena boční aplikace pájecího prostředku do trubek. Řešením je cílená aplikace pájky do malého prostoru trubky, kde musí přijít k zapájení tzv. nožiček, jak je zobrazeno na obrázku 8.

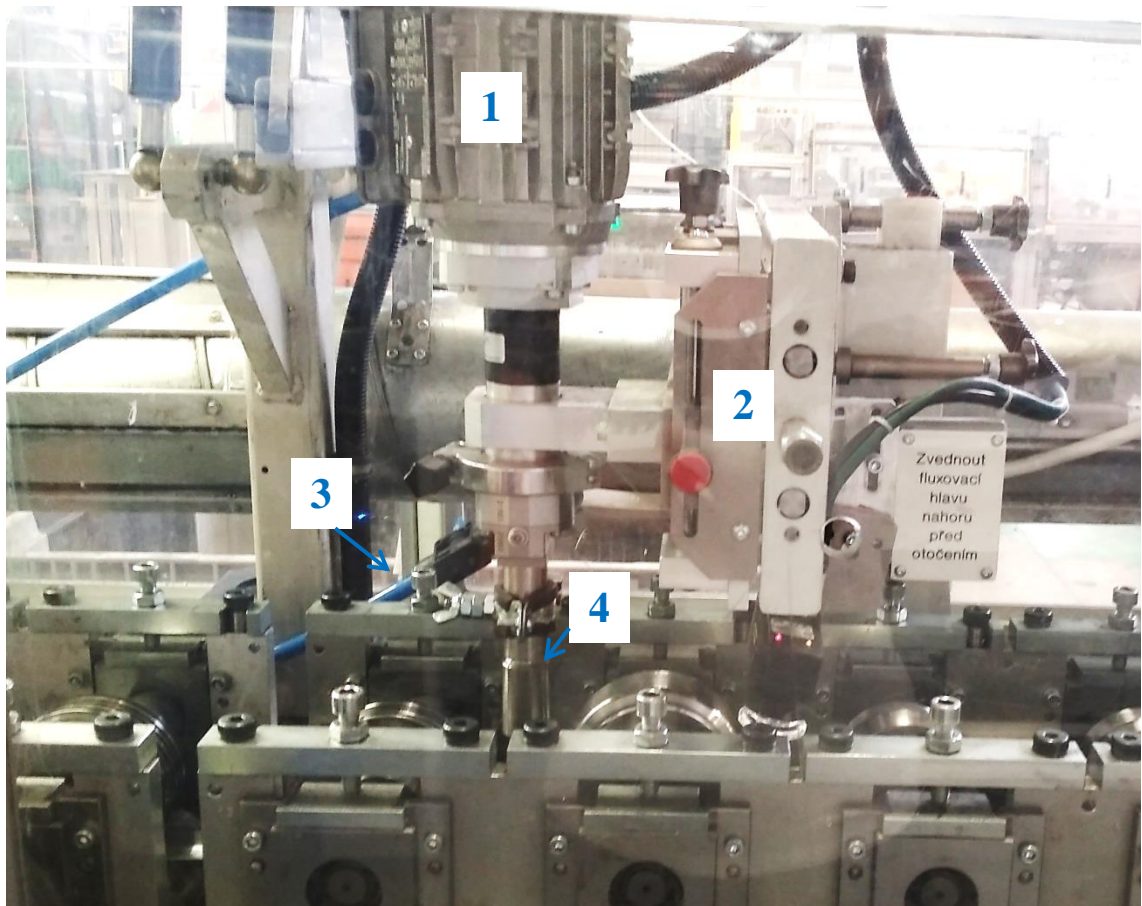


Obrázek 20 Profil B-trubky se zvýrazněním místa připájení nožiček

Nanést pájku, nebo přesněji pájecí pastu, do trubky je možné pouze při tváření trubky. Proto byl ve spolupráci s firmou Emerson vymyšlen systém, který zajistí proces aplikace pájecí pasty do trubky.

## 5.1 Konstrukční řešení

Aplikační systém bylo nutné instalovat do stávajícího stroje, existuje tedy značné prostorové omezení. Bylo nutné vzít také v úvahu nezbytný manipulační prostor pro vyjmutí tvářecích kol ze stroje. Proto byla zvolena jednoduchá podporná konstrukce s polohovatelným ramenem.



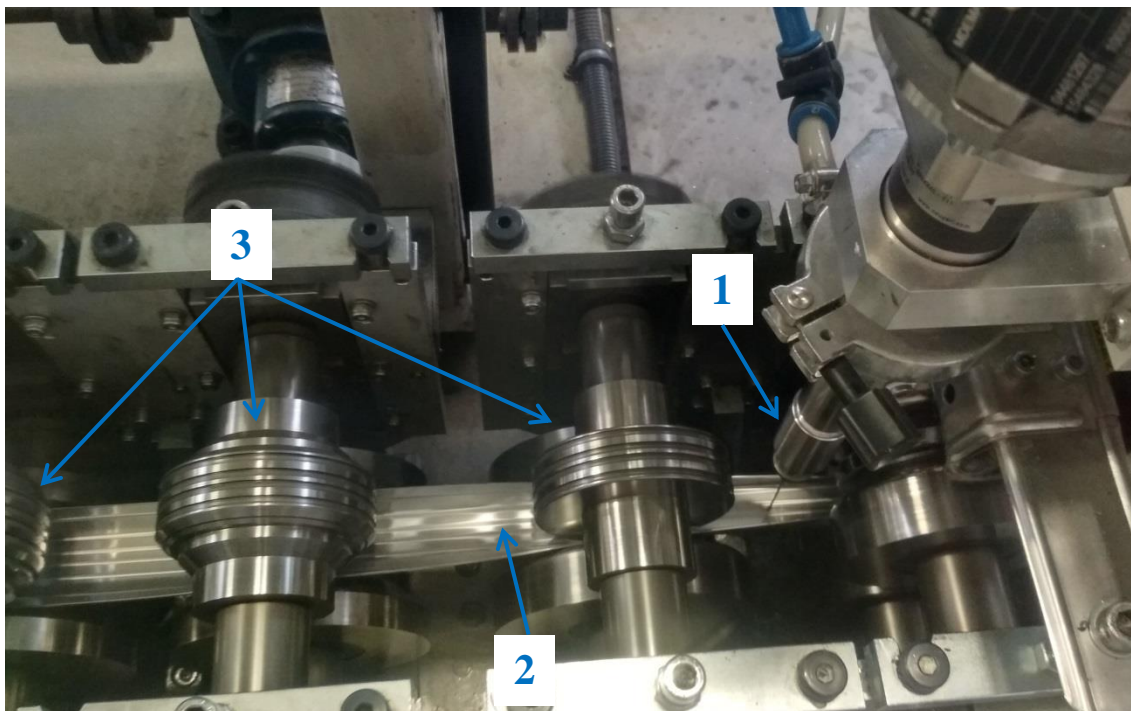
Obrázek 21 Aplikační systém instalován ve stroji

1 Motor

2 Vyrovnávací stůl

3 Přívod pájecí pasty

4 Aplikátor



Obrázek 22 Detail aplikace – pohled shora

1 Aplikátor s jehlou

3 Tvářecí kola

2 Hliníkový pásek

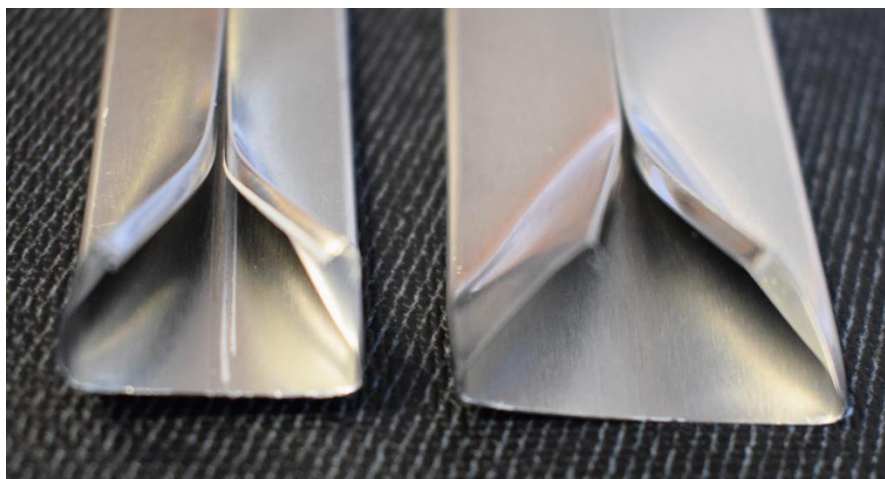
Výkres zařízení je přílohou PI.

## 5.2 Parametry aplikace pájecí pasty

Šířka nánosu pájecí pasty byla stanovena podle vzdálenosti nožiček trubky. Potřebná šířka pásu pájecí pasty je tedy 1,1 - 1,3 mm. Dalším důležitým parametrem, který bylo nutné stanovit, je množství naneseného tavidla. Pro stanovení správné hodnoty bylo provedeno několik zkoušek. Cílem bylo najít takové množství pájecí pasty, které zabezpečí odpovídající kvalitu zapájení nožiček trubky, ale zároveň nezpůsobí překročení limitů na obsah zbytkového fluoridu sodného. Výrobce zařízení byla doporučena hodnota 0,2 g/m trubky. Při tomto nastavení bylo zapájení v pořádku, avšak výsledky zbytkového fluoridu sodného byly velmi blízko specifikaci a u jednoho z výrobků byla překročena předepsaná hodnota. Při dalších zkouškách bylo množství pasty několikrát snižováno. Výsledkem těchto zkoušek bylo nastavení množství pájecí pasty na hodnotu 0,08 - 0,12 g/m trubky.

Tato hodnota byla zapsána do kontrolního plánu a musí být kontrolována při každém začátku směny, na konci výrobní dávky, při výměně nástroje a při výrobních problémech.

Nezbytnou součástí aplikačního systému je také nepřetržitá kontrola správného nanesení pájecí pasty prostřednictvím kamery. Kamera snímá proužek pájecí pasty na trubce ihned po aplikaci před tím, než ji další tvářecí kolo uzavře. Kamera je spojena s řídicí jednotkou stroje a v případě odchylky více než 10 % je stroj zastaven a je nutné provést vyčištění aplikační jehly.



Obrázek 23 Rozevřená trubka – vlevo s pájecí pastou, vpravo bez

### 5.3 Výsledky vnitřní čistoty

Po zprovoznění aplikačního zařízení byly vyrobeny vzorky a tyto předány na zkoušku vnitřní čistoty. Všechny výsledky splnily stanovenou specifikaci pro obsah fluoridu sodného i hmotnost pevných částic. Souhrnné výsledky jsou uvedeny v tabulce 2.



Tabulka 2 Přehled naměřených hodnot po zavedení aplikace pasty do trubky

Popis výrobku	Maximální přípustné hodnoty pro		Naměřené hodnoty pro			
	hmotnost pevných částic [g]	obsah fluoridu sodného [mg/l]	hmotnost pevných částic [g]		obsah fluoridu sodného [mg/l]	
			před	po	před	po
-						
A	4,5	100	4,4	4,2	145	91
B	4,0	91	4,0	3,7	102	88
C	2,1	48	2,0	1,8	62	45
D	1,8	22	1,9	1,6	29	19

Pro ověření byly následně provedeny další zkoušky a ty potvrdily splnění kvality zapájení i vnitřní čistoty.

To však nestačí. Je nezbytné zajistit, aby byly chladiče dodávány stále ve stejné kvalitě. Kontrola nastaveného množství pájecího přípravku byla již zavedena do plánu kontrol, ale standard kvality musí být sledován i po pájecím procesu. Proto musí být zkouška vnitřní čistoty zavedena do procesních testů – každé 3 měsíce se náhodně vybraný chladič podrobí zkoušce. V případě výskytu odchylek či nežádoucího trendu výsledků je možné hledat řešení a pracovat na zlepšování ještě před tím, než se může projevit problém při provozu automobilu.

## ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo naleznout řešení nevyhovující vnitřní čistoty chladiče. Tento parametr začal být sledován z důvodu vyskytujících se problémů s čerpadlem pohánějším chladicí kapalinou v automobilu. Prvotní impulz přišel od automobilky. Zákazník požadoval prověření vnitřní čistoty testem, který je popsán v kapitole 3.3.1. Byla provedena zkouška a výsledky nebyly uspokojivé – ve výplachu chladiče byly zjištěny vysoké hodnoty fluoridu sodného. Ten při dlouhodobé reakci s chladicí kapalinou způsobuje zvyšování viskozity a následné poruchy čerpadla. Za příčinu vysokých hodnot fluoridu sodného byly definovány zbytky pájecího přípravku. Při boční aplikaci se ho do chladiče dostane příliš. Avšak hliníkové jádro chladiče se pájí ve vodorovné poloze, přebytek tedy nemůže samovolně odtéci. Bylo tedy nutné boční aplikaci pájecího přípravku odstranit a nahradit jej adekvátním řešením. Ve spolupráci s odbornou firmou byl navržen systém aplikace pájecího přípravku přímo do trubky při její výrobě. Dále bylo nutné nastavit správné množství aplikovaného přípravku. To nebylo možné určit výpočtem, takže správná hodnota byla zjišťována empiricky. Při správném nastavení parametrů bylo dosaženo splnění stanovených požadavků.

Pro kontinuální zlepšování procesů lze pouze doporučit implementaci aplikačního systému na další stroje pro výrobu B-trubek. Aby byla zabezpečena neměnná kvalita výrobků v čase, byla zkouška vnitřní čistoty doplněna do seznamu pravidelných zkoušek. Tak může výroba operativně reagovat na případné odchylky a provést nápravu dříve, než se projeví u zákazníka.

Skutečnou úspěšnost zavedeného zlepšení ukáže až čas. Podle informací z automobilky se problém s čerpadlem projevuje přibližně po 30 měsících provozu. Pokud je problém vyvolán skutečně přítomností fluoridu sodného, lze očekávat kladné výsledky.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

### Bibliografické zdroje

- [1] KOLEKTIV AUTORŮ. *Technologie svařování a zařízení*. 1. Zeros, 2001, 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
- [2] PEASLEE, Robert L. *Brazing Footprints: Case Studies in High-Temperature Brazing*. 1. Michigan: Wall Colmonoy Corporation, 2003, 299 s. ISBN 0-9724479-0-3.
- [3] ROBERTS, Philip M. *Industrial Brazing Practice*. 1. Boca Raton, 2003, 383 s. ISBN 0-8493-2112-3.
- [4] RUŽA, V. *Pájení*. 2. SNTL, 1988, 452 s. bez ISBN.
- [5] Schwartz, M. *Brazing: For the engineering technologist*. 1. St. Edmundsbury Press, 1995, 399 s. ISBN 0-412-60480-9.

### Elektronické zdroje

- [6] BARTÁK, Jiří. *Fyzikální podstata pájení*. [online]. Techportal: ©2012 [cit. 30.11.2018]. Dostupné z: [https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR\\_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a\\_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCyda4qSAP2hZNnz\\_st-3-A4fw](https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCyda4qSAP2hZNnz_st-3-A4fw)
- [7] PALÁT, Hynek. *Pájení*. [online]. Střední škola průmyslová a umělecká, Opava: ©2012 [cit. 4.2.2019]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/14876952-Pajeni-ke-spojenu-dojde-vlivem-difuze-a-rozpustnosti-pajky-v-zakladnim-materialu.html>
- [8] *Je třeba měnit chladicí kapalinu? Ano*. [online]. Autosalon.tv: ©2014 [cit. 18.2.2019]. Dostupné z: <https://autosalon.iprima.cz/novinky/je-treba-menit-chladici-kapalinu-ano>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

EPDM	Etyle-propylen-dienový kaučuk
PA 6.6	Polyamid 6.6
$m_v$	výsledná hmotnost pevných nečistot [g]
$m$	hmotnost nečistot zjištěna z 250 ml výluhu [g]
$I_{LNL}$	délka pájeného spoje [m]
$n_R$	počet trubek [-]
$l_R$	délka trubek [m]
$b_R$	šířka trubek [m]
$h_R$	výška trubek [m]
$m_C$	celková hmotnost nečistot na chladič [g]
$f_C$	celkový obsah fluoridu sodného na litr [mg/l]

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1 Struktura pájeného spoje [7].....	13
Obrázek 2 Poměr dotkových ploch [6] .....	14
Obrázek 3 Progresivní změna v kompozici pájeného spoje při smáčení.....	19
Obrázek 4 Schéma chladicího systému automobilu [8].....	33
Obrázek 5 Nezapájené hliníkové jádro v rámu.....	34
Obrázek 6 Detail profilu B-trubky.....	34
Obrázek 7 Lamely: vlevo finální podoba, vpravo v roztaženém stavu .....	35
Obrázek 8 Bočnice.....	35
Obrázek 9 Víko.....	35
Obrázek 10 Zapájené hliníkové jádro bez rámu .....	36
Obrázek 11 Těsnění volně vložené do víka .....	36
Obrázek 12 Víko pevně spojeno s komorou.....	36
Obrázek 13 Schéma pájecí pece .....	37
Obrázek 14 Aplikace tavidla v pájecí peci vodopádem.....	37
Obrázek 15 Trysky pro boční aplikaci tavidla.....	38
Obrázek 16 Trysky pro boční aplikaci tavidla – v provozu.....	38
Obrázek 17 Analýza zapájení lamely a trubky .....	39
Obrázek 18 Analýza zapájení víka a trubky .....	39
Obrázek 19 Schéma zapojení při zkoušce čistoty (zdroj PV 3678).....	41
Obrázek 20 Profil B-trubky se zvýrazněním místa připájení nožiček .....	45
Obrázek 21 Aplikací systém instalován ve stroji.....	46
Obrázek 22 Detail aplikace – pohled shora .....	47
Obrázek 23 Rozevřená trubka – vlevo s pájecí pastou, vpravo bez .....	48

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Přehled naměřených hodnot při současném procesu .....	43
Tabulka 2 Přehled naměřených hodnot po zavedení aplikace pasty do trubky .....	49

## SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ APLIKAČNÍHO ZAŘÍZENÍ